







หนังสือ **"ประสบการณ์งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและโครงสร้างใต้ดินในประเทศไทย"** เล่มนี้ ได้ถูกจัดทำขึ้นในโอกาสครบรอบ 40 ปีของบริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) ทางบริษัทฯ ได้รวบรวมบทความในงานประชุมวิชาการระดับประเทศ จำนวน 37 บทความ ซึ่งบทความเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นประสบการณ์จากงานก่อสร้างในชั้นดินอ่อนกรุงเทพ และบางส่วนเป็นบทความที่เกี่ยวกับงานในชั้นดินที่แตกต่างออกไปในต่างจังหวัด นอกจากนี้ บริษัทฯ ได้ทำการวิจัยร่วมกับมหาวิทยาลัยต่างๆ เกี่ยวกับงานวิศวกรรมปฐพี คอนกรีตเทคโนโลยีในงานฐานราก รวมทั้งนวัตกรรมที่ใช้ในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและโครงสร้างใต้ดิน เป็นต้น ซึ่งบทความเหล่านั้นก็ได้ถูกรวบรวมไว้ในหนังสือเล่มนี้ด้วยเช่นกัน

จากประสบการณ์ของบริษัทฯ กว่า 40 ปี ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบกลม เสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม กำแพงกันดินระบบไดอาแฟรมวอลล์ และระบบค้ำยันในงานขุดดิน บริษัทฯ ตระหนักถึงความสำคัญที่จะสร้างและเผยแพร่องค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการวางแผน การออกแบบ การเลือกเทคนิคการก่อสร้าง และการควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง ตัวอย่างบทความในหนังสือเล่มนี้ประกอบด้วย พัฒนาการของเสาเข็มเจาะในประเทศไทย ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะ การเลือกใช้กำแพงกันดินและระบบค้ำยันที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง วิวัฒนาการของกำแพงกันดินระบบไดอาแฟรมวอลล์ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการก่อสร้างและวิธีการควบคุมป้องกัน การตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีระหว่างการก่อสร้าง เป็นต้น

บริษัทฯ หวังว่าบทความวิจัย และกรณีศึกษา ในงานวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในหนังสือเล่มนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน เพื่อใช้ในการวางแผนโครงการ ควบคุมคุณภาพงานก่อสร้าง และใช้เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการวิจัยเพื่อพัฒนาวิชาชีพวิศวกรรม และวงการก่อสร้างฐานรากในประเทศไทยต่อไป

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)
144 ถนนพระยาสุเรนทร์ แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510
โทรศัพท์ 0-2919-0090 - 7 โทรสาร 0-2919-0098
www.seafco.co.th

WE BUILD MODERN FOUNDATIONS

งานครบรอบ 40 ปี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)
ประสบการณ์งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและโครงสร้างใต้ดินในประเทศไทย
2557

งานครบรอบ 40 ปี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)
19 ธันวาคม 2557

ประสบการณ์งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและโครงสร้างใต้ดินในประเทศไทย

บรรณาธิการ
ซอว์ ซอว์ เอย์
ธยานันท์ บุณยรักษ์
เฉลิมพล เตชะกำธร
ณัฐชัย โปร่งมณี
ณัฐฐพล ทัศนนิพันธ์







40 ANNIVERSARY TH SINCE 1974
SEAFCO
THE FOUNDATION OF SUCCESS

งานครบรอบ 40 ปี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

19 ธันวาคม 2557

ประสบการณ์งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะ และโครงสร้างใต้ดินในประเทศไทย

บรรณาธิการ

ซอว์ ซอว์ เอย์

ธยานันท์ บุณยรักษ์

เฉลิมพล เตชะกำธร

ณัฐชัย โปร่งมณี

ณัฐฐพล ทัศนนิพันธ์

สมาชิกของ

aci international

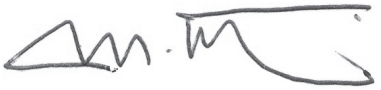
ADSC The International Association of Foundation Drilling

DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE DFI

คำนำ

ตลอดระยะเวลา 40 ปีที่ผ่านมาบริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) มุ่งมั่นที่จะก้าวไปเป็นผู้นำด้านงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ กำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ และงานโครงสร้างใต้ดินของเอเชีย โดยมุ่งเน้นความสำคัญของงานวิจัยและพัฒนา ควบคู่ไปกับการยกระดับมาตรฐานและเทคโนโลยีการก่อสร้างของบริษัทฯ อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ทางบริษัทฯ ยังเล็งเห็นความสำคัญของการเผยแพร่องค์ความรู้เหล่านั้นสู่สาธารณะ ผ่านการตีพิมพ์บทความวิชาการต่างๆมากมาย ทั้งภายในประเทศและระดับนานาชาติ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะยกระดับมาตรฐานงานวิศวกรรมปฐพีและฐานรากโดยรวม เพื่อผลประโยชน์สูงสุดต่อการพัฒนาประเทศ

หนังสือรวบรวมบทความวิชาการของ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) เล่มนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นในโอกาสครบรอบ 40 ปีของทางบริษัทฯ โดยบทความที่คัดเลือกมานั้นได้รับการตีพิมพ์ในหนังสือการประชุมวิชาการต่างๆ ซึ่งล้วนเป็นที่ยอมรับในระดับประเทศ โดยมีทั้งบทความว่าด้วยองค์ความรู้การออกแบบโครงสร้างใต้ดิน เทคนิคการก่อสร้าง การทดสอบสมรรถภาพของโครงสร้างใต้ดินในสนามและการแปลผล การตรวจวัดและวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างใต้ดินระหว่างการก่อสร้าง การควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้าง และ กรณีศึกษาต่างๆมากมาย โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือรวบรวมบทความวิชาการของ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) เล่มนี้ จะสามารถเป็นแหล่งข้อมูลให้กับผู้ที่สนใจและก่อประโยชน์ให้กับวิศวกร อาจารย์ นักวิจัย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในวงการอุตสาหกรรมงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินของประเทศไทยสืบไป



นายณรงค์ ทัศนนิพันธ์
ประธานเจ้าหน้าที่บริหารและกรรมการผู้จัดการใหญ่
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

สารบัญ

หน้า

งานเสาเข็มเจาะแบบกลมและแบบเหลี่ยม

ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ ในปัจจุบัน 1
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์

ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพฯ 27
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์

การสร้างมาตรฐานงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในยุคโลกาภิวัตน์ 65
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์

การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะจากระยะเวลาก่อสร้างและความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์ 77
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช, สิทธิพล สุรอังกูร และ พรพจน์ ตันเส็ง

ความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้ง 87
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์ และ กมล อยู่ยืนพัฒนา

ปัญหาในงานเสาเข็มเจาะที่เกิดจากคุณภาพคอนกรีต 95
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล และ สุเมธ ประเวศวรารัตน์

น้ำหนักบรรทุกสูงที่สุดเท่าที่เคยทดสอบกับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ 103
กมล สิงห์โตแก้ว, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และ พรพจน์ ตันเส็ง

การควบคุมคุณภาพเสาเข็มระบบเจาะแห้งโดยเครื่องเจาะแบบสามขา 109
ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, นที รัตนชูวงค์ และ จรุง หิรัญอ่อน

สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพ 115
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์

อันตรายและมาตรการความปลอดภัยในงานเสาเข็มเจาะ 123
สิทธิพล สุรอังกูร, สุเมธ ประเวศวรารัตน์ และ ตุลา นพพันธ์

สารบัญ

หน้า

ประสบการณ์การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม 131
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และ พรพจน์ ตันเส็ง

การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ 137
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และ พรพจน์ ตันเส็ง

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะและปัญหา 143
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์

พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก 175
ในชั้นดินกรุงเทพฯ
วันชัย เทพรักษ์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

คอนกรีตเทคโนโลยีสำหรับงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก 181
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช, ซอว์ ซอว์ เอย์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

การเตรียมงานและควบคุมการก่อสร้างฐานรากในพื้นที่ประวัติศาสตร์ 187
สุเมธ ประเวศวรารัตน์, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียกจากอดีตถึงปัจจุบัน 205
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่มากสำหรับสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา 221
โครงการถนนวงแหวนรอบนอกตอนใต้
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เฉลิมพล มโนสุทธิสาร, ธยานันท์ บุณยรักษ์ และ
จักรกฤษณ์ จันจัด

การพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะลึก 227
ขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์, ธยานันท์ บุณยรักษ์ และ ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์

การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเนื่องจากการก่อสร้างฐานรากในชั้นดินกรุงเทพฯ 233
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

สารบัญ

หน้า

กำแพงกันดินไดอาแฟรมวอลล์และงานขุดดิน

กำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดินกรุงเทพ : ความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นและการป้องกัน 239
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และ กมล สิงห์โตแก้ว

บทเรียนจากการวิบัติของบ่อบำบัดน้ำเสียยานนาวา 249
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์

สารละลายเบ็นโทไนท์ในงานกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตในชั้นดินกรุงเทพฯ : คุณสมบัติต่างๆ และ วิธีการควบคุม 257
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และ พรพจน์ ตันเส็ง

กรณีศึกษาการวิบัติชนิดรุนแรง ในงานขุดดินแบบใช้ค้ำยันในชั้นดินกรุงเทพฯ 263
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ กมล สิงห์โตแก้ว

พฤติกรรมของกำแพงพืดกันดินอย่างบางชนิดขุด-หล่อในที่โครงการอาคารจอดรถใต้ดินในกรุงเทพฯ 275
ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

ข้อที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบโครงสร้างกำแพงพืดกันดินชนิดขุด-หล่อ ในที่ในงานก่อสร้างใต้ดิน 281
กมล สิงห์โตแก้ว, สุเมธ ประเวศวรารัตน์, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

ความต้านทานความชื้นและน้ำซึมเข้าห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพฯ 287
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง, ธยานันท์ บุณยรักษ์ และ จักรกฤษณ์ จันจัด

กรณีศึกษาเทคนิคงานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง 297
ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, วรพงษ์ อติวรรณาพัฒน์ และ สมศักดิ์ สมบูรณ์ทรัพย์

การก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลางด้วยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง 303
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล และ ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์

สารบัญ

หน้า

เทคนิคงานก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยก 323
ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์

วิวัฒนาการงาน Diaphragm wall ในประเทศไทย 351
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์

การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะ และการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างใต้ดิน

ประสบการณ์ในการตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะโดย โซนิก อินเทกกริที เทสติ้ง 361
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์ และ จรุง หิรัญอ่อน

การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะลึกมากก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพ โดยวิธี Sonic logging และการแปลคลื่นสัญญาณ 367
ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, จรุง หิรัญอ่อน และ สมบูรณ์ พิมสาร

การประยุกต์วิธีทดสอบครอสโฮลโซนิคล็อคกิ้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพหัวเสาเข็มก่อนทำการขุดเปิดหน้าดิน 375
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

บทบาทการตรวจวัดพฤติกรรมทางวิศวกรรมปฐพีสำหรับงานก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในกรุงเทพฯ 379
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมดินซีเมนต์

การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึก 389
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุดดินเหนียวอ่อน 395
ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง และ ธยานันท์ บุณยรักษ์

ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ ในปัจจุบัน

นาย ณรงค์ ทัศนนิพันธ์
บริษัท ซีพโก้ จำกัด

1.<u>คำนำ</u>

เสาเข็มเจาะได้เข้ามามีบทบาทในวงการก่อสร้างในประเทศไทยโดยเฉพาะในพื้นที่กรุงเทพมหานครมาเป็นเวลากว่า 30 ปีมาแล้ว เสาเข็มเจาะรุ่นแรกที่มีผู้นำมาใช้ในกรุงเทพมหานครเป็นเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบ WET PROCESS โดยใช้เครื่องจักรระบบ REVERSE CIRCULATION ก่อสร้างในแม่น้ำเพื่อเป็นฐานรากของสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา เช่น สะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า, สะพานสมเด็จพระเจ้าตากสินเป็นต้น เสาเข็มเจาะระบบนี้เริ่มเข้ามามีบทบาทประมาณปี พ.ศ.2510 และยังมีการนำเข้ามาใช้เป็นครั้งคราวในงานก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาอีกหลายแห่งที่มีเสาตอม่อสะพานอยู่ห่างฝั่งมากๆ หลังจากนั้นประมาณปี พ.ศ. 2514 ได้มีผู้นำเสาเข็มเจาะระบบอื่นๆ เข้ามาใช้ในกรุงเทพมหานคร ส่วนใหญ่จะนำมาก่อสร้างอาคาร, สิ่งปลูกสร้างบนบก โดยเริ่มแรก จะเป็นเสาเข็มเจาะระบบแห้ง DRY PROCESS เจาะไม่ลึกนัก เช่นเข็มเจาะระบบ TRIPOD (แบบสามขา), ระบบCONTINOUS FLIGHT AUGER, CASING OSCILLATOR, ระบบ BENOTO แต่พบว่าเสาเข็มเจาะระบบ DRY PROCESS รุ่นแรกๆ ดังกล่าวข้างต้นที่นำมาใช้มีความไม่เหมาะสมกับสภาพดินในกรุงเทพมหานคร จึงเลิกกันไปเกือบหมด เหลือเพียงระบบสามขาที่ยังมีผู้ใช้กันอยู่แพร่หลายในโครงการต่างๆ ที่มีขนาดน้ำหนักบรรทุกออกแบบไม่สูงมากนัก

ต่อจากนั้นประมาณปีพ.ศ. 2520 จึงได้มีผู้ทำเครื่องมือทำเสาเข็มเจาะระบบ ROTARY DRILLING RIG เข้ามาใช้ในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยเครื่องมือระบบนี้สามารถใช้เจาะได้ทั้งระบบ DRY PROCESS และ WET PROCESS อาคารชุดแรกๆ ที่ใช้เสาเข็มเจาะชนิดนี้ เช่น โรงแรม ROYAL ORCHID, อาคาร TAI PING TOWER ฯลฯ อาคารชุดแรก ๆ ที่ใช้เสาเข็มประเภทนี้ จะเจาะโดยระบบ WET PROCESS โดยเจาะให้ความลึกปลายเสาเข็มอยู่ที่ทรายแน่นชั้นแรก ความลึกประมาณ 30 - 35.00 เมตร โดยออกแบบให้เสาเข็มมีค่าการรับน้ำหนักประมาณ 200 - 300 ตันต่อต้น (DIA. 1.00 ม.) ต่อมาอาคารเริ่มมีการออกแบบให้มีความสูงมากขึ้น เสาเข็มระบบนี้จึงได้พัฒนาให้รับน้ำหนักมากขึ้นโดยเริ่มเจาะให้ลึกถึงชั้นทรายแน่นชั้นที่สองอาคารแรกคือ อาคารอโศกทาวเวอร์ ซึ่งก่อสร้างเมื่อประมาณปี 2526 หลังจากโครงการอโศกทาวเวอร์เป็นต้นมา เสาเข็มเจาะระบบ ROTARY DRILLING RIG ถูกออกแบบให้เจาะลึกถึงชั้นทรายชั้น

ที่ 2 และชั้นที่ 3 (ความลึกตั้งแต่ 40-70 เมตร) และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย นอกจากนั้นในบางโครงการที่อาคารมีความสูงมากๆ แม้ว่าจะทำการก่อสร้างเสาเข็มให้ลึกถึงระดับ 60 เมตรแล้ว พบเสาเข็มเจาะระบบปรกติยังรับน้ำหนักไม่พอ ระบบเสาเข็มเจาะจึงได้พัฒนาให้เสาเข็มรับน้ำหนักมากขึ้นไปอีกโดยทำการเปลี่ยนรูปทรงเป็นเสาเข็มแบบเหลี่ยม (BARRETTE PILE) เพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือทำการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม (BASE GROUTED BORED PILE) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเสาเข็มธรรมดา

นอกจากเสาเข็มเจาะระบบ DRY PROCESS และ WET PROCESS แล้วยังมีผู้นำระบบเสาเข็มเจาะขนาดจิ๋วซึ่งเรียกว่า MICRO PILE หรือ MINI PILE ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20-40 ซ.ม. เข้ามาใช้ในงานเสริมฐานรากอาคาร งานแรกที่มีการใช้ เสาเข็มเจาะขนาดจิ๋วนี้คือ งานซ่อมฐานรากอาคารศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.ระบบและเทคนิคเสาเข็มเจาะที่ใช้ในกรุงเทพมหานครในอดีตและปัจจุบัน

2.1 ระบบเสาเข็มเจาะแบบแห้ง(DRY PROCESS)

เสาเข็มเจาะระบบเจาะแห้ง ส่วนใหญ่จะเป็นเสาเข็มเจาะให้ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินแข็ง ไม่สามารถให้ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทราย เนื่องจากจะมีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดินในชั้นทราย เข้ามาในหลุมเจาะ ซึ่งจะทำให้หลุมเจาะพังทลายได้ และจะทำให้มีปัญหาเรื่องกำลังแบกทานของปลายเสาเข็ม เสาเข็มแระเภทนี้ จะใช้เครื่องมือประเภท TRI POD RIG (เครื่องเจาะแบบสามขา) โดยใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวป้องกันชั้นดินอ่อน, ระบบ BENOTO RIG, ระบบ OSCILLATOR RIG WITH FULL CASING และระบบ CFA เป็นต้น

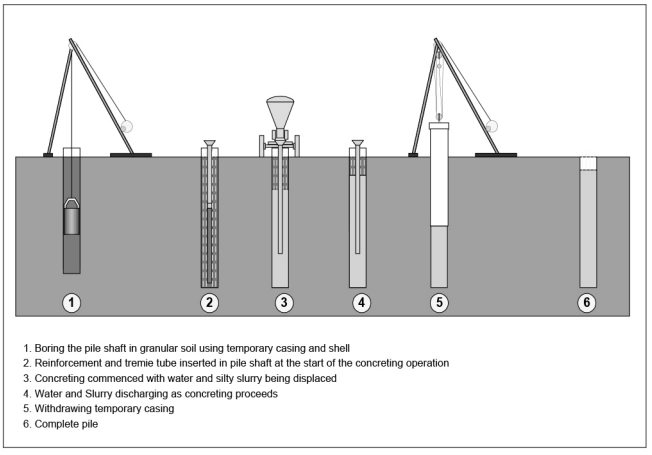
2.1.1 เสาเข็มเจาะระบบ TRIPOD RIG (เครื่องเจาะแบบสามขา)

เสาเข็มเจาะระบบนี้มีผู้นำเข้ามาก่อสร้างในกรุงเทพฯ ประมาณปี 2514 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 35-60 ซ.ม. เจาะได้ลึกประมาณไม่เกิน 25.00 ม. เนื่องจากหากลึกกว่านี้จะมีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดินและการไม่คงรูปของรูเจาะ เสาเข็มประเภทนี้ยังเป็นที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน แต่มีความเหมาะสมกับสิ่งปลูกสร้างที่มีน้ำหนักไม่มากนัก เข็มแต่ละต้นจะได้รับการออกแบบให้รับน้ำหนักได้ประมาณ 40-80 ตัน เท่านั้น ขึ้นอยู่กับความลึกและขนาดของเสาเข็ม

ขั้นตอนการเจาะประกอบด้วย

- ลงปลอกเหล็กชั่วคราวเพื่อป้องกันชั้นดินอ่อนและเจาะดินในปลอกเหล็กออก
- เมื่อเจาะจนได้ระดับแล้วทำการลงเหล็กเสริมและติดตั้งท่อเทคอนกรีต
- ทำการเทคอนกรีตจนเต็มรูเจาะจนได้ระดับคอนกรีตที่ต้องการ
- ทำการถอนปลอกเหล็กออก

ขั้นตอนการก่อสร้างตามรูปที่ 1



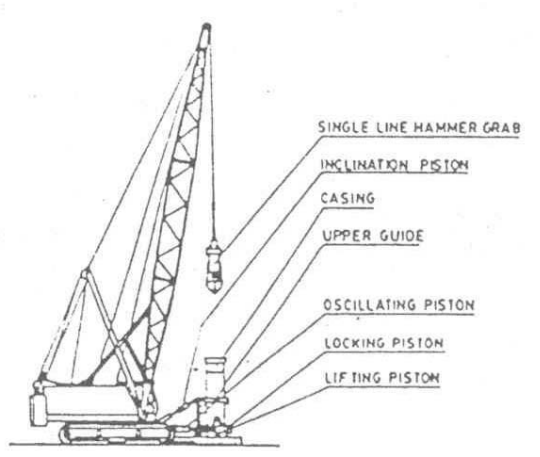
รูปที่1 เสาเข็มเจาะแบบ TRI-POD และขั้นตอนการเจาะ

2.1.2. เสาเข็มเจาะระบบ PERCUSSION DRILLING เสาเข็มเจาะชนิดนี้ที่นำเข้ามาใช้ในกทม. มี 2 แบบ คือ

2.1.2.1. เสาเข็มเจาะระบบ OSCILLATOR RIG WITH FULL CASING

เสาเข็มเจาะแบบเจาะแห้งแบบนี้ ได้มีผู้นำมาใช้ในครั้งแรกที่โครงการอัมรินทร์ทาวเวอร์ พบว่าไม่เหมาะกับสภาพดินในกรุงเทพฯ การเจาะจะทำการใส่ปลอกเหล็กชั่วคราวเป็นท่อนๆ ต่อกันยาวตลอดความยาวของเสาเข้มโดยใช้เครื่อง OSCILLATOR หมุนและกดปลอกเหล็กลงไป ส่วนการเจาะใช้ MECHANICAL CABLE GRAB เป็นตัว

เก็บดิน เหตุที่ต้องลงปลอกเหล็กตลอดความยาวเพื่อให้ดินถูกตัดจนได้รูปกลมตามขนาดของเสาเข็มตลอดความยาว เมื่อเจาะดินจนได้รูปแล้ว จึงทำการลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตในระหว่างเทคอนกรีตต้องทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออกทีละท่อนควบคู่กันไปด้วย เพื่อป้องกันมิให้คอนกรีตแข็งจนจับตัวกับปลอกเหล็ก เสาเข็มเจาะโดยระบบนี้พบว่าแต่ละต้นใช้เวลา 2-3 วันจึงจะแล้วเสร็จ และวิธีการนี้ไม่ได้รับความนิยม จึงได้เลิกกิจการไป รูปเครื่องมือระบบนี้ดังแสดงตามรูปที่ 2



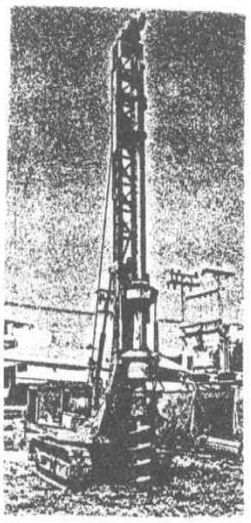
รูปที่ 2 รูปเครื่องมือทำเสาเข็มเจาะแบบ CASING OSCILLATOR

2.1.2.2.เสาเข็มเจาะระบบเจาะแห้งระบบ BENOTO



รูปที่ 3 เครื่องมือทำเสาเข็มเจาะแบบ Benoto (after Tomlinson, 1995)

Benoto Rig ได้มีผู้นำเข้ามาใช้ในกรุงเทพมหานครประมาณปี พ.ศ. 2520 วิธีการเจาะคล้ายกับOSCILLATOR WITH PULL CASING ทุกประการ เพียงแต่เครื่องมือชนิดนี้ออกแบบให้ระบบทุกชนิดอยู่ในเครื่องจักรตัวเดียวกัน ปัญหาที่พบเช่นเดียวกับระบบในข้อ 2.1.2.1. คือการก่อสร้างช้ามาก หลังจากผู้นำเข้ามาใช้ได้ทำการก่อสร้างไป ประมาณ 10 โครงการ พบว่าไม่ได้รับความนิยม เสาเข็มระบบนี้จึงเลิกไป รูปเครื่องมือระบบนี้ตามรูปที่ 3



2.1.3 เสาเข็มเจาะแบบเจาะแห้งระบบ ROTARY DRILL

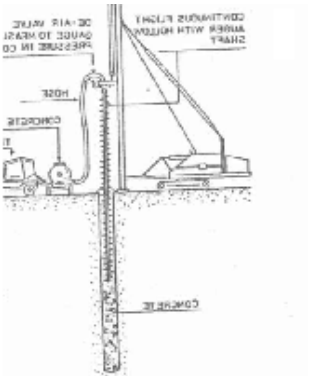
เสาเข็มเจาะแบบเจาะแห้งชนิดนี้เป็นการเจาะดิน โดยใช้เครื่องมือประเภท ROTARY DRILLING RIG วิธีการก่อสร้างโดยสังเขป คือ ลงปลอกเหล็กป้องกันชั้นดินอ่อนประมาณ 15 เมตร แล้วเจาะดินภายในปลอกเหล็กออกโดยใช้สว่าน (AUGER) จนได้ระดับที่ต้องการ หลังจากนั้นลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตจนเต็มรูเจาะและถอนปลอกเหล็กออก เสาเข็มเจาะวิธีนี้จะเจาะได้เร็วมาก หากเข็มลึกไม่เกิน 25 ม. จะใช้เวลาเจาะไม่เกิน 1 ชม. ระบบการเจาะโดยเครื่องจักรประเภทนี้ยังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน รูปเครื่องจักรใช้ในการเจาะดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 รูปเครื่องมือเจาะเสาเข็มระบบแห้ง แบบ ROTARY DRILL

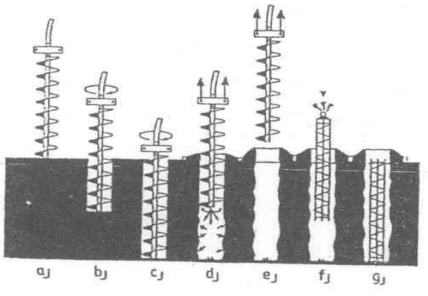
2.1.4 เสาเข็มเจาะแบบเจาะแห้งแล้วอัดน้ำปูนหรือคอนกรีตผ่านก้านเจาะ

เสาเข็มเจาะชนิดนี้ได้มีผู้นำเข้ามาใช้ประมาณปี พ.ศ. 2511 และได้ทำงานอยู่หลายโครงการ เช่น โรงแรมเพรสซิเด้นท์ ในขณะนั้นเรียกว่า เสาเข็ม PREPAC - INTRUSION PILE วิธีการก่อสร้างใช้เครื่องจักรที่มีสว่านยาวต่อเนื่อง โดยแกนสว่านมีรูกลวง การเจาะไม่จำเป็นต้องลงปลอกเหล็กชั่วคราวแต่เป็นการหมุนสว่านลงไปในดินจนได้ความลึกที่ต้องการแล้วจึงทำการอัดน้ำปูน PREPAC ลงไปในแกนกลางของสว่านพร้อมกับทำการถอนสว่านขึ้นเพื่อก่อตัวเป็นรูปเสาเข็ม ต่อมาเสาเข็มชนิดนี้ได้เลิกกิจการไป เนื่องจากพบว่ามีความลำบากในการควบคุมความเร็วในการถอนสว่านให้สัมพันธ์กับความเร็วในการอัดน้ำปูน PREPAC หากอัตราการถอนกับการอัดไม่สัมพันธ์กัน เสาเข็มจะคอดหรือขาดได้

เสาเข็มระบบนี้ปัจจุบันในยุโรปยังใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย แต่ได้พัฒนาไปจนใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการถอนสว่านและอัดน้ำปูนหรือคอนกรีต ในยุโรปจะเรียกเสาเข็มชนิดนี้ว่า CFA PILE (CONTINUOUS FLIGHT AUGER PILE) รูปเครื่องมือและขั้นตอนการผลิตของ CFA PILE ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 รูปเครื่องมือทำเสาเข็มระบบแห้ง แบบ CONTINUOUS FLIGHT AUGER (รูปบนขวามือ)



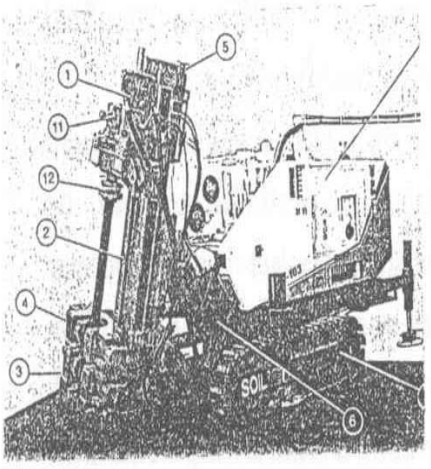
รูปที่ 6 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบ CONTINUOUS FLIGHT AUGER (รูปล่างซ้ายมือ)

2.2 <u>ระบบเสาเข็มเจาะแบบเปียก (WET PROCESS)</u>

<u>2.1 ระบบเสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียก (WET PROCESS)</u>

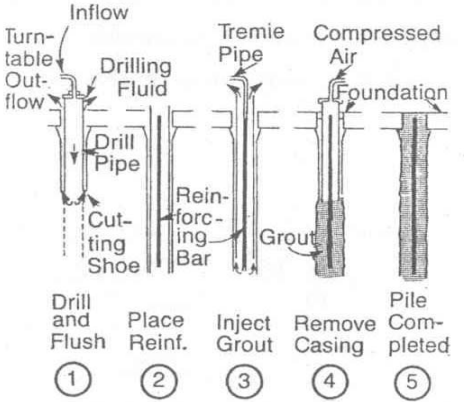
เสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียก โดยทั่วไปจะเป็นเสาเข็มที่เจาะให้ปลายของเสาเข็มหยั่งลงในชั้นทรายแน่น ซึ่งในชั้นดินทราย รูเจาะจะไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ในสภาพการเจาะแห้ง ดังนั้นการเจาะแบบวิธีนี้จะต้องใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นตัวช่วยต้านมิให้ผนังหลุมเจาะเกิดการพังทลาย เสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียกมีทั้งเสาเข็มขนาดเล็กและเสาเข็มขนาดใหญ่ ดังนี้คือ

2.2.1. เสาเข็มเจาะขนาดจิ๋ว (MICRO PILE OR MINI PILE

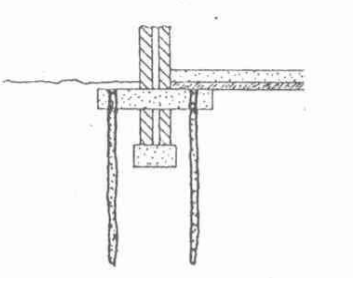


รูปที่ 7 เครื่องมือเจาะเข็ม MICRO PILE

เสาเข็มเจาะขนาดจิ๋วนี้ได้มีผู้นำเข้ามาใช้เป็นครั้งแรกในการซ่อมเสริมฐานรากอาคารศาลาพระเกี้ยวจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิธีการก่อสร้างใช้เครื่องเจาะขนาดเล็ก(คล้ายกับเครื่องเจาะสำรวจดิน) ทำการเจาะดินโดยวิธี WASH OUT จนได้ระดับที่ต้องการแล้วลงเหล็กเสริม (บางครั้งก็ใช้ท่อเหล็กหนาแทนเหล็กเสริม) และทำการอัดฉีดน้ำปูนลงไป (GROUT) ในรูเจาะเพื่อหล่อเป็นรูปเข็ม เสาเข็มชนิดนี้เหมาะกับงานเสริมฐานราก ปัจจุบันยังมีผู้ใช้ซ่อมฐานรากอยู่บ้างประปราย เหตุที่ไม่เป็นที่แพร่หลายเพราะราคาแพง รูปเครื่องมือที่ใช้ขั้นตอนการเจาะ, การเสริมฐานรากแสดงไว้ในรูปที่7, 8 และ9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ขั้นตอนการทำเสาเข็ม MICRO PILE

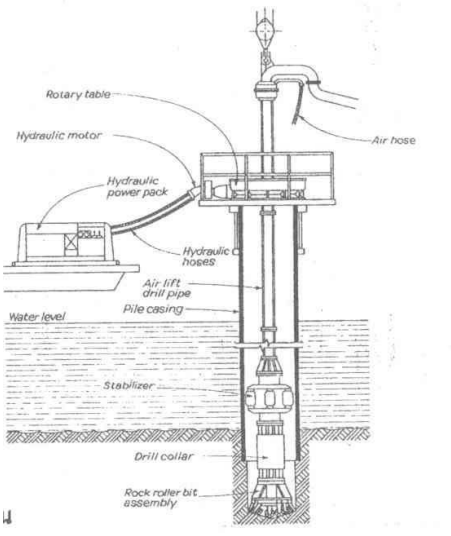


รูปที่ 9 การนำ MICRO PILE ไปใช้ในการเสริมฐานราก

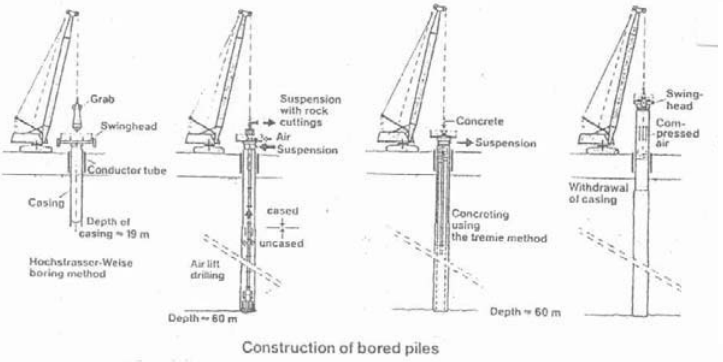
2.2.2 เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเจาะเปียกระบบ REVERSE CIRCULATION

เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบ REVERSE CIRCULATION (R.C.) เป็นระบบที่แพร่หลายใช้กันทั่วโลก เหมาะสำหรับงานก่อสร้างฐานรากในทะเลหรือในแม่น้ำ สะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาหลายแห่งได้ใช้เสาเข็มเจาะระบบนี้ เช่น สะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า, สะพานสมเด็จพระเจ้าตากสินเป็นต้น วิธีการก่อสร้างเริ่มด้วยการปักปลอกเหล็กถาวรจนปลายปลอกเหล็กจมลงในชั้นดินแข็งใต้ท้องแม่น้ำ และดูดน้ำในปลอกเหล็กออก แล้วใช้ GRAB ขุดดินในปลอกเหล็กให้ได้ความลึกเพียงพอที่จะติดตั้งหัวเจาะระบบ R.C. บนปลอกเหล็กขณะที่เครื่อง R.C. หมุนเพื่อกัดเจาะดินให้แตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ ก็จะทำการดูดดินที่แตกตัวผสมกับสารละลายขึ้นทางก้านเจาะ ซึ่งเป็นรูกลวงเพื่อผ่านเข้าเครื่องทำความสะอาด เมื่อระดับสารละลายในปลอกเหล็กลดลง ต้องคอยเติมให้เต็มหลุมตลอดเวลา ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งเจาะกัดดินลงไปจนได้ระดับที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงทำการทำความสะอาดสารละลาย, ลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตผ่านท่อเท (TREMIE PIPE) เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอน ภาพเครื่องเจาะระบบ R.C. และขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปดังแสดงไว้ในรูปที่ 10 และ 11

เสาเข็มเจาะระบบนี้ส่วนมาก จะก่อสร้างให้มีขนาดใหญ่ไม่น้อยกว่า DIA. 1.50 ม. และลึกกว่า 50 เมตร รับน้ำหนักประมาณ 1,000 ตันต่อต้น ระยะเวลาการก่อสร้างแต่ละต้นประมาณ 1 - 2 วัน เสาเข็มเจาะระบบนี้ไม่นิยมใช้กับการก่อสร้างอาคาร เพราะก่อสร้างได้ช้า และการทำความสะอาดสารละลายเบนโทไนท์มีความยุ่งยากมากกว่าระบบอื่นๆ เสาเข็มเจาะระบบ R.C. นี้เหมาะกับงานก่อสร้างสะพานเพราะเครื่องมือมีขนาดเบา เมื่อเทียบกับเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบอื่น เสาเข็มเจาะระบบ R.C. นี้ แม้ปัจจุบันจะไม่พบเห็นบ่อยนัก แต่เมื่อใดมีการก่อสร้างสะพานที่มีคอม่ออยู่ห่างฝั่งมากๆ ก็จะมีผู้นำเข้ามาก่อสร้างเป็นครั้งคราวตามความจำเป็นเท่านั้น



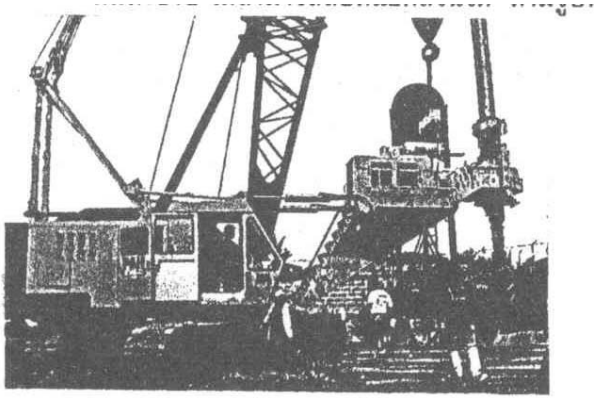
รูปที่ 10 รูปเครื่องมือทำเสาเข็มเจาะระบบ REVERSE CIRCULATION



รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการเจาะเข็มระบบ REVERSE CIRCULATION

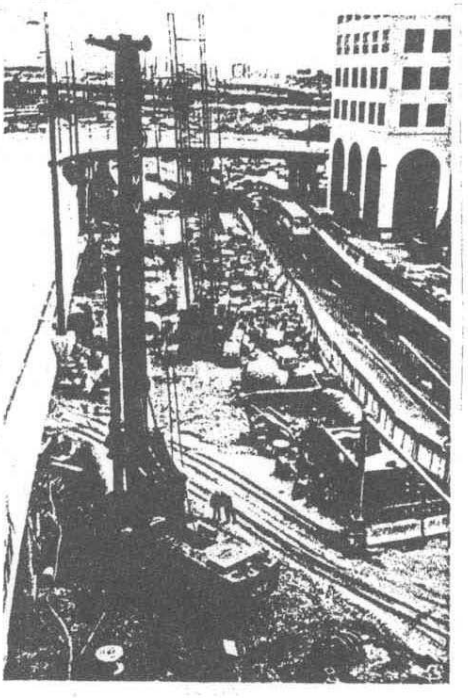
2.2.3.เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเจาะเปียกระบบ ROTARY DRILL (R.D.)

เสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียกระบบ ROTARY DRILL (R.D.) เป็นระบบที่แพร่หลายทั่วโลก การก่อสร้างอาคารสูง สะพานลอย ฯลฯ ในกรุงเทพมหานคร นิยมใช้ระบบเข็มเจาะชนิดนี้มาก ทั้งนี้เพราะสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าเสาเข็มเจาะระบบอื่นๆ อีกสามารภก่อสร้างให้มีขนาดใหญ่และลึก ให้สามารถ รับน้ำหนักได้สูงสุดและคล่องตัวกว่าเสาเข็มเจาะประเภทอื่นๆ เครื่องมือเจาะดินระบบ R.D.นี้จะใช้เครื่องเจาะประเภทROTARY DRILLING RIG ซึ่งมี 2 ประเภทคือ ประเภทแรกเรียกว่า CRANE MOUNTED RIG เป็นการนำหัวเจาะไปติดตั้งบนรถCRANE ตีนตะขาบ ไม่สามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้ ตามรูปที่ 12 และรูปที่ 13 คามลำดับ



รูปที่ 12 เครื่องเจาะ ROTARY DRILL ชนิดแยกส่วนประกอบ

ข้อดีของเครื่องเจาะระบบแยกส่วนได้คือ มีกำลังในการเจาะมากกว่าและสามารถต่อก้านเจาะได้ยาวกว่าแบบไม่แยกส่วน ส่วนเครื่องเจาะแบบไม่แยกส่วนมีข้อดีกว่าแยกส่วน คือ เสียงจะเงียบกว่าและการทำงานคล่องตัวกว่าแบบแยกส่วน



รูปที่ 13 รูปเครื่องเจาะ ROTARY DRILL ชนิดไม่แยกส่วนประกอบ

ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบ R.D. มีดังนี้คือ

ก. ทำการลงปลอกเหล็กชั่วคราวตามตำแหน่งที่จะขุดเจาะเพื่อป้องกันชั้นดินเหนียวอ่อน ปกติใช้ยาวประมาณ 15.00 ม.

ข. ขุดเจาะดินภายในปลอกเหล็กโดยใช้สว่านเป็นตัวเจาะจนถึงระดับก่อนพบชั้นทรายชั้นแรกปกติจะลึกประมาณ 21.00 ม.

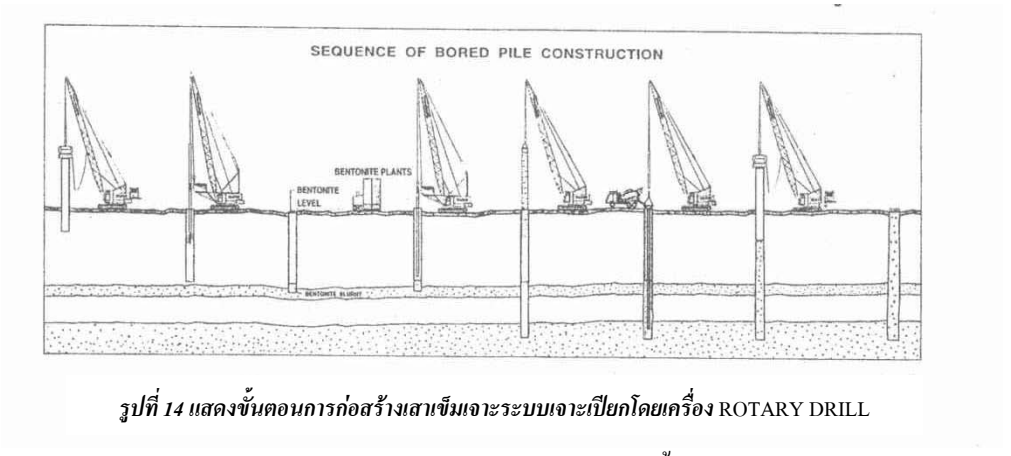
ค. เติมสารละลายเบนโทไนท์ ลงในหลุมเจาะเพื่อต้านแรงดันผนังหลุมเจาะมิให้พังทลาย

ง. ทำการเจาะต่อใต้สารละลายเบนโทไนท์ โดยใช้หัวเจาะแบบถัง(BUCKET)

จ. เมื่อเจาะจนได้ระดับแล้ว ทำความสะอาดก้นหลุมและลงเหล็กเสริมเสาเข็ม

ฉ. เทคอนกรีตผ่านท่อเท (TREMIE)จนได้ระดับที่ต้องการ

ช. ขั้นตอนสุดท้ายทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออก ขั้นตอนการเจาะดังรูปที่14



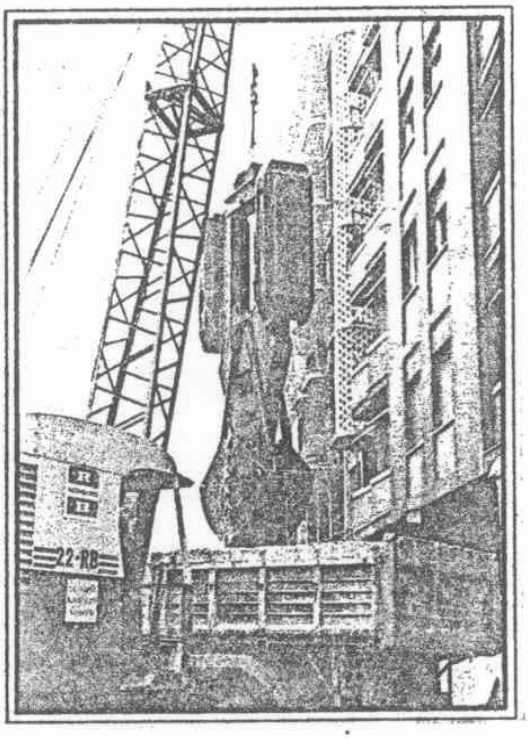
รูปที่ 14 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียกโดยเครื่อง ROTARY DRILL

เสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียกระบบ R.D. นี้ในกรุงเทพมหานครจะใช้กันแพร่หลายอยู่ 4 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซ.ม. , 100 ซ.ม., 120 ซ.ม., และ 150 ซ.ม. ความลึกตั้งแต่ 40 – 70 เมตร ในบางโครงการมีการเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ถึง 180 ซ.ม. โดยทั่วไปเสาเข็มระบบนี้จะออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 300 - 1000 ตัน ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มเจาะและความลึกปลายเสาเข็ม

2.2.4 เสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียกรูปสี่เหลี่ยม

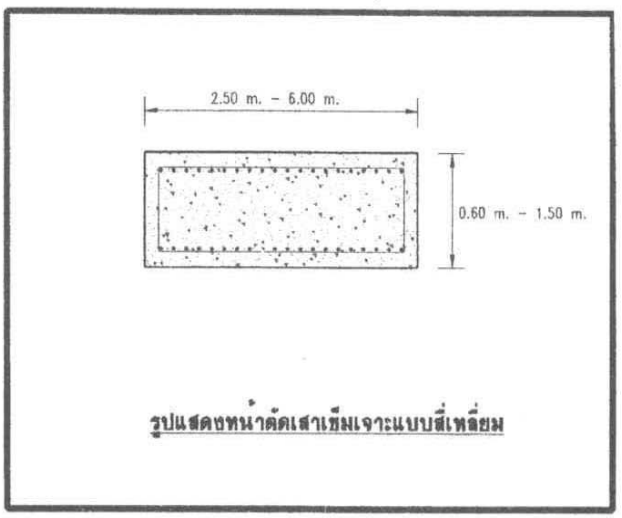
ในบางโครงการที่มีการคำนวณฐานรากแล้วพบว่าเสาเข็มบางตำแหน่งต้องรับน้ำหนักสูงมาก ไม่สามารถจัดกลุ่มเสาเข็มเจาะรูปทรงกลมลงไปได้ จึงได้มีการกำหนดให้ใช้เสาเข็มเจาะรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถก่อสร้างให้มีเส้นรอบรูปและพื้นที่หน้าตัดมากกว่า เสาเข็มเจาะรูปทรงกลม และสามารถ ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกต่อต้นได้สูงกว่า 1000 ตัน

เสาเข็มเจาะรูปเหลี่ยมได้มีการก่อสร้างในยุโรปและทวีปอเมริกามานานแล้ว และเพิ่งเข้ามามีบทบาทในการก่อสร้างในกรุงเทพมหานคร ประมาณ 4-5 ปีก่อน ในประเทศฝรั่งเศสจะเรียกเข็มประเภทนี้ว่า BARRETTE ในยุโรปประเทศอื่น นอกเหนือจากประเทศฝรั่งเศสจะเรียกว่า STRIP PILE ส่วนในประเทศสหรัฐอเมริกาจะเรียกว่า LOAD BEARING ELEMENT (L.B.E.) ส่วนในประเทศไทย บางครั้งก็เรียกกันว่าเสาเข็มเจาะรูปสี่เหลี่ยม หรือบางครั้งก็เรียกทับศัพท์ตามในยุโรป การเจาะเสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียกรูปสี่เหลี่ยมจะใช้เครื่องมือสำหรับเจาะกำแพง DIAPHRAGM WALL เป็นหัวเจาะ (รูปที่ 15) ขั้นตอนการเจาะคล้ายคลึงกับการเจาะเสาเข็มรูปทรงกลมแบบเจาะเปียก มีส่วนแตกต่างเพียงการเจาะเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมไม่มีการลงปลอกเหล็กชั่วคราว แต่จะก่อสร้างคอกคอรกรีตเสริมเหล็กให้ได้รูปเสาเข็มตรงตำแหน่งที่จะขุด เจาะแล้วทำการเจาะใต้สารละลายเบนโทไนท์ตั้งแต่ขั้นตอนแรก



รูปที่ 15 แสดงเครื่องมือเจาะเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยม

เสาเข็มเจาะรูปทรงสี่เหลี่ยมนี้สามารถเจาะให้มีขนาดหน้าตัดกว้างตั้งแต่ 60 ซ.ม. , 80ซ.ม. , 100 ซ.ม., 120 ซ.ม. และ 150 ซ.ม. และยาวตั้งแต่ 2.50 ม. ถึง 6.00 ม. (รูปที่ 16) และความลึกสามารถเจาะได้ประมาณ 60 เมตร เสาเข็มเจาะประเภทนี้ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก เพราะมีราคาแพงและระยะเวลาการก่อสร้างของเสาเข็มลึก 60 เมตร ใช้เวลาประมาณ 36 ชม. ต่อต้น ปัจจุบันจะเลือกใช้เฉพาะจุดที่ไม่สามารถสร้างเสาเข็มเจาะแบบทรงกลมได้เท่านั้น ในโครงการที่ผ่านมาที่ใช้เสาเข็มเจาะชนิดนี้ จะใช้ขนาด 80 x 270 ซ.ม. และ 100 x 270 ซ.ม. ลึกประมาณ 60.00 เมตร น้ำหนักบรรทุกออกแบบตั้งแต่ 1100-1350 ตันต่อต้น



รูปที่ 16 แสดงหน้าตัดเสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม

3. เสาเข็มเจาะอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม(BASED GROUTED BORED PILE)

เนื่องจากวิธีการเจาะเสาเข็มเจาะระบบใดก็ตามจะมีผลทำให้ดินใต้ปลายเสาเข็มมีค่าการรับน้ำหนักแบกทาน(BEARING RESISTANT) ลดลง เนื่องจากสาเหตุสองประการคือ

ก.) การขุดเจาะดินเท่ากับเป็นการลด OVERBURDEN PRESSURE ของชั้นดินทราย ทำให้เกิด STRESS RELIEF ในชั้นทรายระดับใต้หลุมที่เจาะ ทำให้ค่าการรับน้ำหนักของชั้นทรายลดลงและมีค่าทรุดตัวมากกว่าปกติ เมื่อรับน้ำหนัก

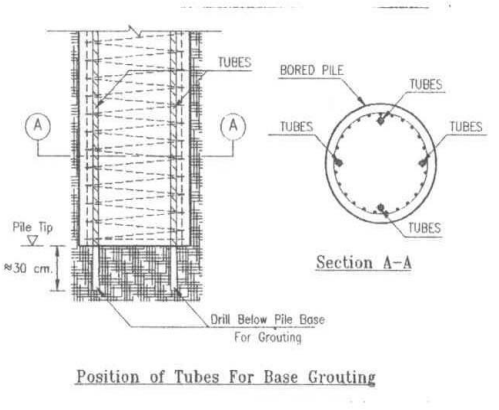
ข.) ดินทรายก้นหลุมเจาะอาจาจะถูกกระทบกระเทือน (DISTURBED)จากวิธีการเจาะหรืออาจมีตะกอนดินจากการเจาะตกค้างอยู่ที่ก้นหลุม ทำให้กำลังแบกทานของดินที่ระดับปลายเสาเข็มลดลงจากธรรมชาติ

ปัญหาอันเกิดจากสาเหตุข้างต้นจะสามารถลดลงได้มากหากทำการเจาะและทำความสะอาดก้นหลุมด้วยความระมัดระวังด้วยความชำนาญ อย่างไรก็ดีแม้ว่าจะระวังและทำด้วยความชำนาญเพียงใดก็ตาม ในการปฏิบัติงานในสนามก็ไม่สามรถลดปัญหาลงได้ทั้งหมด ดังนั้นในการออกแบบเสาเข็มเจาะระบบเปียก ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทรายแน่น จึงมักจะคิดคำนวณ ค่าแบกทานประลัยของชั้นทรายไม่เกิน 300 - 500 ตัน ต่อตารางเมตร ทั้งที่คำนวณค่าแบกทานประลัยโดยวิธี EFFECTIVE STRESS จะได้ค่าแบกทานประลัยประมาณ 800-1000 ตัน ต่อตารางเมตรก็ตาม

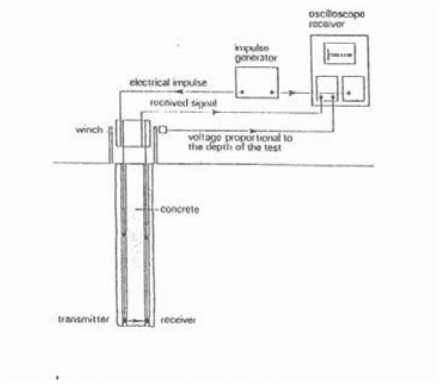
ด้วยเหตุนี้ระบบอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มจึงเป็นวิธีการที่จะสามารถลดปัญหาดังกล่าวข้างต้นลงได้ การอัดฉีดน้ำปูนจะทำให้เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักมากขึ้น และลดค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบพบว่าค่าการทรุดตัวของเสาเข็มไม่ต่างกับเสาเข็มที่ไม่ได้อัดฉีดปูนมากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบน้ำหนักทั้งหมดถูกรับโดยแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินข้างเข็มทั้งหมด โดยน้ำหนักยังถ่ายลงไปไม่ถึงชั้นดินปลายเสาเข็ม

วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ทำกันอยู่มีอยู่หลายวิธีคือ

ก) แบบฝังท่อเหล็กในตัวเสาเข็มและเจาะดินใต้ปลายเสาเข็มผ่านท่อที่ฝังไว้ลงไปประมาณ 30 ซ.ม. นำ PACKER หย่อนผ่านท่อเหล็กลงไปในรูที่เจาะเตรียมไว้ใต้ปลายเสาเข็ม และอัดน้ำปูนผ่าน PACKER การฝังท่อเหล็กอาจฝัง 2, 3หรือ 4 ท่อ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (รูปที่ 17) อัดฉีดน้ำปูนโดยฝังท่อเหล็กนี้มักจะทำควบคู่ไปกับการทำ CROSS HOLE ULTRASONIC TESTING เพราะสามารถส่ง SENSOR ผ่านท่อที่ฝังไว้เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของตัวเสาเข็มได้ทุกระดับ(รูปที่ 18)

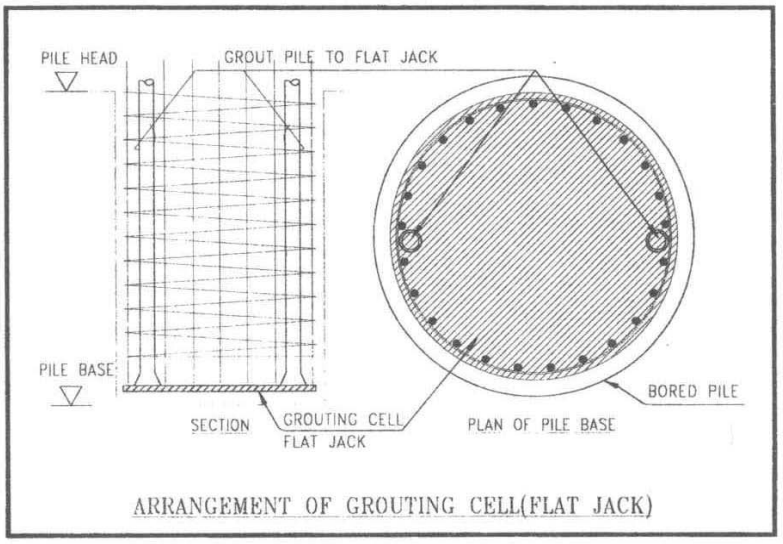


รูปที่ 17 รูปแสดงตำแหน่งท่อสำหรับอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม



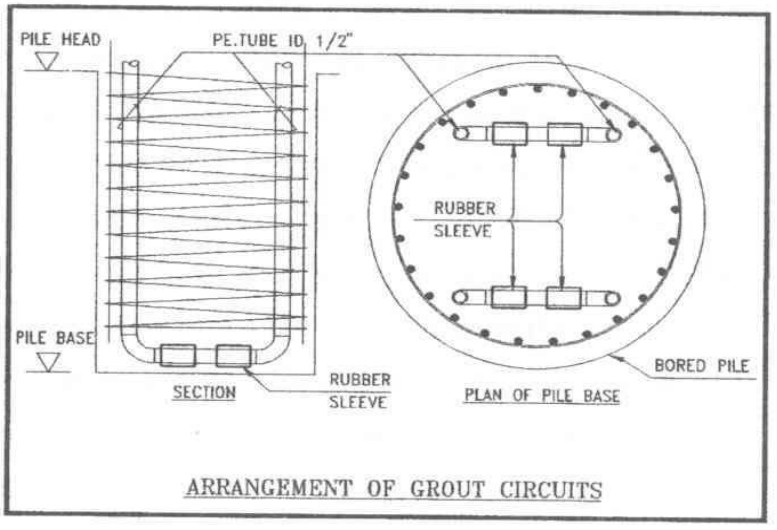
รูปที่ 18 รูปแสดงการทดสอบ CROSS- HOLE ULTRASONIC ผ่านท่ออัดฉีดน้ำปูน

ข) การอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มโดยติดตั้ง GROUTING CELL (FLAT-JECK) GROUTING CELL จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดของเสาเข็มหุ้มด้วยแผ่นยางที่ด้านล่าง การติดตั้งจะผูกติดกับปลายโครงเหล็กเสริมหย่อนลงจนถึงก้นรูเจาะและที่ด้านบนของ GROUTING CELL จะต่อด้วยท่อผูกติดโครงเหล็กขึ้นมาบนหัวเสาเข็ม การอัดฉีดน้ำปูนจะอัดฉีดผ่านท่อเข้าไปใน GROUTING CELL เพื่อให้แผ่นยางขยายตัวดันชั้นทรายหรือตะกอนใต้ปลายเสาเข็มให้แน่นเมื่ออัดฉีดหถึงความดันระดับหนึ่ง แผ่นยางจะแตกให้น้ำปูนไหลแทรกตัวเข้าในชั้นทรายที่ระดับปลายเสาเข็มและแข็งตัว ทำให้ทรายที่ปลายเสาเข็มแน่นตัว อุปกรณ์ GROUTING CELL ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 รูปแสดงตำแหน่ง GROUTING CELL

ค) การอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มโดยติดตั้งท่อระบบ NONE RETURN VALVE ซึ่งมีชื่อเรียกว่าระบบ TUBE-A-MANCHETTES ไว้ที่ปลายเสาเข็มรูปตัวยู (U) (รูปที่ 20) การติดตั้งโดยทั่วไปจะติดตั้ง 2 ชุด (2 CIRCUITES) และที่ปลายของ TUBE – A - MANCHETTES จะต่อด้วยท่อยางรับแรงดันสูงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ขึ้นมาถึงระดับพื้นดิน การอัดฉีดน้ำปูนจะอัดฉีดผ่านท่อยางด้วยแรงดันจาก GROUTING PUMP ทำให้ NONE RETURN VALVE ขยายตัวให้น้ำปูนไหลออกที่ปลายเสาเข็มผสมกับชั้นทรายใต้เสาเข็ม



รูปที่ 20 แสดงตำแหน่งท่ออัดฉีดน้ำปูนระบบ TUBE-A- MANCHETTE

การอัดฉีดน้ำปูนได้มีผู้นำเข้ามาใช้ 3 แบบ ส่วนผู้เขียนมีความคุ้นเคยกับแบบสุดท้ายคือระบบ TUBE-A-MANCHETTES เนื่องจากได้มีโอกาสใช้ระบบนี้อยู่หลายโครงดารรวมเสาเข็มที่ผู้เขียนได้ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยระบบนี้มาประมาณ 3500 ต้น จึงจะกล่าวถึงเฉพาะเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายโดยระบบ TUBE-A-MANCHETTES ถึงวิธีการอัดฉีด, ปัญหาในการทำงานและประสิทธิภาพของเสาเข็มหลังการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

4. การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยระบบ TUBE-A-MANCHETTES

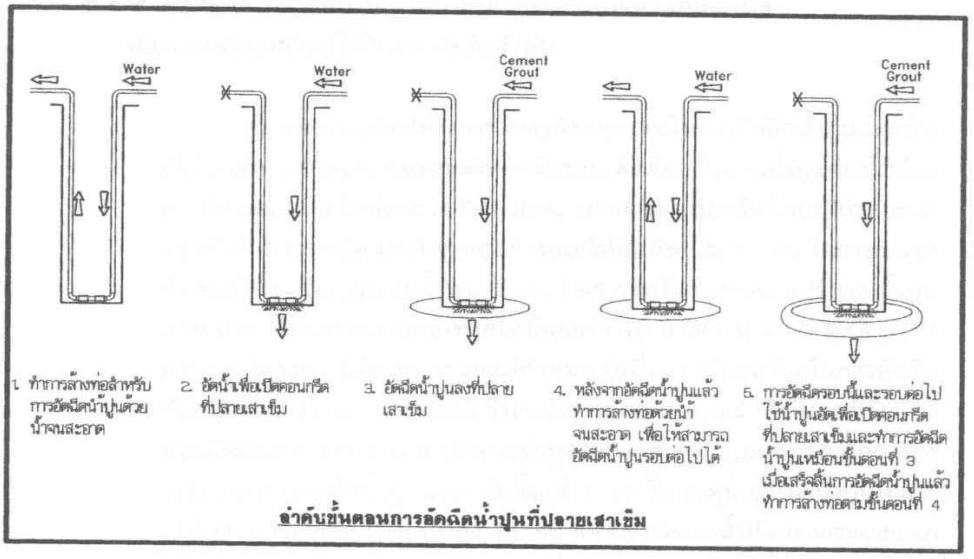
4.1 จำนวนรอบของการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยระบบนี้ สามารถทำการอัดฉีดได้หลายครั้ง (MULTI-STAGES) กล่าวคือ ในบางโครงการกำหนดให้อัดฉีดครั้งเดียว บางโครงการกำหนดให้อัดฉีดซ้ำ 2 ครั้ง หรือมากกว่า

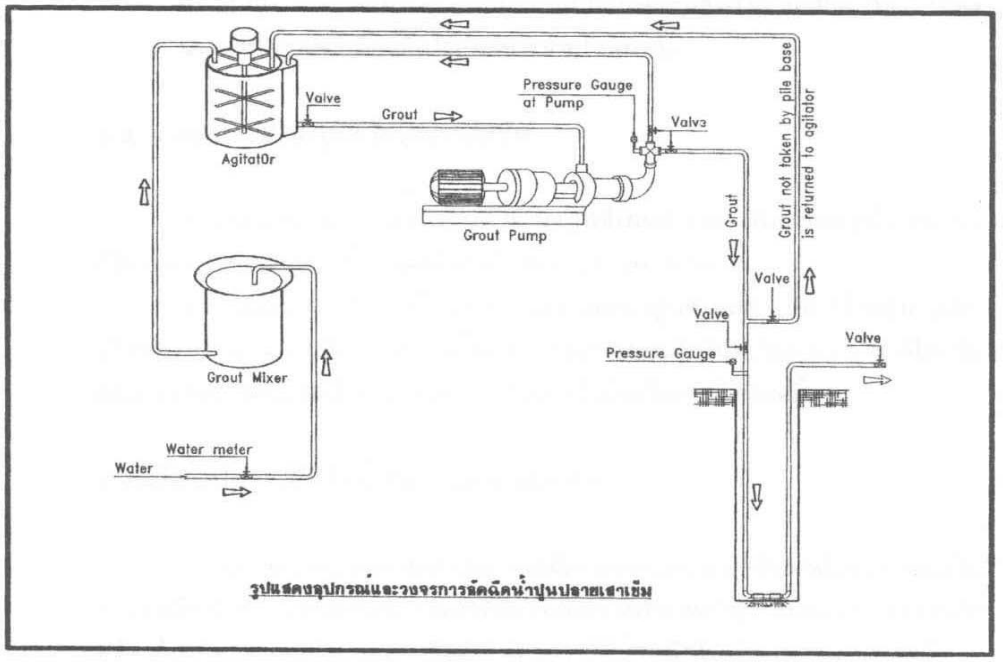
4.2 วิธีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม

ทำการติดตั้ง CIRCUITS สำหรับการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายโครงเหล็กเสริมและหย่อนให้ใกล้ก้นหลุมเจาะ (ห่างก้นหลุมไม่ควรเกิน 15 ซ.ม.) เมื่อทำการเทคอนกรีตเสร็จแล้วปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 12 - 24 ช.ม. หลังเทคอนกรีตเสร็จ) ทำการล้างท่อทั้งระบบโดย FLUSH น้ำสะอาดเข้าไปในปลายท่อด้านหนึ่งและให้ไหลออกมาอีกด้านหนึ่งจนแน่ใจว่าท่อสะอาดทั้งระบบแล้ว จึงทำการปิดปลายท่อด้านหนึ่งและอัดน้ำสะอาดเข้าไปในระบบเพื่อให้ VALVE ที่ TUBE-A-MANCHETTES เปิดเพื่อให้แรงดันของน้ำเปิดหน้าคอนกรีตที่ปลายเสาเข็ม โดยทั่วไปคอนกรีตปลายเสาเข็มที่มีอายุ 24 ช.ม. จะถูกอัดให้ผิวร้าวที่แรงดันประมาณ 10 - 25 BARS เมื่อคอนกรีตปลายเสาเข็มถูกเปิดแล้วทำการเปิดปลายท่อยางด้านหนึ่งความดันจะลดเหลือศูนย์ VALVE ที่ TUBE-A-MANCHETTES จะปิดทำให้น้ำใต้ดินจะย้อนกลับเข้ามาในระบบไม่ได้

หลังจากนั้น ทำการอัดน้ำปูนที่ผสมไว้แล้วเข้าไปในปลายท่อด้านหนึ่ง เพื่อดันให้น้ำสะอาดที่ค้างอยู่ในท่อไหลออกที่ปลายท่อเปิดอีกด้านหนึ่งจนหมด แล้วจึงทำการปิดปลายท่อฝั่งที่ให้น้ำไหลออกมา ทำการอัดฉีดน้ำปูนด้วยอัตราประมาณ 5 - 10 ลิตร ต่อ นาที โดยต่อเนื่อง ปริมาณน้ำปูนที่อัดเพิ่มเข้าไปตลอดเวลาจะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นๆ ทุกขณะเมื่อการอัดฉีดน้ำปูนดำเนินไปจนครบปริมาณที่กำหนดหรือได้แรงดันตามที่กำหนดไว้ ก็เป็นการจบกระบวนการของการอัดฉีดแต่ละรอบ (STAGE) ต่อจากนั้นก็ทำการล้างท่ออีกครั้งโดย FLUSH น้ำสะอาดเข้าไปไล่น้ำปูนที่ค้างอยู่ในท่อออกให้หมด เพื่อให้ทั้งระบบสามารถนำมาใช้อัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มรอบใหม่ได้อีก (ถ้าต้องการอัดฉีดซ้ำ) ในกรณีที่มีการอัดฉีดซ้ำ ให้เริ่มต้นเหมือนขั้นตอนของการอัดฉีดรอบแรกคือ เปิดผิวคอนกรีตปลายเสาเข็มใหม่ หลังจากอัดฉีดรอบแรกเสร็จไปแล้วประมาณ 12 - 24 ช.ม. ลำดับขั้นตอนการอัดฉีดน้ำปูนตามรูปที่ 21 และ แผนผังอุปกรณ์ และวงจรการอัดฉีดน้ำปูนตามรูปที่ 22



รูปที่ 21 ลำดับขั้นตอนการอัดฉีดน้ำปูน



รูปที่ 22 รูปแสดงอุปกรณ์และวงจรการอัดฉีดน้ำปูน

4.3 ข้อกำหนดจำนวนรอบในการอัดฉีดน้ำปูน ปริมาณน้ำปูนที่อัดฉีด และแรงดันสุดท้ายที่ ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูน

ผู้ออกแบบแต่ละโครงการมีการกำหนดรอบในการอัดฉีดน้ำปูนแตกต่างกันไป เช่น บางโครงการกำหนดให้อัดฉีดรอบเดียวโดยปริมาณน้ำปูนต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดเช่น ไม่น้อยกว่า 500 ลิตร, 1000 ลิตร เป็นต้น โดยไม่กำหนดค่าแรงดันในการอัดฉีด บางโครงการกำหนดให้อัดฉีดเป็น 2 ร อบ โดยรอบแรกกำหนดให้อัดฉีดปริมาณน้ำปูน 1000 ลิตร รอบที่สองกำหนดปริมาณน้ำปูน 500 ลิตร ส่วนค่าแรงดันสุดท้ายไม่น้อยกว่า 40 BARS บ้าง 60 BARS บ้าง ส่วนบางโครงการไม่กำหนดรอบ แต่กำหนดว่าเมื่อแรงดันสุดท้ายในการอัดฉีดต้องไม่น้อยกว่า 40 - 60 BARS จึงถือว่าการอัดฉีดน้ำปูนสมบูรณ์ ซึ่งในกรณีนี้พบว่าต้องอัดฉีดมากกว่า 3 รอบ ปริมาณน้ำปูนใช้มากตั้งแต่ 3000 - 10000 ลิตร ระยะเวลาการอัดฉีดน้ำปูนแต่ละต้นตั้งแต่ 3 - 10 วัน เหตุที่ปริมาณน้ำปูนใช้มากเข้าใจว่า การที่จะได้แรงดันสูงถึง 40 - 60 BARS ปริมาณน้ำปูนต้องกระจายออกเป็นบริเวณกว้างกว่าปลายเสาเข็มมาก ซึ่งต่อมาพบว่าเมื่อทำการเจาะเข็มต้นต่อไปที่ระยะ 10 - 15 เมตร ห่างจากต้นที่ได้อัดฉีดน้ำปูนด้วยปริมาณมากๆ และมีค่าแรงดันสูงระหว่างเจาะจะพบชั้นทรายที่มีลักษณะแข็งตัว (CEMENTED) เนื่องจากน้ำปูนของต้นที่อัดฉีดไว้ก่อนกระจายไหลมาถึง

4.4 ส่วนผสมของน้ำปูนที่ใช้ในการอัดฉีด

ส่วนผสมของน้ำปูนประกอบด้วย ผงปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม ต่อน้ำ 50-55 กิโลกรัม และมีอัตราส่วนน้ำต่อผงซีเมนต์ (W/C) 0.50-0.55

การผสมแต่ละครั้งเมื่อใช้น้ำ 55 ลิตร และผงปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม จะได้ปริมาตรประมาณ 90 ลิตร ในบางครั้งจะมีการผสมผงเบนโทไนท์ประมาณ 1-2 กิโลกรัม ต่อการผสมข้างต้นเพิ่มเข้าไปด้วยเพื่อให้เกิดการลื่นไหลในการอัดฉีดดีขึ้น

4.5 ปัญหาในการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มเจาะ

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม หากมีการเตรียมการไม่พร้อม หรือข้อกำหนดในการอัดฉีดน้ำปูนไม่เหมาะสม อาจทำให้การก่อสร้างประสบปัญหาทั้งระยะเวลาการก่อสร้างต้องยืดยาวออกไป และ/หรือ ทำให้ค่าการรับน้ำหนักไม่เป็นตามที่หวัง ปัญหาในการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มสามารถสรุปสาเหตุที่ทำให้เกิดได้เป็นหัวข้อสองหัวข้อดังนี้คือ

ก) เกิดจากข้อกำหนดในรายการก่อสร้าง

เนื่องจากการอัดฉีดน้ำปูนจะอัดฉีดรอบแรกได้หลังจากหล่อเสาเข็มเสร็จแล้วประมาณ 1 วัน และรอบหลังๆ จะอัดฉีดซ้ำได้หลังจาก 12 ช.ม. ของรอบก่อนๆ ผ่านไปแล้ว ในบางโครงการซึ่งกำหนดให้อัดฉีดหลายรอบและกำหนดค่าแรงดันสุดท้ายสูงประมาณ 60 BARS จะพบว่าต้องอัดฉีดน้ำปูนมากกว่า 3 รอบ ซึ่งต้องใช้เวลาการอัดฉีดน้ำปูนแต่ละต้นถึง 3 - 4 วัน บางต้นอาจถึง 10 วัน และน้ำปูนที่ใช้ในการอัดฉีดมีปริมาณมากเกินไปการอัดด้วยแรงดันสูงอาจทำให้เกิด HYDROFRACTURE ในชั้นทราย น้ำปูนกระจายไปโดยทั่วบริเวณ มิได้อยู่เฉพาะบริเวณปลายเสาเข็ม หรือน้ำปูนอาจย้อนขึ้นมาข้างตัวเสาเข็ม จากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่าการอัดฉีด 1 – 2 รอบ โดยกำหนดปริมาณน้ำปูนประมาณ 1000 ลิตรต่อนาที และอัดด้วยแรงดันต่ำในอัตราการอัดฉีดประมาณ 5 - 10 ลิตรต่อนาที ผลการทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มให้ผลเป็นที่น่าพอใจและระยะเวลาในการก่อสร้างไม่ยาวจนเกินไป ส่วนการอัดฉีดหลายรอบโดยกำหนดค่าแรงดันสูง แม้ว่าจะให้ค่าการรับน้ำหนักสูงขึ้นไปอีกเล็กน้อย แต่ระยะเวลาการทำงานยาวขึ้นมากถึง 2 เท่าเป็นอย่างน้อย

ข) เกิดจากความผิดพลาดในการเตรียมงาน

การอัดฉีดน้ำปูนหากมีการติดตั้งระบบ CIRCUITS ไม่ดี เช่นวาง TUBE-A-MANCHETTES สูงเกินไปทำให้น้ำไม่สามารถ CRACK ปลายเสาเข็มได้หรือเกิดการรั่ว หรืออุดตันของท่อสำหรับอัดฉีดน้ำปูน ทำให้การอัดฉีดน้ำปูนกระทำไม่ได้ ทำให้เสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักตามที่คาดหมายไว้

ปัญหาที่เกิดจากข้อผิดพลาดข้างต้นนี้ ในช่วงแรก ๆ ที่ผู้เขียนได้เริ่มทำเสาเข็มระบบนี้พบว่า มีการผิดพลาดอยู่ประมาณ 2 – 3 % ของปริมาณเสาเข็มที่จะอัดฉีดน้ำปูน และปัญหานี้สามารถลดลงเหลือศูนย์ได้ด้วยความชำนาญและการเพิ่มความระมัดระวัง โดยเมื่อติดตั้งระบบ CIRCUITS เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก่อนเทคอนกรีตเสาเข็มควรทำการ FLUSH น้ำเข้าไปในระบบ CIRCUITS ก่อน เพื่อตรวจสอบหารอยรั่วและเศษผงอุดตันในระบบและส่วนผสมของน้ำปูนที่จะอัดฉีดต้องมีความข้นเหลวพอเหมาะที่จะไม่ทำให้เกิดการแข็งตัวอุดตันในระหว่างการอัดฉีด

4.6 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

ผู้เขียนได้ทำการทดสอบเสาเข็มเจาะอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย (BASE GROUTED) โดยอัดฉีดรอบเดียว (SINGLE STAGE) อัดฉีด 2 รอบ (TWO STAGE) และ 3 รอบ หรือมากกว่านั้น (MULTI STAGES) เปรียบเทียบกับเสาเข็มเจาะธรรมดาที่ไม่ได้อัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย (NON BASED GROUTED) ภายในหน่วยงานเดียวกันอยู่หลายโครงการ ซึ่งพบว่าเสาเข็มเจาะที่ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายทุกโครงการ

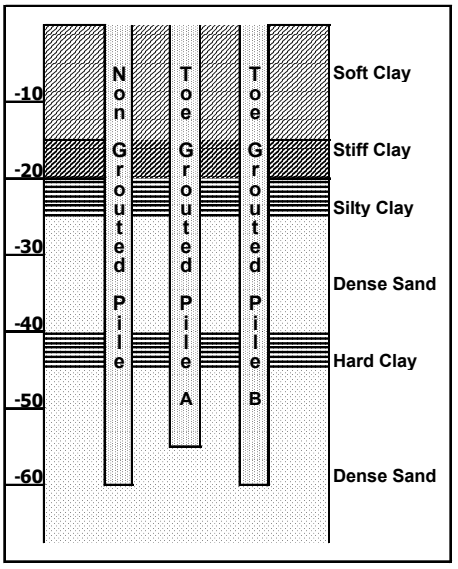
การรับน้ำหนักทดสอบได้สูงกว่าและมีการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุดน้อยกว่าเสาเข็มที่ไม่ได้อัดฉีดน้ำปูนมาก

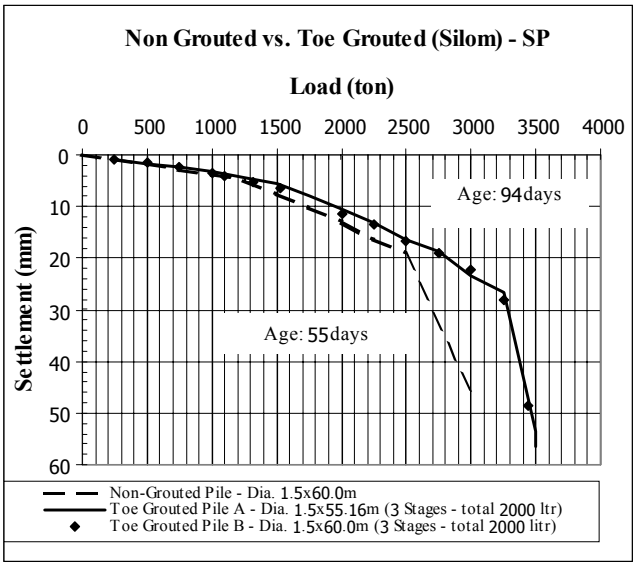
4.6.1 หน่วยงาน SP บริเวณปลายถนนสีลม

ประกอบด้วย เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. สึก 55 ม. จำนวน 500 ต้น เศษ ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มทุกต้น ก่อนเริ่มโครงการได้ทำการทดสอบเสาเข็มธรรมดา (NON GROUTED) ลึก 60 ม. เปรียบเทียบกับเสาเข็มเจาะระบบ BASE GROUTED ลึก 55 ม. และ 60 ม. การอัดฉีดน้ำปูนสำหรับเสาเข็ม BASE GROUTED กำหนดเป็น 3 รอบ รอบแรก 1000 ลิตร รอบที่สอง และรอบที่สาม รอบละ 500 ลิตร โดยมีข้อกำหนดเพิ่มเติมว่าค่าแรงดันสุดท้ายต้องได้ 60 BARS จึงถือว่าการอัดฉีดสมบูรณ์ ซึ่งในบางต้น ต้องใช้เวลาในการอัดฉีดน้ำปูนถึง 10 วันมากกว่า 8 รอบ จึงจะได้แรงดันตามต้องการ และปริมาณน้ำปูนบางต้นใช้ถึง 10000 ลิตร

ผลการทดสอบสำหรับเสาเข็ม NON GROUTED เสาเข็มเริ่มใกล้จุดประลัยที่น้ำหนัก 2500 ตันและถึงจุดประลัยที่น้ำหนัก 3000 ตัน โดยมีค่าการทรุดตัวที่จุดใกล้ประลัยเท่ากับ 18 ม.ม. และ 45 ม.ม. ตามลำดับ

ส่วนผลการทดสอบเสาเข็มที่ทำ BASE GROUTED ที่ระดับความลึก 55 และ 60 ม. พบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกันมากคือที่จุดใกล้ประลัยได้ค่าการรับน้ำหนัก 3250 ตัน และเสาเข็มถึงจุดประลัยที่ค่าการรับน้ำหนัก 3500 ตัน โดยมีค่าการทรุดตัวที่จุดใกล้ประลัยและจุดประลัย 28 ม.ม. และ 58 ม.ม. ตามลำดับ ผลการทดสอบเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 23 และต่อมาโครงการนี้ใช้เสาเข็มระบบ BASE GROUTED ที่ระดับความลึกปลายเสาเข็ม 55 เมตร



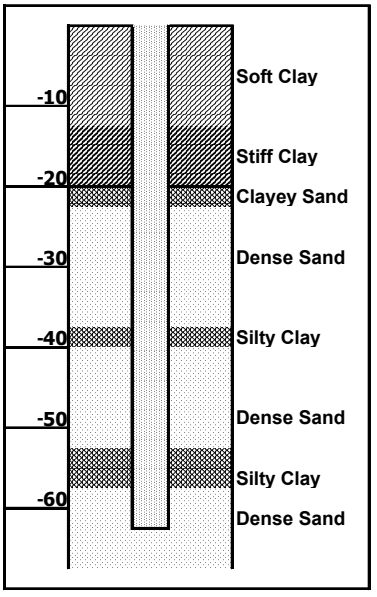


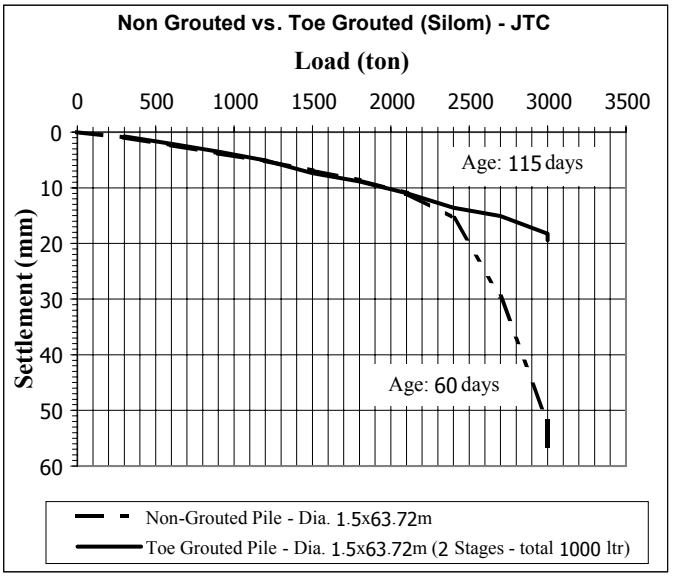
รูปที่ 23 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบของงานหน่วยงาน SP

4.6.2 หน่วยงาน J.T.C. บริเวณถนนสีลม

ประกอบด้วยเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ลึก 60.0 ม. ปริมาณ 300 ตันเศษ ก่อนทำการก่อสร้างเสาเข็มได้ทำการก่อสร้างกลุ่มเข็มทดสอบ NON GROUTED โดยระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบได้ทำการติดตั้งท่อเหล็กเตรียมไว้สำหรับการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มได้ในภายหลัง ผลการทดสอบ NON GROUTED พบว่าเสาเข็มเริ่มถึงจุดใกล้ประลัยเมื่อรับน้ำหนักประมาณ 2500 ตันและถึงจุดประลัยที่น้ำหนัก 3000 ตัน มีค่าการทรุดตัวของทั้งสองจุด 20 ม.ม. และ 55 ม.ม. ตามลำดับ ซึ่งค่าการรับน้ำหนัก และค่าการทรุดตัวของโครงการนี้สำหรับเข็ม NON GROUTED มีค่าใกล้เคียงกับเสาเข็ม NON GROUTED โครงการ SP ตามหัวข้อ 4.6.1

หลังจากทดสอบเสร็จแล้ว ได้ทำการเจาะปลายท่อเหล็กที่อุดไว้ทั้ง 4 ท่อ ออกและเจาะดินใต้ปลายเสาเข็มผ่านท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ลงไปประมาณ 30 - 50 ซ.ม. แล้วทำการอัดฉีดน้ำปูนใต้ปลายเสาเข็มต้นนี้ด้วย PACKER โดยอัดฉีด 2 รอบ รอบแรก 1000 ลิตร รอบที่สอง 500 ลิตร โดยกำหนดแรงดันสุดท้ายในการอัดฉีดเท่ากับ 40 BARS หลังจากนั้นปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 55 วัน ได้ทำการทดสอบซ้ำถึงน้ำหนัก 3000 ตัน เสาเข็มยังไม่ถึงจุดใกล้ประลัย หลังจากแช่น้ำหนัก 3000 ตัน ไว้ 24 ช.ม. ได้ค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 20 ม.ม. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่อัดฉีด 3 รอบ (60 BARS) ในโครงการ SP หัวข้อที่ 4.6.1 ซึ่งน้ำหนัก 3000 ตัน มีค่าการทรุดตัว 25 ม.ม. ผลการทดสอบเปรียบเทียบดังรูปที่ 24



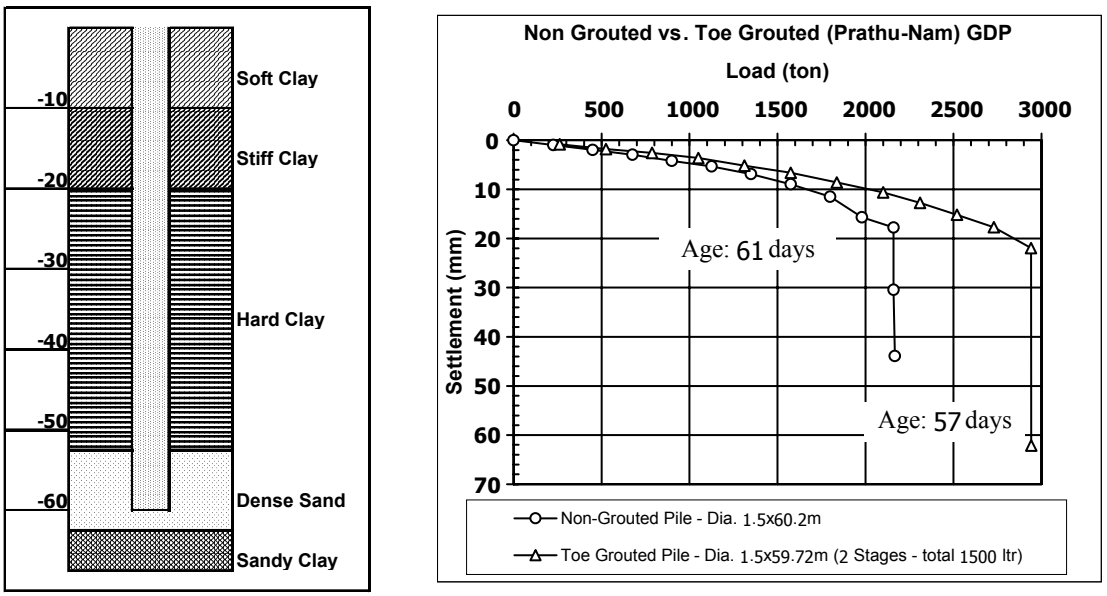


รูปที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบงานหน่วยงาน J.T.C.

4.6.3 หน่วยงาน G.D.P. บริเวณประตูน้ำ (ถนนเพชรบุรี)

ในโครงการนี้ ประกอบด้วยเข็ม NON GROUTED และ BASE GROUTED ได้ทำการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดประลัยทั้งสองต้นโดยเสาเข็มที่ทดสอบทั้งสองต้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ลึกประมาณ 60 ม. อายุเสาเข็มเมื่อทำการทดสอบใกล้เคียงกันมากคือ 57 และ 61 วันตามลำดับ ผลการทดสอบสำหรับเสาเข็ม NONGROUTED เมื่อทดสอบถึงน้ำหนัก 2175 ตัน ได้ค่าการทรุดตัว 18 ม.ม. และได้เกิด PROGRESSIVE SETTLEMENT เมื่อคงน้ำหนัก 2175 ตันไว้ได้เพียง 15 ช.ม. โดยวัดค่าการทรุดตัวหลังเกิด PROGRESSIVE SETTLEMENT ได้เท่ากับ 43 ม.ม.

ส่วนเสาเข็มทดสอบต้นที่ทำ BASE GROUTED 2 รอบโดย รอบแรก 1000 ลิตร รอบสอง 500 ลิตร โดยมีเงื่อนไขว่าการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มจะถือว่าสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อ แรงดันสุดท้ายในการอัดฉีดเท่ากับ 40 BARS หรือ ปริมาณน้ำปูนอัดฉีดรวมได้ไม่น้อยกว่า 1500 ลิตรแล้วแต่อย่างใดจะถึงก่อนกัน จากผลการทดสอบเมื่อขึ้นน้ำหนักทดสอบถึง 2925 ตัน ค่าการทรุดตัวเท่ากับ 21 ม.ม. และไม่สามารถทำการขึ้นน้ำหนักอีกต่อไปได้ เพราะพบว่าหัวเสาเข็มที่ทดสอบเกิดการแตกร้าว จึงหยุดการทดสอบ ผลการทดสอบเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 25

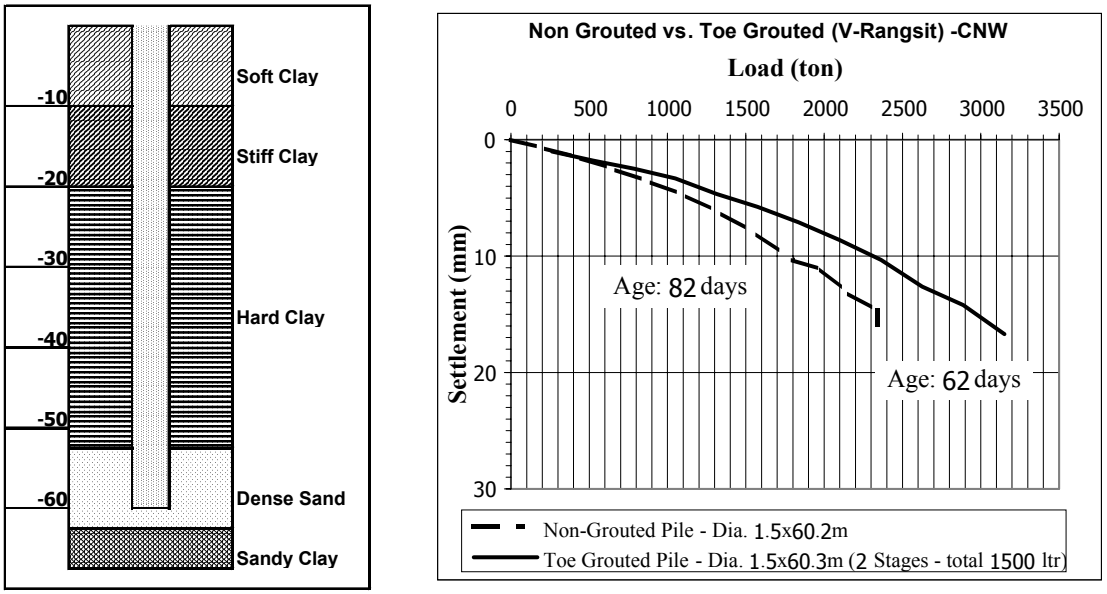


รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบงานหน่วยงาน G.D.P.

4.6.4 หน่วยงาน CNW บริเวณถนนวิภาวดีรังสิตใกล้แยกลาดพร้าว

โครงการนี้ประกอบด้วยเข็ม NON GROUTED และ BASE GROUTED กำหนดให้ทดสอบเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ลึก 60 ม. ทั้งสองแบบ การอัดฉีดน้ำปูนกำหนดเป็นสองรอบ คือ รอบแรก 1000 ลิตร และ รอบสอง 500 ลิตร ใช้แรงดันการอัดฉีดสุดท้ายไม่น้อยกว่า 40 BARS หรือ ปริมาณน้ำปูนรวมไม่น้อยกว่า 1500 ลิตร แล้วแต่อย่างใดจะถึงก่อนกัน เข็มทั้ง 2 ต้นทำการทดสอบไม่ถึงจุดใกล้ประลัย

ผลการทดสอบของเสาเข็ม NON GROUTED ทดสอบที่น้ำหนัก 2325 ตัน และคงน้ำหนักไว้ 24 ช.ม. ได้ค่าการทรุดตัว 16 ม.ม. ส่วนเสาเข็มที่ทำการ BASE GROUTED ทดสอบน้ำหนักที่ 3150 ตัน และคงน้ำหนักไว้ 24 ช.ม. ได้ค่าทรุดตัว 17.5 ม.ม. จากรูปกราฟ LOAD VS SETTLEMENT จะเห็นได้ว่าที่ค่าการทรุดตัวที่เท่ากัน(16 ม.ม.) เสาเข็ม NON GROUTED และ BASE GROUTED จะรับน้ำหนักได้ประมาณ 2300 ตัน และ 3000 ตันตามลำดับ ผลการทดสอบเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 26



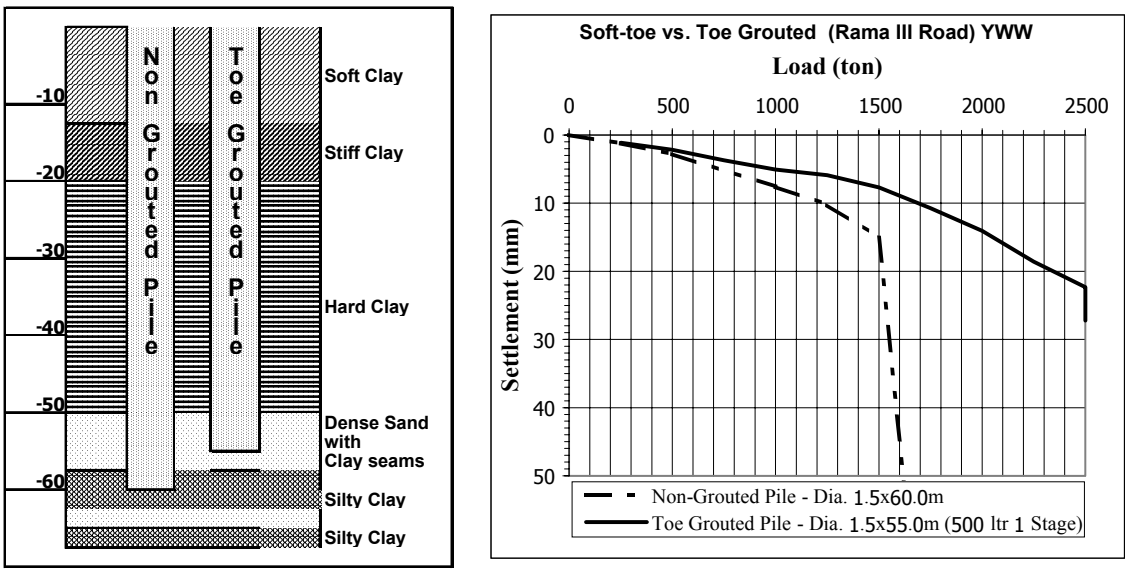
รูปที่ 26 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบงานหน่วยงาน CNW

4.6. 5 หน่วยงาน YWW ถนนพระรามที่ 3 (DIA . 1.50 ม.)

โครงการนี้เป็นงาน TURN KEY PROJECT ของราชการ เสาเข็มออกแบบโดยบริษัทที่ปรึกษาต่างประเทศ บรรทุกปลอดภัย 1000 ตันต่อต้น สำหรับเข็มขนาด DIA. 1.50 ม. และ 500 ตันสำหรับเสาเข้มขนาก 1.00 ม.

ผู้รับเหมาหลักซึ่งเป็นบริษัทต่างประเทศได้ว่าจ้างบริษัทเสาเข็มเจาะรายหนึ่งเข้าทำ PILOT PILE TEST ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ลึก 60 ม. ผลการทดสอบพบว่าเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักถึง 1500 ตัน ค่าการทรุดตัวประมาณ 15 ม.ม. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบนหัวเสาเข็มขึ้นไปอีก ปรากฏว่าเสาเข็มเกิด PROGRESSIVE SETTLEMENT กว่า 50 ม.ม. ที่น้ำหนักประมาณ 1600 ตัน ซึ่งความเห็นของผู้เขียนคาดว่าปลายเสาเข็มต้นนี้ที่ฝังในดินชั้นดินเหนียวแข็งระดับ 60 ม. ในระหว่างก่อสร้างเกิด SOFT TOE ขึ้นทำให้ค่าแบกทานปลายเสาเข็มเป็นศูนย์

ผู้เขียนได้รับการติดต่อให้เสนอระบบเสาเข็มเจาะเพื่อทำงานโครงการนี้แทนและได้เสนอให้ปลายเสาเข็มสั้นลงอยู่ที่ระดับ 55 ม. โดยทำ BASE GROUTED อัดฉีดน้ำปูน 1 รอบ(SINGLE STAGE) โดยใช้ปริมาณน้ำปูนอัดฉีด 500 ลิตรต่อวัน หรือได้แรงดันที่ใช้ในการอัดฉีด 40 BARS แล้วแต่ว่าอย่างใดจะเกิดก่อนกัน ผลการทดสอบของเสาเข็มที่ทำ BASE GROUTED เมื่อทดสอบถึงน้ำหนัก 2500 ตัน และคงน้ำหนักไว้ 24 ช.ม. มีค่าการทรุดตัว 28 ม.ม. ผลการทดสอบเปรียบเทียบตามรูปที่ 27

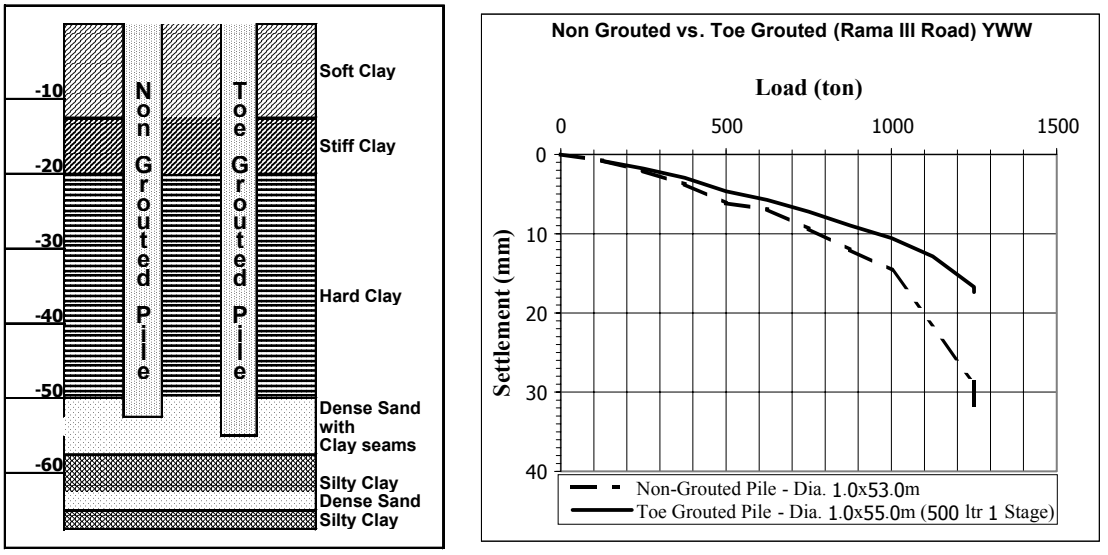


รูปที่ 27 แสดงการทดสอบเปรียบเทียบงานหน่วยงาน YWW ถ.พระราม 3 Dia.1.50 ม.

4.6.5 หน่วยงาน YWW ถนนพระราม 3 (DIA. 1.00 ม.)

หน่วยงานข้างต้นเป็นหน่วยงานเดียวกับหัวข้อ 4.6.5 เมื่อผู้รับเหมาหลักพบว่าเสาเข็ม NON GROUTED ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ปลายเข็มหยั่งในชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับ 60 เมตร รับน้ำหนักไม่ได้ จึงทำการทดสอบเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 ม. ลดปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทราย ผลการทดสอบพบว่า ที่น้ำหนักทดสอบ 1250 ตัน มีค่าการทรุดตัวสูงสุด เมื่อคงน้ำหนักไว้ 24 ช.ม. เท่ากับ 32 ม.ม.

ส่วนผลการทดสอบเสาเข็มระบบ BASE GROUTED ปลายเสาเข็มลึก 55 ม. วิธีการอัดฉีดน้ำปูนเหมือนเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ตามหัวข้อ 4.6.5 เมื่อเพิ่มน้ำหนักถึงน้ำหนักที่ต้องการทดสอบคือ 1250 ตัน และคงน้ำหนักไว้เป็นเวลา 24 ช.ม. มีค่าการทรุดตัว 17.5 ม.ม. ซึ่งค่าการทรุดตัวจะน้อยกว่าเสาเข็ม NON GROUTED อยู่ 14.50 ม.ม.ผลการทดสอบเปรียบเทียบตามรูปที่ 28



รูปที่ 28 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบงานหน่วยงาน YWW ถ. พระราม 3 Dia. 1.00ม.

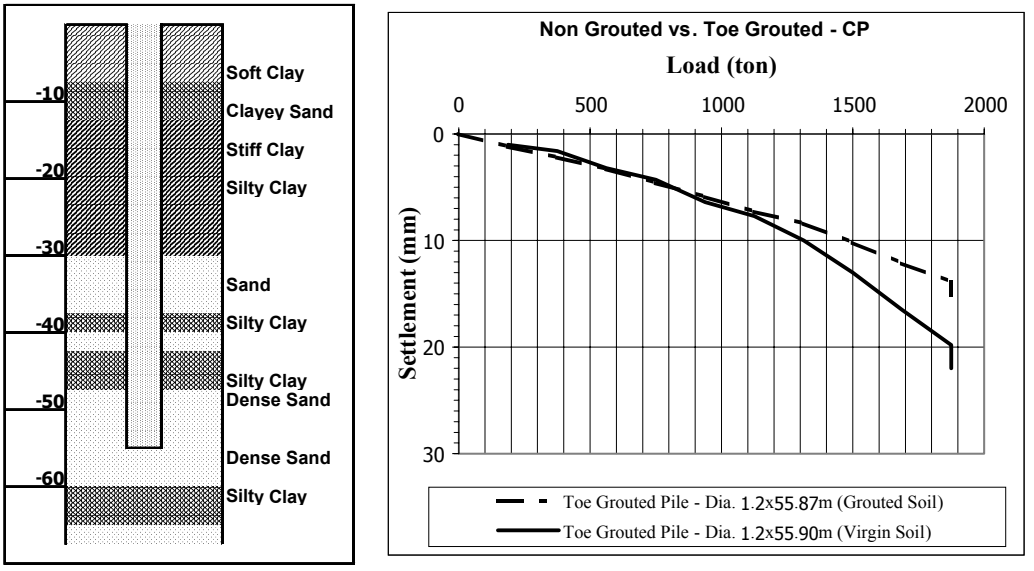
5. กรณีศึกษา

จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าการรับน้ำหนัก และพฤติกรรมของการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะแบบ NON GROUTED และ BASE GROUTED ตามหัวข้อที่ 4 ซึ่งเป็นการทดสอบเปรียบเทียบในชั้นดินเดียวกันและในหน่วยงานเดียวกัน จะเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนว่าเสาเข็มระบบ BASE

GROUTED สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้สูงกว่าระบบ NON GROUTED และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มระบบ BASE GROUTED จะน้อยกว่าระบบ NON GROUTED เมื่อรับน้ำหนักเท่าๆ กัน

นอกจากนั้นผู้เขียนได้เคยพบผลการทดสอบระหว่างเสาเข็มเจาะระบบ BASE GROUTED ด้วยกันเอง ซึ่งก่อสร้างในหน่วยงานเดียวกัน มีพฤติกรรมการทรุดตัวต่างกันเมื่อรับน้ำหนักทดสอบสูงสุดเท่ากัน อันเนื่องมาจากการทำ BASE GROUTED ในชั้นทรายที่ยังไม่เคยมีการอัดฉีดน้ำปูนเข้าไปก่อน กับการทำ BASE GROUTED เข้าไปในชั้นทรายที่มีการอัดฉีดน้ำปูนเข้าไปมากแล้ว

ในหน่วยงาน CP ที่บริเวณถนนตก มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบ BASE GROUTED ประมาณ 500 ต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 ม. ลึก 56 ม. กำหนดให้อัดฉีดน้ำปูนสองรอบ คือ รอบแรก 1000 ลิตร และ รอบที่สอง 500 ลิตร สภาพพื้นที่ก่อสร้างยังไม่เคยมีการทำเสาเข็ม ชนิดใดมาก่อน ผู้ออกแบบกำหนดให้ทำ PILOT PILE TEST จำนวนหนึ่งชุด คือต้นทดสอบ 1 ต้น และเสาสมอ 4 ต้น ทุกต้นทำ BASE GROUTING และทำการทดสอบการรับน้ำหนักที่น้ำหนัก 1875 ตัน (2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 750 ตัน) พบว่าค่าการทรุดตัวที่ 1875 ตัน หลังจากคงน้ำหนักไว้ 24 ช.ม. เท่ากับ 22 ม.ม. หลังจากนั้นได้ทำการก่อสร้าง CONTRACT PILE ตามขั้นตอนข้างต้นต่อไป ในระหว่างการทำงานพบว่า การทำ BASE GROUTED PILE ของเสาเข็มบางต้นอัดฉีดน้ำปูนได้รอบเดียวคือ 1000 ลิตร รอบที่สองอัดฉีดไม่ได้ เนื่องจากท่ออัดฉีดอุดตัน ผู้ออกแบบจึงกำหนดให้ทดสอบเสาเข็มต้นที่มีการอัดฉีดน้ำปูนไม่สมบูรณ์จำนวน 1 ต้น ในขณะที่ทำดารทดสอบเสาเข็มต้นที่สองนั้น เสาเข็มส่วนใหญ่ได้ทำเสร็จไปแล้วกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบของเสาเข็มต้นที่สองที่น้ำหนักบรรทุก 1875 ตันหลังจากคงน้ำหนักไว้ 24 ช.ม. ค่าการทรุดตัวมีเพียง 14 ม.ม. ซึ่งน้อยกว่าผลทดสอบต้นแรกอยู่มาก ผลการทดสอบเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 แสดงผลทดสอบเปรียบเทียบงานหน่วยงาน CP

ผู้เขียนมีความเห็นว่าเสาเข็มต้นที่สองมีค่าการทรุดตัวน้อยกว่าต้นแรกเนื่องจากชั้นทรายที่ระดับปลายเสาเข็มโดยทั่วบริเวณหน่วยงานถูกบดอัด (DENSIFIED) โดยน้ำปูนที่ถูกอัดฉีดจากปลายเสาเข็มส่วนใหญ่ซึ่งก่อสร้างเสร็จไปแล้ว (80 เปอร์เซ็นต์ เสร็จไปแล้ว) ทำให้ BASE STIFFNESS ของเสาเข็มต้นนี้เพิ่มขึ้น

6. บทสรุป

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพมหานครตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และได้มีการนำวิธีการต่อสร้างและเครื่องจักรชนิดต่างๆ เข้ามาใช้บางชนิดเมื่อไม่ได้รับความนิยมก็มีการเลิกกันไป บางชนิดได้รับความนิยมเช่น ระบบ ROTARY DRILL ก็มีการพัฒนาให้เจาะได้ลึกขึ้น รับน้ำหนักมากขึ้น เช่น ทำการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มรูปทรงของเสาเข็มเจาะในปัจจุบันก็ไม่จำเป็นต้องเป็นรูปทรงกลมเสมอไป

พัฒนาทั้งทางด้านเทคนิคและเครื่องจักรที่ทันสมัยขึ้น ทำให้ผู้ออกแบบมีทางเลือกมากขึ้นในการเลือกใช้เสาเข็มเจาะ

7.เอกสารอ้างอิง

- ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์ 2534. *เทคนิควิธีการทำเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ , การสัมนาทางวิชาการ เรื่อง งานฐานรากและงานใต้ดิน* , โรงแรมเอเชีย .
- ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว. 2539. *การก่อสร้างกำแพงไดอะแฟรมวอลล์และเสาเข็มเจาะโครงการสาธรคอมเพล็กซ์*, การบรรยายทางวิชาการและทัศนศักษาเรื่องการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกด้วยกำแพงไดอะแฟรมวอลล์สั้นมากในกรุงเทพฯ, รงแรมสุโขทัย .
- M.J. Tomlinson. 1955. *Pile Design snd Construction Practice (Fourth Edition)* , Published by E & FN Spon, UK.
- W. Teparaksa 1992. *Behaviour of Base-Grouted Bored Pile in Bangkok Subsoil*, Piling: European Practice and Worldwide Trend., Thomas Telford. London
- D.E.Sherwood & J.M. Milchell 1989. *Base Grouted Piles in Thanet Sand*, London.Proceeding of the International Conference on Piling and Deep Foundation.,London
-J.A. Yeats & N.J.O.' Riordan 1989. *The Design and Construction of Large Diameter Base Grouted Piles in Thanet Sand at Blackwall Yard*, London. Proceeding of the International Conference on Piling and Deep Foundation, London
-M. Francescon & S.A. Solera 1992. *Base Grouting to Improve Performance of Pile Bored Under Bentonite in the Thanet Sands. Grouting in the Ground*., Proceeding of the Conference organized by the Institution of Civil Engineer and Held in London on November
-The Institution of Civil Engineers1996. *Specification for Piling and Embeded Retaining Walls*, Published by Thomas Telford

ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพฯ
Experiences & Developments of Deep Bored Piles Construction in Bangkok Subsoils

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด
26/10 ถนนรามอินทรา 109 แขวงบางชัน
เขตคลองสามวา กทม.10510
Home page: www.seafco.co.th
E-mail: seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ

เสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกเป็นเสาเข็มระบบหนึ่งที่มีผู้นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างโครงการขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ในพื้นที่กรุงเทพฯมาก เสาเข็มระบบนี้เริ่มมีการนำเข้ามาใช้ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯเป็นครั้งแรกเมื่อประมาณ 33ปีกว่าแล้ว ในปัจจุบันเสาเข็มระบบนี้มีพัฒนาการก้าวหน้าดีขึ้นกว่า 33 ปีที่แล้วเป็นอย่างมาก จนทำให้ได้รับความนิยมนำไปใช้ในการออกแบบ และก่อสร้างอย่างแพร่หลาย บทความนี้จะบรรยายถึงประสบการณ์และพัฒนาการความก้าวหน้าทางเทคนิคของเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกที่ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยจะกล่าวครอบคลุมถึงอิทธิพลของปัจจัยตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มระบบเจาะเปียกและปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างที่ผู้เกี่ยวข้องควรทราบทั้งในขณะทำการออกแบบและขณะทำการควบคุมการก่อสร้างในสนาม

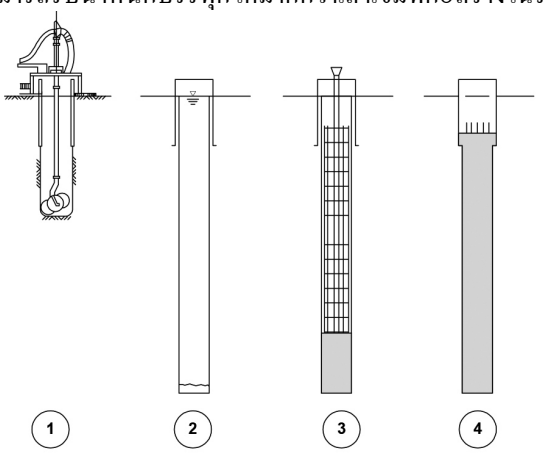
Abstract

Deep wet process bored piles become one of the major foundation elements used to support medium to large scale structures. This piling system has been introduced in Bangkok since more than 33 years ago. It's technique has been continuously developed since the beginning, and nowadays the performance, quality and bearing behavior of piles are far better than those of 33 years ago. As a result this piling system become popular among designers and contractors. This paper presents experience and development of the deep wet process bored piles constructed in Bangkok subsoil, covering the actual problematic aspects of parameters which influence both performance and bearing behavior of the bored piles. The possible problems and difficulties during construction, which both design engineers and inspectors need to know and take into consideration in design and site work are also described.

1.บทนำ

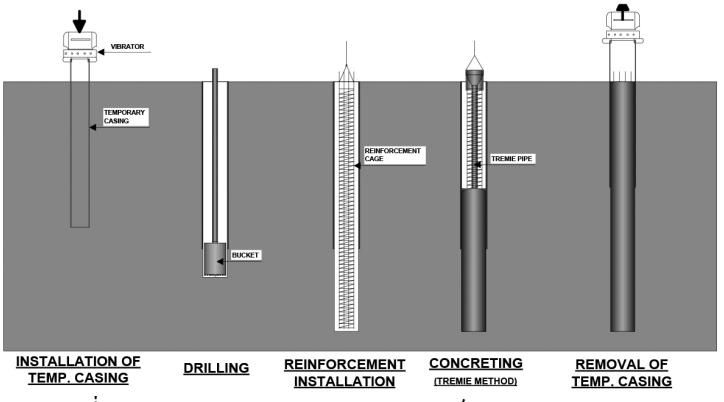
เสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกถูกนำมาใช้ในกรุงเทพฯระยะแรกๆเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2510 ในงานก่อสร้างฐานรากเสาเข็มเจาะตอม่อกลางแม่น้ำของสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา เทคนิคการเจาะเสาเข็มกลางแม่น้ำในยุคนั้นเป็นระบบหัวเจาะกัดดินเป็นเม็ดเล็กๆภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ แล้วปั๊มดูดขึ้นมาให้สารละลายฯอุ้มตะกอนดินไหลหมุนเวียนผ่านถังตกตะกอน วิธีขุดเจาะนี้เรียกว่าวิธีระบายน้ำกลับทาง (ชัย และ นากาซาวา, 2528) หรือที่เรียกกันโดยสากลว่าระบบ Reverse circulation drilling Technique (รูปที่ 1) ต่อมาเมื่อเริ่มมีการก่อสร้าง

อาคารใหญ่ขนาดความสูงกว่า 20 ชั้นขึ้นมาในช่วงประมาณปี พ.ศ.2520 จึงได้เริ่มมีการนำเทคนิคแบบใช้สว่านหมุนขุดเจาะดินเป็นก้อนโดยตรงภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ ที่เรียกว่าระบบ Rotary Drilling under bentonite slurry displacement technique (รูปที่ 2) มาใช้ เสาเข็มระบบหลังนี้ได้รับความนิยมต่อเนื่องมาอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบันและมีพัฒนาการก่อสร้างอย่างต่อเนื่องโดยตลอด จนในปัจจุบันสามารถออกแบบให้มีคุณภาพ, ขนาดหน้าตัด, ความลึก และความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างในระยะแรกๆ มาก



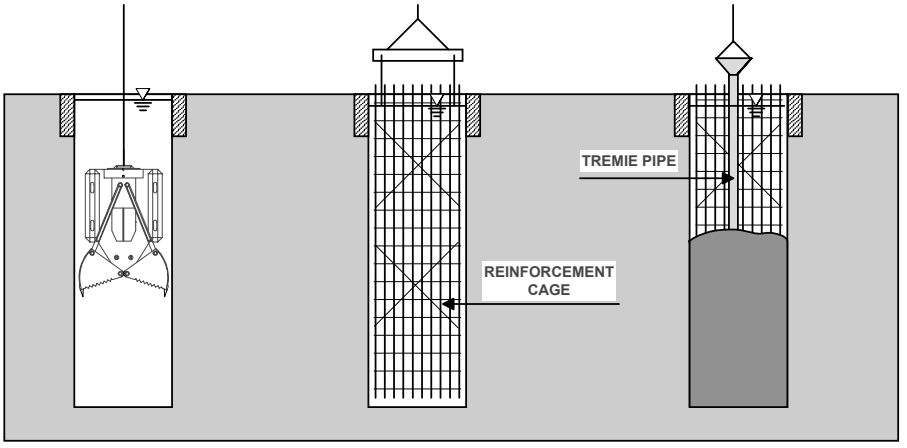
1. การเจาะ
2. ใช้เครื่องตรวจว่าการเจาะเสร็จเรียบร้อยแล้ว
3. ใส่เหล็กเสริม ล้างโคลนก้นหลุม ตรวจสอบ ใส่ท่อ และเทคอนกรีตลงไปในท่อ
4. เทคอนกรีตเต็มหลุม ดึงท่อขึ้น ถมดินกลับ

รูปที่ 1 Reverse circulation drilling technique (ชัยและนากาซาวา 2528)



รูปที่ 2 Rotary drilling technique (ณรงค์ และคณะ ,2542 ก)

วิธีการขุดเจาะเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกยังได้มีการพัฒนาหลากหลายแบบมากขึ้นอีกด้วยโดยสามารถก่อสร้างเสาเข็มเป็นรูปเหลี่ยมที่เรียกว่าแบเร็ต (Barrette) ซึ่งแบเร็ตนี้สามารถก่อสร้างได้หลายรูปทรงเช่น สี่เหลี่ยม (Rectangular) รูปตัวแอล (L-Shape) รูปตัวที (T-Shape) รูปกากบาท (Cruciform) ซึ่งขั้นตอนการก่อสร้างจะอยู่ในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามยังมีวิศวกรผู้ออกแบบหรือผู้ควบคุมงานบางกลุ่มไม่มีโอกาสได้ติดตามการพัฒนาการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เลือกใช้ตัวแปร (Parameters) ที่ไม่เหมาะสมในการออกแบบหรือไม่พัฒนาวิธีการควบคุมคุณภาพในขั้นตอนที่สำคัญ หรือเลือกใช้เครื่องมือที่ยังล้าสมัยในการทำงานเสาเข็มเจาะชนิดนี้ จนทำให้เสาเข็มที่ก่อสร้างแล้วเสร็จอาจมีสมรรถนะต่ำกว่าที่ออกแบบไว้และไม่คงทนเท่าที่ควร



รูปที่ 3 ขั้นตอนการก่อสร้าง Barrette (ณรงค์และคณะ, 2542 ข)

1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเสาเข็มที่ก่อสร้างกับที่ออกแบบไว้

การเปรียบเทียบสมรรถนะเสาเข็มเจาะ ที่ก่อสร้างเสร็จแล้วกับสมรรถนะที่ต้องการตามที่ได้ออกแบบไว้ (Performance Versus Design) สามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดที่เหมาะสมเพื่อวัดให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือแล้วนำมาทำการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงและเปรียบเทียบกับตัวแปรออกแบบ (Designed parameters) ที่ผู้ออกแบบเลือกใช้ในขณะออกแบบ เรื่องนี้ Katzenbach & Moormann (1998) ได้เคยบรรยายไว้เป็นแนวทางว่าการจะนำมาเปรียบเทียบนั้นจะต้องนำประเด็นต่างๆมาพิจารณาประกอบด้วยคือ

1.1.1 วิธีประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะขณะออกแบบอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธีการออกแบบที่น่าเชื่อถือได้ (Realistic prognosis of the bearing behaviour of bored piles based on a reliable design method.)

1.1.2 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่อาจมีอิทธิพลและก่อผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะ (Influences of the installation effect on the bearing behaviour of bored piles.)

1.1.3 วิวัฒนาการและเทคนิคการเจาะเสาเข็มที่ก้าวหน้ามากขึ้น (Evolution & technical progress of the drilling and bore techniques.)

1.1.4 มาตรการต่างๆที่นำมาใช้ป้องกันความความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในขณะก่อสร้าง (Measures to prevent damages of bored piles due to mistakes during execution)

1.1.5 วิธีการควบคุมงานงานและการตรวจวัดงานเสาเข็มระหว่างการก่อสร้าง (Supervision & monitoring of executing bored piles.)

1.1.6 การจัดระบบประกันคุณภาพ และวิธีการควบคุมระบบฯทั้งในระหว่างการก่อสร้างและภายหลังที่ก่อสร้างเสาเข็มเสร็จแล้ว (Quality assurance & control during piling work & on finished bored piles.)

1.1.7 วิธีออกแบบที่ยังไม่ได้รับการแก้ไข ให้เหมาะกับงานเสาเข็มเจาะ (Problematic aspects of bored piles design.)

2.2 ปัจจัยตัวแปรต่าง ๆ ที่จะมีผลกระทบกับสมรรถนะของเสาเข็ม

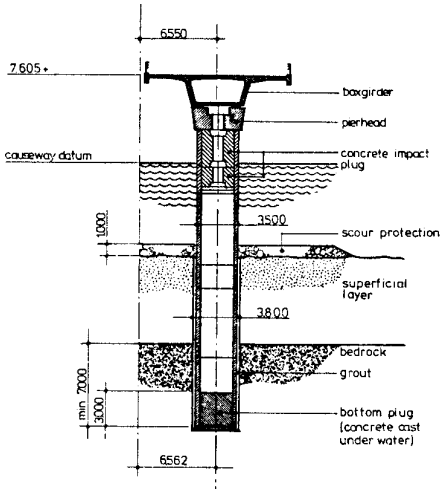
ปัจจัยตัวแปร (Parameters) ที่จะมีผลกระทบกับสมรรถนะและพฤติกรรมในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะระบบเปียกได้รวบรวมไว้ใน ตารางที่1 ผลกระทบดังกล่าวหลายประการเป็นที่รับรู้กันดีว่าเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และจะต้องถูกนำเข้าพิจารณาประกอบตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ส่วนปัจจัยตัวแปรอีกบางประการสามารถป้องกันหรือปรับปรุงให้ดีขึ้นได้จึงจำเป็นต้องถูกควบคุมและตรวจสอบระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มเจาะอย่างใกล้ชิดเพื่อให้มีผลกระทบทางลบกับเสาเข็มเกิดขึ้นน้อยที่สุด

ตารางที่1 ปัจจัยที่จะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะเปียก (Parameters influencing the bearing behavior of bored piles)

<u>สภาวะของชั้นดินและน้ำใต้ดิน</u> • ชนิดของชั้นดิน(Soil type) • ลักษณะของชั้นดิน (Stratification) • คุณสมบัติของดิน (Properties of the soils) • ระดับน้ำใต้ดินถาวร (Hydraulic conditions) • สารเคมีในชั้นดินและในน้ำใต้ดิน (Chemical ingredient of soil &ground water)	**<u>การก่อสร้าง</u>** • ชนิดเครื่องมือที่ใช้ขุดเจาะ (Type of drilling equipment) • ชนิดของสารละลายฯ ที่ใช้ในการขุดเจาะ (Type of slurry) • วิธีที่ใช้ในการขุดเจาะ (Method of excavation) • วิธีอัดฉีดน้ำปูน(Grouting method) • ความชำนาญใน การเทคอนกรีตใต้น้ำ (Experience of tremie concrete) • วิธีถอนปลอกเหล็ก (Method of extraction of casing)
<u>ชนิดและรูปแบบของเสาเข็ม</u> • ขนาดหน้าตัดและความยาว (Diameter & length) • ชนิดของคอนกรีตที่ใช้หล่อ (Type of concrete) • โครงเหล็กเสริมเสาเข็ม (Reinforcement) • ลักษณะของผิวและปลายเสาเข็ม (Condition of surface & base of piles) • การอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวหรือปลายเสาเข็ม (Grouted or none -grouted)	**<u>เนื่องจากอิทธิพลอื่นๆ</u>** • แรงฉุดลงของดิน (Negative skin friction) • งานขุดดินฐานรากก่อให้เกิดแรงดึง (Tension forces) จนเสาเข็มแตกร้าว • เกิดการหดและพองตัวของชั้นดิน(Shinking & swelling of subsoil) ทำให้เกิดแรงดึงในเสาเข็มจนแตกร้าว • การสกัดหรือตัดหัวเสาเข็มที่ไม่ถูกวิธีก่อให้หัวเสาเข็มแตกร้าว • ความทนทาน (Durability) ในระยะยาว

เสาเข็มเป็นระบบโครงสร้างฐานรากที่สำคัญสำหรับสิ่งก่อสร้างเกือบทุกประเภทที่ก่อสร้างขึ้นในพื้นที่กรุงเทพฯโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะเวลาช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2528-2540 มีการก่อสร้างงานอาคารสูงและงาน

สาธารณูปโภคขนาดใหญ่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก น้ำหนักโครงสร้างมีน้ำหนักสูงมากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้เกิดการพัฒนาระบบเสาเข็มให้สามารถเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ใหญ่ขึ้นถึง 2.0 เมตร และบางโครงการมีการเจาะถึงระดับความลึกกว่า 70 เมตร นอกจากนั้นยังมีการเสริมความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มให้เพิ่มขึ้นในอีกหลายโครงการ โดยการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันที่ปลายเสาเข็ม (Base grouted bored pile) หรือที่ผิวเสาเข็ม (Shaft grouted bored pile) หรืออัดฉีดทั้งที่ปลายและที่ผิวเสาเข็ม นอกจากนั้นยังมีการนำเสาเข็มเจาะชนิด Barrette มาใช้ในโครงการต่างๆหลายโครงการ และเป็นที่คาดการณ์กันว่าในระยะเวลาไม่นานจากนี้ไปจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องอาจจะมีบางโครงการเช่นงานทางยกระดับที่ผ่านเข้ามากลางใจเมืองออกแบบเป็นเสาเข็มตอม่อละเพียงต้นเดียวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-3 เมตร หรือเป็นเสาเข็ม Barrette เดี่ยวขนาดใหญ่ ดังเช่นที่เคยการก่อสร้างในต่างประเทศมาแล้วก็ได้ (รูปที่ 4)



รูปที่4 เสาเข็มเดี่ยวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.80 เมตร (After Tonnisen et al, 1985)

2. วิวัฒนาการเสาเข็มระบบเจาะโดยใช้สว่านเจาะหมุนในชั้นดินกรุงเทพฯ

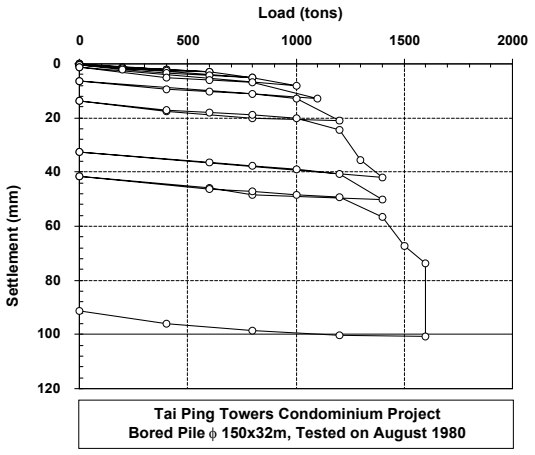
2.1 การเติบโตของเสาเข็มระบบเจาะเปียก

2.1.1 เสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียก ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ระบบเจาะหมุนภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ (Rotary drilling under bentonite slurry displacement technique) ในระยะแรกที่มีการนำเข้ามาใช้ในเมืองไทยเมื่อประมาณปีพ.ศ. 2520นั้นเครื่องมือที่ใช้จะเจาะได้ลึกถึงระดับชั้นทรายแน่นชั้นแรกที่ระดับความลึกประมาณ 30-35 เมตรจากระดับพื้นดินเท่านั้น ขนาดเสาเข็มที่เจาะมีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80-100 เซนติเมตร น้ำหนักออกแบบ 200-300ตันต่อต้นตามลำดับ การควบคุมคุณภาพสารละลายเบ็นโทไนท์ขณะนั้นยังหละหลวม สมรรถนะของเสาเข็มในขณะนั้นจึงเปรียบเทียบเสาเข็มที่ก่อสร้างในปัจจุบันนี้ไม่ได้ เพราะวิศวกรไทยยังรู้เรื่องเสาเข็มเจาะระบบเปียกและเบ็นโทไนท์น้อย ฝรั่งจึงควบคุมเองและฝรั่งบอกอย่างไรวิศวกรไทยก็ทำตามทำให้เสาเข็มรับน้ำหนักออกแบบต่ำกว่าในปัจจุบันมาก

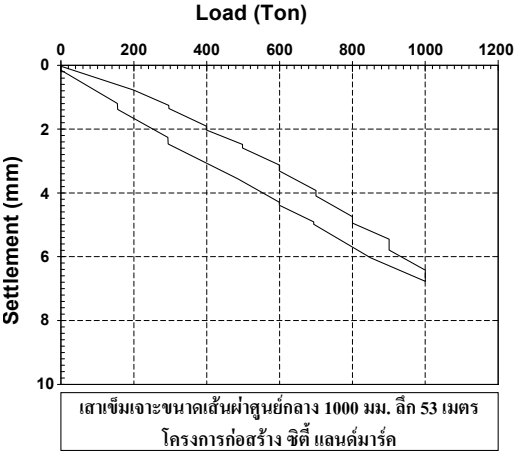
2.1.2 ระยะที่สองนับจากปี พ.ศ. 2523-2524 เครื่องมือที่ใช้ยังเจาะได้ที่ระดับความลึกถึงชั้นทรายแน่นชั้นแรกเท่าเดิม การควบคุมคุณสมบัติสารละลายเบ็นโทไนท์ดีขึ้นมาบ้างแต่ก็ยังไม่เข้มงวดมากและวิศวกรไทยเริ่มมีโอกาสเข้า

ไปเรียนรู้เทคโนโลยีเสาเข็มเจาะมากขึ้น เริ่มมีเอกสารวิชาการซึ่งจัดพิมพ์โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ เกี่ยวกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ (อรุณ 2524) และการตรวจสอบสารละลายเบ็นโทไนท์ในสนามฯ (ณรงค์ 2524) ออกมาเผยแพร่เป็นครั้งแรกและขนาดเสาเข็มมีการก่อสร้างเพิ่มเป็นสี่ขนาดคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 80,100.120 และ150เซนติเมตร น้ำหนักออกแบบขยับขึ้นเป็น 250,350,450 และ800ตัน ตามลำดับ ผลการทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็ม ขนาด150ซม.ลึก 32 เมตรที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบ 1600ตัน ที่ส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.0 มีค่าทรุดตัวที่หัวเสาเข็มค่อนข้างสูงมากกว่า 60 มิลลิเมตร (รูปที่ 5) เนื่องจากขณะนั้นยังเข้าใจกันว่าค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าสูงมาก

2.1.3 ระยะที่สามเป็นช่วงระยะเวลาต่อเนื่องจากระยะที่สองระหว่างปี พ.ศ. 2524-2526เครื่องมือได้มีการเปลี่ยนแปลง จนสามารถเจาะได้ถึงชั้นทรายแน่นชั้นที่สองที่ระดับความลึกประมาณ 55เมตร มีการควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ที่เป็นรูปธรรมมากขึ้นและมีผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มชนิดนี้เพิ่มมากขึ้นทำให้ เสาเข็มเจาะขนาด 80,100,120และ150เซนติเมตร เริ่มถูกออกแบบให้รับน้ำหนักสูงขึ้นคือ 300,450,550และ950 ตันตามลำดับ โดยมีส่วนความปลอดภัย 2.5 เท่าผลการทดสอบการรับน้ำหนัก ส่วนใหญ่จะมีค่าการทรุดตัวไม่เกิน 15 มิลลิเมตร (รูปที่ 6)



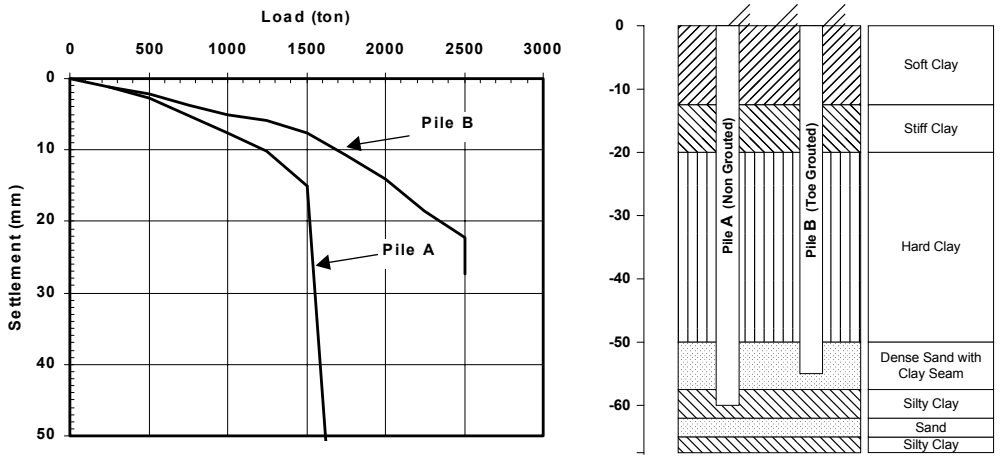
รูปที่5 พฤติกรรมการรับน้ำหนักทดสอบของเสาเข็มเจาะปลายเสาเข็มหยั่งที่ทรายชั้นแรกก่อสร้างในปีพ.ศ. 2523



รูปที่6 พฤติกรรมการรับน้ำหนักทดสอบของเสาเข็มเจาะปลายเสาเข็มหยั่งที่ทรายชั้นที่สองก่อสร้างระหว่างช่วง พ.ศ. 2524-2526

2.1.4ระยะที่สี่ซึ่งถือว่าเป็นยุคที่รุ่งเรืองที่สุดของผู้ประกอบการธุรกิจเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกในช่วงระยะเวลาระหว่างปี พ.ศ.2527-2540เครื่องมือสามารถเจาะได้ถึงกว่า 60เมตร และมีผู้ประกอบการเพิ่มมากขึ้นรวมประมาณสิบกว่ารายมีเครื่องมือเสาเข็มเจาะ คิดเฉพาะในกรุงเทพฯเมืองเดียวรวมกันทุกรายมีมากกว่า 150ชุด และในระยะที่สี่นี้เองที่ทำให้มองเห็นถึงสมรรถนะและพฤติกรรมการรับน้ำหนักทดสอบของเสาเข็มเจาะ (Performance & bearing behavior of piles) ที่ก่อสร้างโดยผู้ประกอบการแต่ละรายมีสภาวะแตกต่างกันค่อนข้างหลากหลาย เนื่องจากเป็นยุคที่เศรษฐกิจเฟื่องฟูแบบฟองสบู่กำลังลอยตัวสูงสุดขีดทำให้เกิดการทำงานให้เสร็จโดยเร็วอย่างขาดมาตรฐานการก่อสร้างที่ดีและผู้ว่าจ้างขาดความสนใจในการควบคุมคุณภาพทำให้ผู้ประกอบการเสาเข็มเจาะหลายรายทั้งที่เข้ามาจากต่างประเทศและเปิดขึ้นโดยนักลงทุนไทยเองที่ยังขาดทั้งความชำนาญและเทคนิค รับงานก่อสร้าง

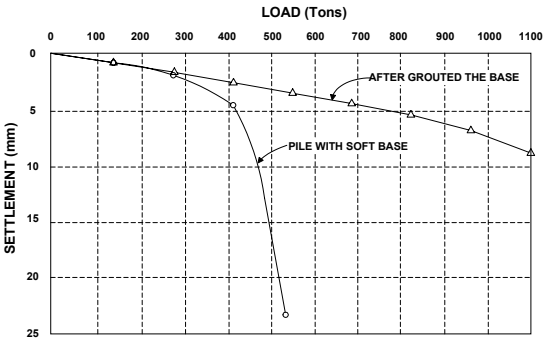
โดยขาดการควบคุมการก่อสร้างที่เหมาะสมทำให้เสาเข็มที่ก่อสร้างเสร็จแล้วบางส่วนมีคุณภาพต่ำซึ่งอาจจะมีปัญหาที่วิศวกรส่วนใหญ่มักจะมองข้ามคือเรื่องความคงทน (Durability) เกิดขึ้นในระยะยาวติดตามมาได้ ส่วนผู้ประกอบการที่มีพื้นฐานทางเทคโนโลยีและความชำนาญอยู่ก่อนแล้ว ก็ได้ใช้โอกาสในระยะที่สี่นี้ที่มีงานให้ทำมากศึกษาวิจัยและพัฒนาด้านเทคนิคเพิ่มเติมควบคู่กับการทำงานจากงานที่มีอยู่จนสามารถก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกให้มีคุณภาพ และสมรรถนะสูงยิ่งขึ้นกว่าเดิมมาก และให้มีความทนทาน (Durability) ในระยะยาว ผู้เขียนได้เคยพบการก่อสร้างเสาเข็มสองต้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 ซม. ที่ก่อสร้างในหน่วยงานเดียวกันโดยผู้รับเหมาเจาะเสาเข็มคนละราย และได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าเสาเข็มมีสมรรถนะและพฤติกรรมในการรับน้ำหนักทดสอบต่างกันมาก (รูปที่ 7) (ณรงค์ และ ทัชชะพงษ์, 2542)



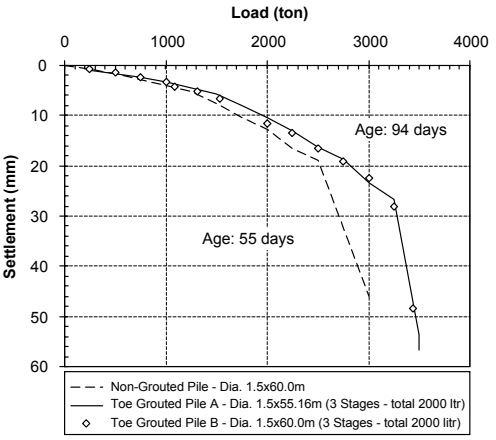
รูปที่7 สมรรถนะและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะก่อสร้างที่เดียวกันโดยผู้รับเหมาต่างรายกัน (ณรงค์ และทัชชะพงษ์, 2542) : Pile A: Plain bored pile, Pile B: Base grouted bored pile

การพัฒนาในระยะที่สี่นี้เองที่ได้มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.00 เมตร เจาะลึกถึงชั้นทรายแน่นชั้นแรกและอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสา (Base grouted bored pile) โดยบริษัทเสาเข็มเจาะต่างประเทศที่เข้ามาเปิดกิจการในประเทศไทย ในโครงการสะพานข้ามพระราม9 ระหว่าง ในปี พ.ศ. 2527 คาบเกี่ยวปี 2528 (Morrison et al, 1987) ซึ่งในเบื้องต้นโครงการนี้ใช้วิธีการเจาะแบบระบายน้ำกลับทางแต่มีปัญหาเรื่องเวลาที่ใช้ในการเจาะนานมากและมีปัญหาการกำจัดตะกอนก้นหลุมเป็นผลทำให้รับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้ต่ำมากจนต้องเปลี่ยนวิธีการเจาะมาเป็นแบบใช้สว่าน Rotary drilling technique แทนและใช้เทคนิคการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มในชั้นทรายแน่นชั้นแรกมาใช้เป็นครั้งแรก รูปที่ 8 เป็นผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 ซม. ลึก 32.8 เมตร ซึ่งเป็นเสาเข็มที่ไม่ได้อัดฉีดน้ำปูน ส่วนขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 200 ซม. เป็นเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม

ส่วนการอัดฉีดน้ำปูนที่เสาเข็มที่หยั่งในชั้นทรายแน่นชั้นที่สองที่ระดับ 55 เมตร ที่มีการก่อสร้างเป็นจำนวนมากกว่า 500 ต้น โดยบริษัทเสาเข็มเจาะชาวไทยในโครงการ Silom Precious Tower (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น Royal Chareonkrung) ที่ถนนสีลมเมื่อปี พ.ศ.2533 รูปที่ 9 เป็นผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเปรียบเทียบระหว่างเสาเข็มที่อัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มกับเสาเข็มที่ไม่ได้อัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม



รูปที่8 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะปลายอยู่ในทรายชั้นแรก โครงการสะพานข้ามพระราม 9 (วันชัย, 2540)



รูปที่9 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะปลายอยู่ในทรายชั้นที่ 2 โครงการ Silom Precious Tower

2.1.5 วิวัฒนาการระยะที่ห้านับตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 จนถึงปัจจุบันเกิดภาวะเศรษฐกิจตกต่ำอย่างรุนแรงที่เรียกกันติดปากว่าฟองสบู่แตกจนทำให้ผู้ประกอบการเสาเข็มเจาะส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นบริษัทมาจากต่างประเทศหรือในประเทศเองประสบภาวะการแข่งขันสูงจนผลประกอบการขาดทุนจำนวนมากและต้องปิดกิจการไปจนขณะนั้นเหลือผู้ประกอบการเสาเข็มระบบเจาะเปียกไม่เกิน 5 ราย และส่วนใหญ่ก็ยังมีปัญหาทางด้านการตลาดที่มีการแข่งขันสูงมาก

2.2 พัฒนาการของเครื่องจักรและอุปกรณ์ฯ

2.2.1 เครื่องเจาะเสาเข็มรูปทรงกลม (Rotary drilling rigs)

เครื่องเจาะเสาเข็มลึกระบบเจาะเปียกรูปทรงกลมในชั้นดินกรุงเทพฯ ปกติจะใช้เครื่องเจาะชนิด Rotary drilling rig ในยุคแรกๆตั้งแต่ปีพ.ศ.2520เครื่องเจาะที่ใช้จะเป็นชนิด Mechanical ติดตั้งบนรถเครนตีนตะขาบ (Crawler crane) ขนาด 40-80 ตัน (รูปที่10) เมื่อเลิกใช้สามารถถอดแยกออกได้การเลือกใช้ขนาดรถเครนขึ้นอยู่กับขนาดความลึกเสาเข็มที่จะก่อสร้างต่อมาประมาณปีพ.ศ.2535 เริ่มมีการนำเครื่องเจาะชนิด Hydraulic ติดตั้งถาวรบนรถเครนเรียกเครื่องเจาะแบบนี้ว่า Fully hydraulic & self erection drilling rig (รูปที่11) มาใช้งาน ข้อดีของเครื่องเจาะชนิดแรกแบบแยกส่วนคือมีกำลังในการหมุนเจาะ (Torque) สูงและสามารถต่อก้านเจาะได้ลึกกว่า 80 เมตร ส่วนข้อดีของเครื่องเจาะชนิดหลังคือเสียงเงียบกว่า,ขนย้ายติดตั้งง่ายและมีความคล่องตัวในการทำงานสูงแต่เจาะได้ตื้นกว่าชนิดแรกคือเจาะได้ลึกประมาณ 60เมตร ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องเจาะทั้งสองชนิดในกรุงเทพฯ



รูปที่ 10 เครื่องเจาะชนิด Mechanical drilling rig (Crane mounted rig)



รูปที่ 11 เครื่องเจาะชนิด Full hydraulic &self erection rig

หัวเจาะที่ใช้ขุดเจาะในดินกรุงเทพฯ ใช้สว่าน (Auger) เจาะดินและถังขุด (Bucket) เจาะในชั้นทราย (รูปที่ 12ก) และการขุดเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ สามารถใช้ก้านเจาะระบบ Friction Lock Kelly Bar ได้ หากต้องการเจาะลงไปในชั้นหินเช่นงานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะต้องเปลี่ยนก้านเจาะเป็นระบบ Mechanical Internal Kelly Lock และหัวเจาะต้องเปลี่ยนเป็นหัวเจาะสำหรับเจาะหินคือ Rock Augur และ Core Barrel (รูปที่ 12ข) รูปที่ 13 เป็นการใช้ Core Barrel เจาะหินในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะของสะพานข้ามแม่น้ำในภาคอีสาน

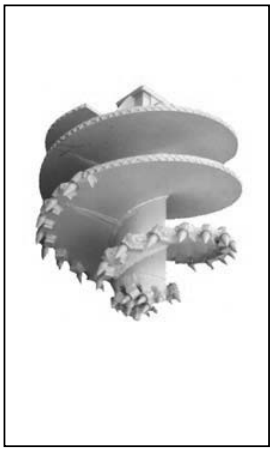


สว่านเจาะ (Auger)
ใช้เจาะดินแบบแห้ง

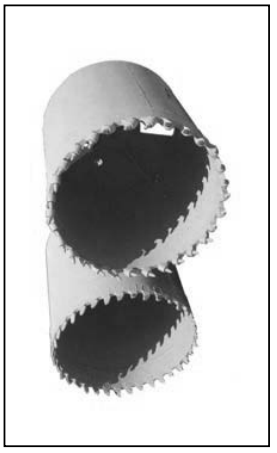


ถังขุด (Bucket)
ใช้เจาะดินทรายใต้น้ำ

รูปที่ 12ก Auger และ Bucket



Rock Auger
ใช้สำหรับเจาะหิน



Core Barrels
ใช้สำหรับเจาะหิน

รูปที่ 12ข Rock Auger และ Core Barrels



รูปที่ 13 เครื่องเจาะกำลังใช้ Core Barrels ϕ 1.20m ในการเจาะหิน ขณะก่อสร้างสะพานที่ อุบลราชธานี

2.2.2 เครื่องขุดเสาเข็มรูปเหลี่ยม (Grabs)

เสาเข็มลึกระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ ในปัจจุบันไม่จำกัดเฉพาะว่าต้องก่อสร้างเป็นรูปวงกลมเสมอไป ได้มีการนำเครื่องมือขุดเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยม (Barrette) มาใช้ครั้งแรกในงานก่อสร้างอาคารสำนักงานใหญ่ธนาคารกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่ถนนสีลมเมื่อประมาณปีพ.ศ.2521 โดยใช้หัวแบบ Kelly grab (รูปที่14) หลังจากนั้นผู้เขียนได้นำหัวขุดแบบ Cable hang grab (รูปที่15) มาใช้เป็นครั้งแรกในงานก่อสร้างอาคาร International Trade Center (Thasnanipan et al 1998) ซึ่งก่อสร้างในที่ดินอาคารใต้ฟ้าเดิมที่ถนนเยาวราชเมื่อปีพ.ศ.2528 โดยต่อมาอาคารนี้ได้เปลี่ยนชื่อเป็นโรงแรมแกรนด์ไชน่าในปัจจุบัน นอกจากหัวเจาะชนิดที่กล่าวมาแล้วยังเคยมีผู้นำหัวเจาะแบบ Hydraulic Grab (รูปที่ 16) และ Hydromill (รูปที่ 17) เข้ามาใช้เป็นครั้งคราวด้วยเช่นกันแต่มีความคล่องตัวในการทำงานในชั้นดินกรุงเทพฯ น้อยกว่าระบบ Mechanical Hang Grab หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาดัดแปลงหัวเจาะให้สั้นลงเรียกว่า Baby hang grab เพื่อให้สามารถนำไปเจาะในบริเวณที่มีความสูงจำกัด (รูปที่18) ที่เครื่องเจาะชนิดRotaryไม่สามารถเข้าทำงานได้ในหลายโครงการ (ณรงค์, กมล, และพรพจน์, 2542)



รูปที่14 หัวขุด barrette แบบ Kelly grab



รูปที่15 หัวขุด Barrette แบบ Mechanical Hang grab



รูปที่16 หัวขุด Barrette แบบ Hydraulic Hang Grab



รูปที่17 หัวขุด Barrette แบบ Hydromill

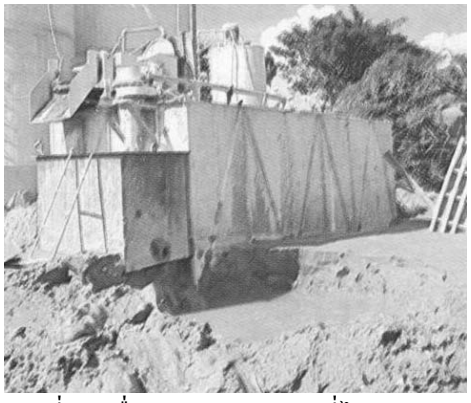


รูปที่18 การขุดในบริเวณความสูงจำกัดด้วย.Baby hang grab (ณรงค์และคณะ2542)

2.2.3 อุปกรณ์ทำความสะอาดสารละลายเบ็นโทไนท์

การขุดเจาะเสาเข็มลึกมากระบบเปียกภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพฯที่มักจะมีดินตะกอน (Silt) แทรกผสมอยู่ในชั้นดินเหนียว (Clay) เป็น Silty clay และแทรกผสมในชั้นทราย (Sand) เป็น Silty sand เสมอ ในอดีตตั้งแต่ปีพ.ศ.2520-2535ที่ผู้ประกอบการในเมืองไทย ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังถึงผลกระทบของสารละลายเบ็นโทไนท์ ต่อแรงเสียดทานผิวเสาเข็ม ผู้ประกอบการเกือบทุกรายจะใช้เครื่องทำความสะอาดสารละลายเบ็นโทไนท์ (Desander unit) แบบพื้นๆชนิดที่ไม่สามารถแยกดินตะกอน (Silt) ออกได้โดยดินตะกอน จะลอดผ่านตะแกรงร่อนตกลงไปผสมกับสารละลายเบ็นโทไนท์อีก ทำให้คุณสมบัติต่างๆของสารละลายฯเสื่อม (ณรงค์,กมลและพรพจน์, 2543) ซึ่งดินตะกอน (Silt) ที่แยกออกไม่ได้นอกจากจะเกิดผลกระทบกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มแล้วยังจะทำให้ดินทรายที่ถูกสกัดออกมาจาก Desander unit มีลักษณะเปียกแฉะไม่สามารถรวมเป็นกองได้จนก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมติดตามมาด้วย (รูปที่19) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2535 เป็นต้นมาผู้ประกอบการบางรายที่มีการศึกษาและวิจัย ได้เล็งเห็นความสำคัญของคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ว่าจะมีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มจึงทำการเปลี่ยนเครื่องทำความสะอาด Desander เป็นชนิดที่มี Desilting unit อยู่

ด้วยซึ่งสามารถแยก Silt ออกได้มาใช้ และดินทรายและซิลท์ที่ถูกแยกออกมาโดยเครื่องชนิดจะนี้มีสภาพแห้ง สามารถกองพูนได้ (รูปที่20) และการควบคุมคุณสมบัติสารละลายฯทำได้ดีกว่าเดิมมาก



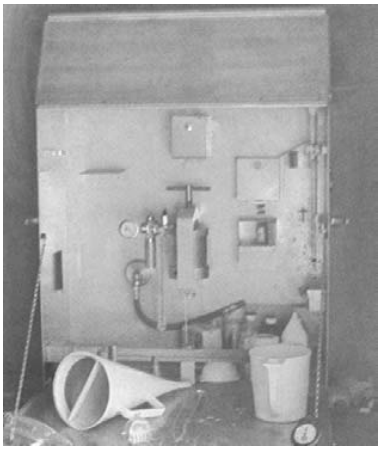
รูปที่19 เครื่อง Desander รุ่นเก่าที่ไม่สามารถแยก Silt ออกได้



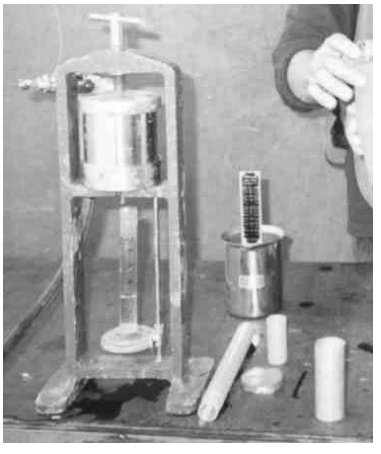
รูปที่20 เครื่อง Desander ที่มี Desilting unit ในตัวสามารถแยก Silt ได้ (ณรงค์และคณะ,2542 ก)

2.2.4 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติสารละลายเบ็นโทไน์

ในอดีตการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียก จะทำการควบคุม และทดสอบคุณสมบัติสารละลายเบ็นโทไนท์เฉพาะ Density, Viscosity, Sand content และpH value เท่านั้น ผู้ประกอบการในอดีตจึงจัดหาอุปกรณ์มาตรฐานสี่ประเภทมาใช้เฉพาะMud balance, Mash cone, Sand screen set และ pH testing paper (รูปที่21) แต่ในปัจจุบันนี้เป็นที่รับรู้กันทั่วไปว่าการที่จะก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกให้ได้สมรรถนะที่ดีนั้น จะต้องควบคุมปริมาณน้ำในสารละลายที่ซึมสูญหายเข้าไปในดินให้มีปริมาณน้อยที่สุดและต้องควบคุมความหนาของเยื่อบุทึบน้ำ (Filter cake) ที่ผิวผนังรูเจาะไม่ให้มีความหนามากเกินไปและค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ของสารละลายเบ็นโทไนท์ต้องไม่สูงมากเกินไปจนคอนกรีตครูดออกได้ไม่หมด ผู้ประกอบการจึงควรจัดหาอุปกรณ์ทดสอบ Fluid loss testing unit และ Shearometer (รูปที่22) สำหรับใช้ทดสอบเพิ่มเติมในงานสนามด้วย



รูปที่21 อุปกรณ์ทดสอบ Density, Viscosity, และ Sand content

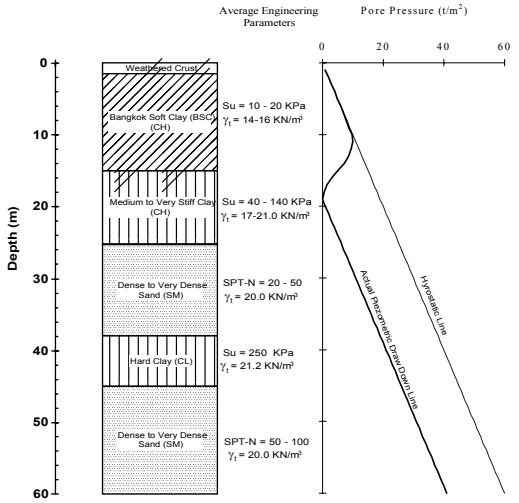


รูปที่22 อุปกรณ์ทดสอบFilter &Fluid loss และ Shearometer

3.ชั้นดินกรุงเทพฯกับงานเสาเข็มเจาะ

3.1 สภาพชั้นดินและแรงดันน้ำใต้ดิน

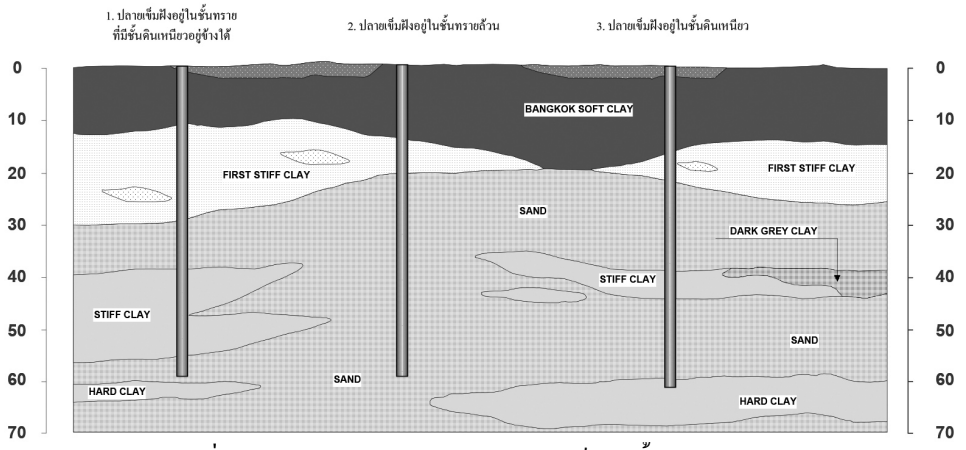
สภาพชั้นดินโดยทั่วไปของที่ราบลุ่มกรุงเทพฯประกอบด้วยดินทรายที่ถูกน้ำพัดพามาตกตะกอนเป็นชั้นตะกอนดินและตะกอนทรายสลับเป็นชั้นไปมาตั้งแต่เมื่อสมัยยุคที่ 4 ของประวัติศาสตร์โลกจนถึงความลึกอย่างน้อย500เมตรจากระดับผิวดินจึงจะพบชั้นหิน (Balasubramanium, 1991) รูปที่ 23 แสดงชั้นดินกรุงเทพฯ โดยสังเขปถึงความลึกประมาณ 60 เมตร ดินชั้นบนสุด2-3 เมตรบนจะเป็นชั้นดินเปลือกแตกระแหงปกคลุมชั้นดินอ่อนถึงอ่อนมากที่มีความหนาประมาน 12 เมตรไว้และค่อยๆเปลี่ยนสภาพมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็นดินอ่อนปานกลาง (Medium clay) ถึงที่ระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตร ต่ำจากนั้นลงมาจะเป็นชั้นดินจะต่อด้วยชั้นดินแข็งถึงแข็งมากหรือดินดาน (Stiff to very stiff or hard clay) ส่วนชั้นทรายชั้นแรกมีความหนาประมาน 5-10 เมตรจะพบที่ความลึกประมาน 25-30 เมตรต่ำจากชั้นทรายชั้นแรกลงไปจะเป็นชั้นดินแข็งสลับกับชั้นทรายแน่นสลับกันไปมาลึกหลายร้อยเมตร แรงดันน้ำได้ดิน (Actual pore pressure) ในชั้นดินอ่อนมีสภาพแรงดันน้ำเป็นปกติ (Hydrostatic pressure) และแรงดันน้ำค่อยๆลดลงเปลี่ยนเป็น Piezometric drawn down pressure ที่ใต้ระดับล่างของชั้นดินอ่อนจากผลของแรงดันน้ำที่ลดลงทำให้ Effective overburden pressure ในชั้นทรายชั้นแรกและในชั้นถัดๆไปเพิ่มสูงขึ้นประมาน 20 ตันต่อตารางเมตร แรงดันน้ำที่ลดลงในชั้นทราย (Depressurization of sand layer) เกิดจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จนทำให้แผ่นดินเกิดทรุดตัวลงนั่นเอง



รูปที่ 23 ชั้นดินกรุงเทพฯและ Piezometic Level (Thasnanipan et al ,1998)

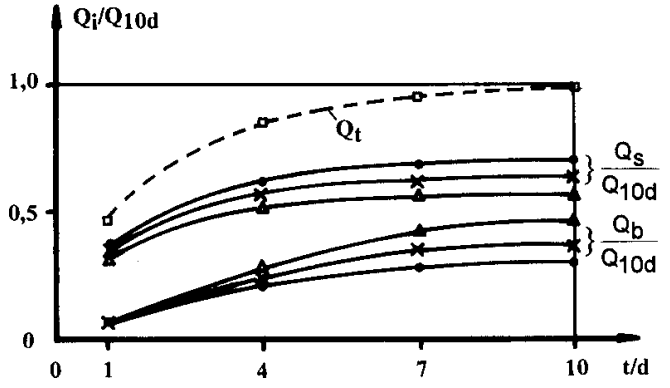
3.2 สภาวะของปลายเสาเข็มที่หยั่งในชั้นดินที่แตกต่างกัน

เนื่องจากชั้นดินแข็งและชั้นทรายแน่นระดับลึกมีชั้นสลับกันไปมาที่ระดับไม่แน่นอนตายตัว มีผลทำให้สภาวะระดับฝังของปลายเสาเข็ม (Piles embedment condition) อาจอยู่ในชั้นดินที่แตกต่างกัน (รูปที่ 24) ซึ่งจะมีผลทำให้เสาเข็มที่มีขนาดหน้าตัด,ความยาวที่เท่ากัน ก่อสร้างวิธีเดียวกัน มีสมรรถนะและพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาสภาวะฝังปลายดังกล่าวไว้ในขณะออกแบบด้วย



รูปที่24 ลักษณะของสภาวะของปลายเสาเข็มในชั้นดินต่างๆ

Meiβner et al, 1993 ได้เคยทำการศึกษาในห้องทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของระดับฝังปลายในชั้นดินที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะและสรุปว่าเมื่อวางปลายสาเข็มใกล้หรือเหนือชั้นดินอ่อนถ้า t/d=2 (t คือระยะจากปลายเสาเข็มถึงระดับบนของชั้นดินอ่อนด้านล่างและ d คือเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม)ขณะรับน้ำหนักจะเกิดการกดทะลุ (Punching mechanism) อันจะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักทั้งแรงเสียดทานที่ผิวและแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มลดลงอย่างมากที่เห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 25)



Qs = Shaft Capacity
Qb = Base Capacity

รูปที่ 25 ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มในสภาวะการฝังปลายเสาเข็มใกล้ชั้นดินอ่อนข้างใต้ (Meiβner et al, 1993)

4. สารละลายที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ ต้องทำการใส่สารละลายลงไปในหลุมเจาะเพื่อก่อให้เกิดแรงดันต้านแรงดันดินไม่ให้หลุมเจาะเกิดการบีบตัวหรือพังทลาย สารละลายฯที่ใช้มีสองชนิดคือ สารละลายเบ็นโทไนท์ และสารละลายโพลิเมอร์

4.1 สารละลายเบ็นโทไนท์ (Bentonite slurry)

มีการพบเบ็นโทไนท์ครั้งแรกในสหรัฐอเมริกาที่ Fort Benton มลรัฐ Wyoming สหรัฐอเมริกา ซึ่งคำว่า Bentonite นี้มาจากคำว่า Benton นั่นเอง เบ็นโทไนท์มีอยู่ 3 ประเภทคือ

- Natural Sodium Bentonite ซึ่งมีคุณสมบัติการพองตัว (Swelling Ability) และค่า Liquid Limit สูงมากแต่มีค่า Fluid Loss ต่ำ เบ็นโทไนท์ชนิดนี้เหมาะต่อการใช้งาน แต่มีราคาแพงและหายากจึงไม่เป็นที่นิยมใช้
- Natural Calcium Bentonite หาง่ายมีเหมืองอยู่ทั่วโลก แต่ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการพองตัวและค่า Liquid Limit ต่ำและมีค่า Filter Loss และ Fluid Loss สูงกว่าชนิดแรกมาก ทำให้เบ็นโทไนท์ชนิดนี้ไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานเสาเข็มเจาะ
- Sodium-activated Calcium Bentonite เบ็นโทไนท์ที่ผลิตขึ้นโดยเติม Sodium Carbonate ในปริมาณที่เหมาะสมลงไปใน Calcium Bentonite ทำให้มีพฤติกรรมต่างๆคล้ายกับ Natural Sodium Bentonite งานเสาเข็มเจาะส่วนใหญ่ทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศอังกฤษนิยมใช้เบ็นโทไนท์ชนิดนี้ เพราะหาไม่ยากและราคาไม่สูงมากนัก แม้นแต่ในประเทศไทยก็มีการผลิตเบ็นโทไนท์ชนิดนี้ ซึ่งผู้เขียนได้นำมาใช้และพบว่ามีคุณภาพดี

4.1.1. คุณลักษณะเฉพาะของสารละลายเบ็นโทไนท์

เมื่อผงเบ็นโทไนท์ถูกนำมาผสมกับน้ำสะอาดและกวนให้แตกตัวแล้วจะกลายเป็นสารละลายเบ็นโทไนท์ที่มีความหนืด (Viscous Slurry) และหากปล่อยให้อยู่นิ่ง ๆ ในระยะเวลาหนึ่ง (เรียกว่า Exposure time หรือ Contact Time) ความเหนียวหนืดจะเพิ่มมากขึ้น (Thick) แต่ความเหนียวหนืดนี้จะลดลง (Thin) เมื่อสารละลายถูกกวนให้ปั่นป่วน (Agitation) ปรากฏการณ์เฉพาะนี้เรียกว่า Thixotropy Characteristic (ณรงค์และคณะ, 2543ก) สาเหตุมาจากเมื่อสารละลายฯอยู่นิ่งๆนั้น ประจุไฟฟ้าในอนุภาคเล็กๆของผงเบ็นโทไนท์จะดึงดูดซึ่งกันและกันก่อตัวเป็นโครงสร้างของอนุภาคลอยแขวนคล้ายเมือกวุ้น (Gel) เมื่อเมือกวุ้นนี้ถูกกวน (Agitated) จะทำให้ประจุไฟฟ้าที่ดึงดูดกันอยู่ถูกทำลายลงทำให้โครงสร้างอนุภาคลอยแขวนที่เป็นเมือกวุ้นเกิดการแยกตัว (Disperse) กระจัดกระจายทำให้สารละลายกลับเป็นของเหลว (Fluid) ไหลได้อีก

4.1.2 คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ในแต่ละขั้นตอนของการก่อสร้าง

เสาเข็มระบบเจาะเปียกโดยใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ช่วยในการขุดเจาะได้รับการพิสูจน์ว่าได้ผลดีมาแล้วเป็นเวลานาน มีเพียงส่วนน้อยที่เกิดปัญหาและมีคุณภาพต่ำ Hutchinson et al (1974) ได้สรุปไว้ว่า สารละลายเบ็นโทไนท์มีหน้าที่ (Functions) หลายประการคือ

ก) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผนังรูเจาะพังโดยการสร้างแรงดันต้านไว้
ข) คงอยู่ในหลุมเจาะจนกว่างานก่อสร้างจะเสร็จโดยไม่ไหลซึมหายเข้าไปในชั้นดิน
ค) สามารถลอยแขวนตะกอนดินจากการขุดเจาะไม่ให้ตกทับถมที่ก้นรูเจาะ
ง) สามารถถูกแทนที่โดยคอนกรีตที่เทผ่านท่อเทได้หมดโดยง่าย ซึ่งจะทำให้ได้แรงยึดหน่วงที่ดีระหว่างคอนกรีตผิวเสาเข็มกับผนังรูเจาะ
จ) สามารถแยกเศษดินทรายที่ลอยแขวนออกอยู่ได้ด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก
ฉ) สามารถปั๊มสูบได้โดยง่าย

จะเห็นว่าคุณสมบัติข้อ ก) ถึง ค) ต้องการสารละลายที่หนักและเหนียว (Thick slurries) ขณะที่คุณสมบัติข้อ ง) ถึง ข้อ จ) ต้องใช้สารละลายที่เบาและไม่เหนียว (Fluid slurries) Reese et al (1985) รายงานว่าสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ดีเลิศดังกล่าวนั้นเป็นไปไม่ได้ แต่สารละลายเบ็นโทไนท์สามารถทำหน้าที่ทุกขั้นตอนอย่างได้ผลนั้นมีความเป็นไปได้ด้วยการควบคุมที่ดี (An Ideal Slurry, therefore, is impossible. However, effective slurry is possible with control.) ดังนั้นในระหว่างการก่อสร้าง จำเป็นต้องควบคุมคุณสมบัติของสารละลายให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอนด้วยจึงจะได้สมรรถนะของเสาเข็มที่ดี

4.1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์

คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์จากข้อกำหนดหลายประเทศได้แสดงไว้ในตารางที่2 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ ผู้ออกแบบจึงเลือกจากมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งในตารางที่ 2 มาใช้ ซึ่งบางมาตรฐานก็ไม่เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ไม่ว่าจะใช้มาตรฐานใดในตารางที่2 ก็ต้องทำการผสมและควบคุมคุณสมบัติให้ถูกต้องในทุกขั้นตอน กล่าวคือจะต้องตรวจสอบ Density, March Viscosity, pH Value, Sand Content และ Fluid Loss การผสมสารละลายเบ็นโทไนท์ โดยทั่วไปถ้าใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง 3.5-6.0% จะได้ค่า Density ระหว่าง1.02-1.04 g/cm3 สารละลายซึ่งผสมขึ้นครั้งแรกนี้ เมื่อนำไปใช้และนำกลับมาทำความสะอาดเพื่อนำไปใช้ใหม่ ค่า Density จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่สูงกว่า 1.20 g/cm3 จะต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติใหม่ หรือทิ้งสารละลายชุดนี้ไปตารางที่3 เป็นคุณสมบัติที่กำหนดโดย ICE (1996) และผู้เขียนได้ปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติบางตัวให้เหมาะสมกับการทำงานในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่มี Silt ผสมอยู่ในชั้นดิน (ณรงค์ และคณะ, 2543ก)

ตารางที่2 คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ที่รวบรวมมาจากแหล่งต่าง ๆ

Authors	FPS (1975, 1977)	Hutchingson et al. (1975)	FDOT (1987, 1988)	Reese and O' Neil (1988)	ICE (1988)	ACI (1989)	*AASHTO (1992)	*Majano & O' Neil (1993)	*ICE & FPS (1996)
Slurry Type	Bentonite	Calcium Bentonite	Bentonite or Attapulgite	Bentonite or Attapulgite	Bentonite	Bentonite or Polymer	Bentonite or Attapulgite	Bentonite	Bentonite
Density (gm/cc)	<1.10	1.024 to 1.218	1.03 to 1.20	1.03 to 1.20	<1.10	<1.36 (bearing pile) <1.12 (firction pile) <1.02 (Polymer)	1.03 to 1.10 1.03 to 1.20	1.02 to 1.07 1.02 to 1.13	<1.10 <1.15
pH	9.5 to 12	<11.7	8 to 12	8 to 11	9.5 to 12	8 to 12	8 to 11 8 to 11	8 to 10 8 to 10	9.5 to 10.8 9.5 to 11.7
Sand Content	<6% (by weight)	<35% (by weight)	<4% (by volume)	-	-	<4% (bearing pile) <25% (friction pile) <1% (Polymer)	<4% <4% (by volume)	<4 % <10%	<2% <2%
Marsh Funnel Viscosity (sec/Qt)	30 to 90	-	28 to 40	28 to 45	30 to 90	26 to 50	28 to 45 28 to 45	32 to 60 32 to 60	30 to 70 < 90
Plastic Viscosity (cP)	<20	<20	<20	-	<20	-	-	6 to 8.5 6 to 10.0	-
Yield Point (Pa)	-	-	-	-	-	-	-	2 to 6.0 2 to 6.5	-
10 min. Gel Strength (Pa)	4 to 40	3.6 to 20	1.9 to 10	-	4 to 40	-	-	-	4 to 40 4 to 40
Differential Head (m)	>1	-	-	-	-	1.5	-	-	-
Fluid Loss (30 minute test)	-	-	-	-	-	-	-	-	< 40 <60
**Maximum Contact Time (hr.)	-	-	-	-	-	-	-	4	-

Notes : * Upper line for as supplied to pile and lower line for sample from pile prior to placing concrete
** Without agitation and sidewall cleaning

ตารางที่3 Test and compliance values for support fluid (ICE, 1996)

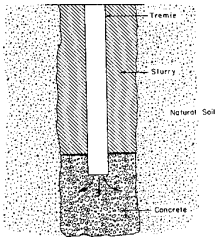
Property to be measured	Test Method and apparatus	API RP13 Section	Compliance values measured at 20 °C	
			As Supplied to pile	Sample from pile prior to placing concrete
Density	Mud balance Low temperature	1	Less than 1.10 g/ml	Less than 1.15 g/ml
Fluid loss (30 minute test)	test fluid loss	3	Less than 40 ml	Less than 60 ml
Viscosity	Marsh Cone	2	30 to 70 seconds (27 - 50)[(1)]	Less than 90 sec. (Less than 60 sec.)[(1)]
Shear strength (10 min gel strength)	Fann Viscometer	2	4 to 40 N/m^2	4 to 40 N/m^2
Sand Content	Sand screen set	4	Less than 2%	Less than 2%
PH	(2)		9.5 - 10.8 (8 - 11)[(1)]	9.5 - 11.7 (<12)[(1)]

หมายเหตุ 1). ตัวเลขในวงเล็บเป็นความเห็นของผู้เขียน 2.) วัดโดย Electrical pH meter แต่ใช้ pH paper แทนได้

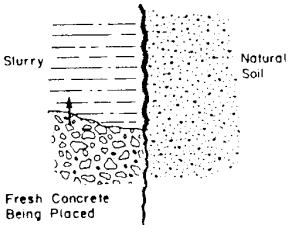
4.1.4. การจับของสารละลายเบนโทไนท์ที่ผนังรูเจาะ

ขณะที่สารละลายเบนโทไนท์สร้างแรงดันต้านไม่ให้รูเจาะพังอยู่นั้นจะมีบางส่วนของสารละลายเบนโทไนท์แทรกซึมเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายในชั้นดินทรายและเหลือเนื้อเบ็นโทไนท์จากสารละลายฯจับตัวกันเป็นก้อน (Filter Cake) ที่ผนังรูเจาะ การก่อตัวและความหนาของ Filter Cake จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาเมื่อปริมาณน้ำหายเข้าไปในดินมากขึ้น Filter Cake ก็จะหนามากขึ้นด้วย หากไม่สามารถขจัดออกได้ในขั้นตอนการเทคอนกรีต ก็จะทำให้ค่าแรงฝืดระหว่างผิวเสาเข็มและผนังรูเจาะลดลง Surface Filtration จะเกิดที่ผิวดินก่อนและแทรกซึมต่อเนื่องเข้าไปอุดช่องว่างในชั้นดินที่ลึกเข้าไปหนาหลายมิลลิเมตรหรืออาจถึงหลายเมตร (Rheological Blocking) เรียกว่า Deep Filtration หลังจากเสร็จสิ้นการเจาะแล้วสารละลายฯในรูเจาะต้องได้รับการทำความสะอาดเพื่อขจัด Filter Cake ที่ผนังรูเจาะและทดสอบคุณสมบัติของสารละลายฯที่เก็บจากก้นหลุมก่อนเทคอนกรีต

หากมีการควบคุมคุณสมบัติอย่างถูกต้องใช้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติดีและเทคอนกรีตผ่านท่อเทอย่างถูกวิธีแล้ว Filter Cake ที่ผิวผนังรูเจาะจะสามารถถูกขจัดออกได้ดังแสดงใน รูปที่ 26 และ 27 แต่หากกระทำผิดขั้นตอนจนทำให้ Filter Cake ตกค้างอยู่จะทำให้ค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณ Filter Cake ที่หลงเหลืออยู่ที่ผิวผนังหลุมเจาะนั่นเอง



รูปที่ 26 การเทคอนกรีตผ่านท่อ Tremie (Reese et al, 1985)



รูปที่ 27 เทคอนกรีต Tremie อย่างถูกวิธีจะสามารถครูด filter cake ออกได้ (Reese et al, 1985)

4.1.5 ผลกระทบอันเนื่องจากเวลาก่อสร้าง

เป็นที่ยอมรับกันว่าหากเวลาในการก่อสร้างเสาเข็มแต่ละต้นสั้นลงมาเท่าใดก็จะได้สมรรถนะของเสาเข็มดีขึ้นเท่านั้นเนื่องจากระยะเวลานาน Filter Cake มีโอกาสก่อตัวได้มากกว่าเวลาที่สั้นดังนั้นในการก่อสร้างต้องเตรียมการให้สามารถก่อสร้างได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วซึ่งได้มีผู้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างต่อแรงเสียดทานผิวไว้ดังนี้

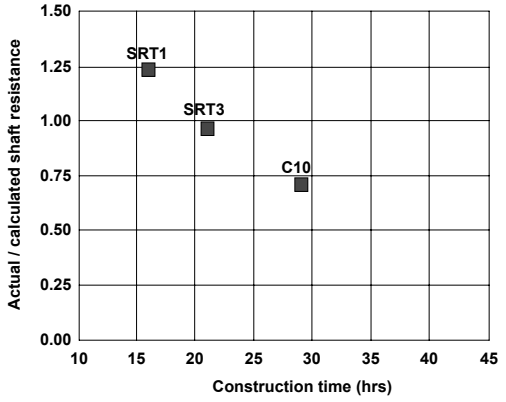
Wates & Knight (1975) ทำการวิจัยและสรุปว่า หากปล่อยให้สารละลายเบ็นโทไนท์อยู่นิ่งๆ โดยไม่ถูกรบกวน (Non Agitation) เป็นเวลานาน Filter Cake จะก่อตัวที่ผนังรูเจาะหนา

Fleming et al (1977) ที่เสนอแนะว่าให้ทำการเทคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกให้แล้วเสร็จภายใน 24 ชั่วโมงหลังการขุดเจาะแล้วเสร็จ ข้อเสนอแนะข้างต้นค่อนข้างตรงกับการปฏิบัติงานจริงในสนามเพราะในขณะทำการขุดเจาะสารละลายเบ็นโทไนท์จะถูกรบกวน (Agitated) ตลอดเวลา ทำให้ Filter Cake ก่อตัวช้าและน้อยหลังการขุดเจาะหรือทำความสะอาดสารละลายฯแล้วเสร็จ Filter Cake จะเริ่มก่อตัวมากเนื่องจากสารละลายฯจะอยู่นิ่งที่เรียกว่า Exposure Time หรือ Contact Time

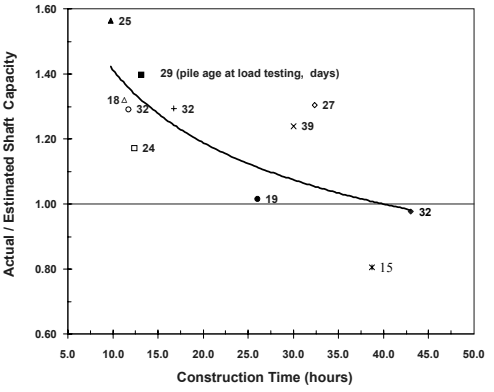
มาตรฐาน ACI 336.1.94 แนะนำว่าไม่ควรปล่อยให้สารละลายฯในรูเจาะอยู่นิ่ง ๆ โดยไม่มีการกวน (Non Agitation) นานเกินกว่า 4 ชั่วโมง หากเวลาระหว่างการขุดเจาะแล้วเสร็จจนถึงเวลาเริ่มเทคอนกรีตนานเกิน 24 ชั่วโมง ต้องทำการขุดคว้านรูเจาะใหม่เพื่อครูด Filter Cake ให้หลุดออกแล้วทำความสะอาดสารละลายฯ จากนั้นตรวจสอบคุณสมบัติสารละลายฯที่ก้นหลุมและปรับปรุงคุณสมบัติใหม่อีกครั้งให้ตรงตามข้อกำหนดก่อนทำการเทคอนกรีตจึงจะทำให้ได้แรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มกับผิวรูเจาะดีขึ้น

สำหรับผลกระทบเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะใช้ชั้นดินกรุงเทพฯ นั้นได้มีผู้ทำการศึกษามาบ้างเช่น Littlechild et al (1988a) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะต่อแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มในโครงการ Hopewel ซึ่งจากผลการศึกษาได้สรุปไว้ว่าถ้าเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเกินกว่า 24 ชั่วโมงจะทำให้กำลังรับแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะลดลง (รูปที่ 28) อีกทั้งได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของ Viscosity ต่อกำลังรับแรงเสียดทานที่ผิว ซึ่งได้สรุปไว้ว่าถ้า Viscosity มีค่ามากกว่า 35 sec/quartแล้วจะทำให้แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มลดลงเช่นกัน ในโครงการนี้จึงได้มีการกำหนดไว้ว่าเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแต่ละต้นจะต้องไม่มากกว่า 24 ชั่วโมงและ Viscosity จะต้องไม่มากกว่า 35 sec/quart ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการกล่าวถึงการคว้านรูเจาะใหม่หรือการควบคุมไม่ให้สารละลายฯ ในหลุมเจาะอยู่นิ่ง ๆ นานกว่า 4 ชั่วโมงแต่อย่างใด

อีกงานวิจัยหนึ่งเป็นของผู้เขียน ซึ่งผู้เขียนได้รวบรวมผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะจำนวน 11 ต้นก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่มีการติดอุปกรณ์วัดแรง (VWSGs และ Extensometer) มาศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อสร้างที่ยาวขึ้นกว่า 40 ชั่วโมงจะทำให้ค่าแรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลงกว่าที่ออกแบบไว้ตามรูปที่ 29 และในการวิจัยดังกล่าวพบว่าค่า Viscosity ของสารละลายฯที่ใช้หากมีค่าไม่เกิน 60 sec/quart จะไม่มีผลกระทบกับความสามารถในการรับน้ำหนักทางผิวของเสาเข็มแต่อย่างใดซึ่งเสาเข็มเจาะทั้ง 11 ต้นนี้ก่อสร้างโดยไม่มีการปล่อยให้สารละลายฯอยู่นิ่ง ๆ นานเกิน 4 ชั่วโมงหรือถ้าเวลาก่อสร้างเกินกว่า 24 ชั่วโมงก็จะทำการเจาะคว้านใหม่ก่อนการลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีต สิ่งหนึ่งที่ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานควรถือเป็นเรื่องสำคัญคือก่อนทำการเทคอนกรีตจะต้องเก็บตัวอย่างของสารละลายฯเบ็นโทไนท์จากก้นหลุมเจาะขึ้นมาทดสอบทุกครั้ง หากคุณสมบัติของสารละลายฯ ที่เก็บมาทดสอบมีค่าไม่ได้ตามข้อกำหนดจะต้องทำการปรับเปลี่ยนใหม่ให้ได้ก่อนเทคอนกรีตทุกครั้ง จึงจะได้เสาเข็มที่มีสมรรถนะที่ดี



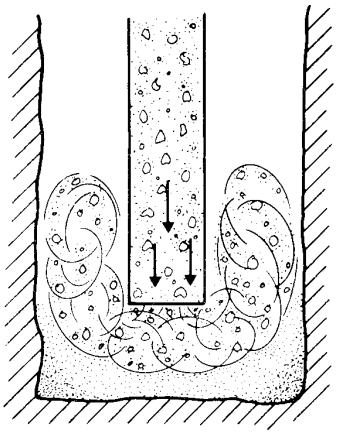
รูปที่ 28 Performance of plain bentonite piles versus construction time (Littlechild et al, 1998a)



รูปที่ 29 Effect of construction time on shaft capacity of bored piles. (Thasnanipan et al, 1998)

4.1.6 การทำความสะอาดก้นหลุมและทดสอบสารละลายฯ

การเจาะดินจะมีเศษดินและตะกอนตกสะสมที่ก้นหลุมและสารละลายฯจะข้นเหนียวไม่เหมาะที่คอนกรีตจะแทนที่ได้หมด จึงต้องทำความสะอาดก้นหลุมอาจใช้ Cleaning Bucket หรือระบบ Recycle (Air Lift) เพื่อแยกตะกอนดินทรายออกจากสารละลายฯและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายฯที่ก้นหลุมขึ้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ขั้นตอนนี้สำคัญเพราะหากก้นหลุมไม่สะอาดหรือสารละลายฯเหนียวหนักเกินไปคอนกรีตจะไล่แทนที่สารละลายฯได้ไม่หมด (รูปที่ 30) ทำให้แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มลดลงหรืออาจเกิด Soft toe การทำความสะอาดนี้เป็นขั้นตอนสำคัญไม่สามารถลัดขั้นตอนได้ แต่เป็นที่น่าเสียดายและน่าอันตรายที่พบว่ายังมีผู้ประกอบการหลายรายทั้งจากท้องถิ่นและจากต่างประเทศก่อสร้างลัดขั้นตอนโดยละเว้นไม่ปฏิบัติในขั้นตอนนี้ ทำให้พบว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างแล้วมีสมรรถนะในการรับน้ำหนักต่ำกว่าปกติ

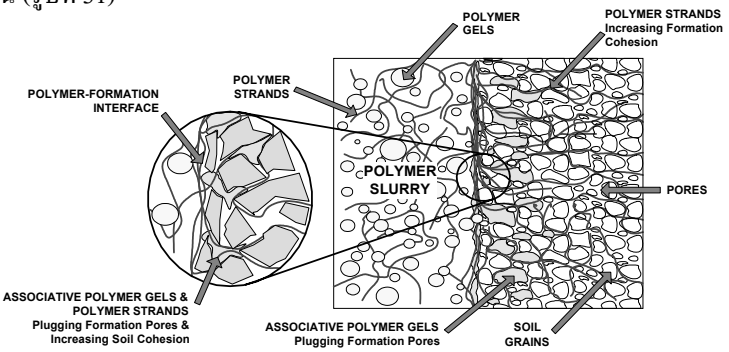


รูปที่ 30 ก้นหลุมตะกอนหนาคอนกรีตแทนที่ไม่หมด (Flemming et al, 1977)

5.2 สารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Slurry)

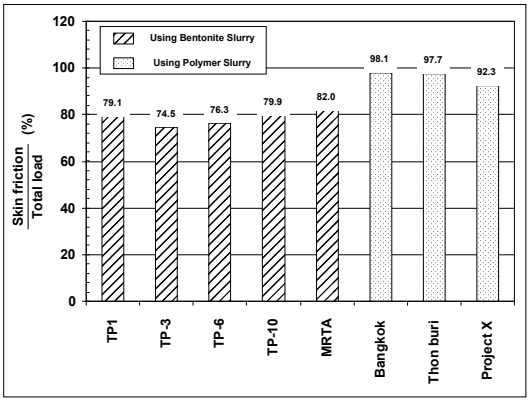
แม้นสารละลายเบ็นโทไนท์จะมีข้อดีอยู่มากมายหลายประการแต่สารละลายเบ็นโทไนท์มีข้อเสียคือก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเบ็นโทไนท์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้และอนุภาคของเบ็นโทไนท์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาด้านฝุ่นละออง เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเอาโพลิเมอร์มาใช้ เพราะโพลิเมอร์เป็นสารประเภท Hydrocarbon ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจึงได้มีการทำสารละลายโพลิเมอร์มาใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในหลายๆ โครงการ (ณรงค์, เผด็จ, และพรพจน์, 2543ข) สารละลายโพลิเมอร์มีกลไกในการ

รักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะโดยใช้เส้นใย (Strand) และ Gel เข้าไปอุดช่องว่างในดินและทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินดีขึ้น (รูปที่ 31)

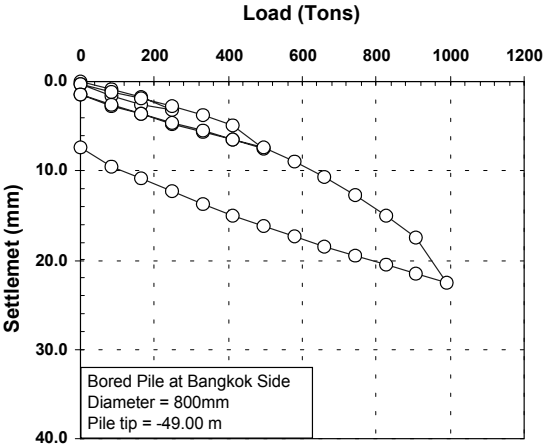


รูปที่ 31 หลักการของสารละลายโพลีเมอร์ในการรักษาเสถียรภาพของหลุม

จากผลการทดสอบหลายโครงการพบว่าค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มมีแนวโน้มสูงกว่าเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ (รูปที่ 32) จะเห็นได้ว่าสัดส่วนแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะที่ใช้โพลิเมอร์จะค่อนข้างสูงกว่าเสาเข็มเจาะที่ใช้เบนโทไนท์ รูปที่33เป็นผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างของโครงการก่อสร้างสะพานยกระดับรับสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ในการใช้สารละลายโพลีเมอร์ข้อสำคัญที่ควรระวังก็คือจะต้องศึกษาชั้นดินแต่ละแห่งอย่างละเอียดว่ามีความเหมาะสมที่จะนำโพลิเมอร์มาใช้หรือไม่เพราะในชั้นดินที่เป็นทรายหยาบจะเกิดปัญหา High Fluid Loss และสารละลายโพลิเมอร์จะมี Density ต่ำกว่าสารละลายเบ็นโทไนท์ทำให้แรงดันของสารละลายฯในหลุมเจาะจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันจากสารละลายเบนโทไนท์



รูปที่ 32 สัดส่วนของแรงเสียดทานที่ผิวต่อน้ำหนักบรรทุกทดสอบของเสาเข็มเจาะที่ใช้เบ็นโทไนท์ กับเสาเข็มเจาะที่ใช้โพลิเมอร์



รูปที่ 33 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะโดยใช้โพลีเมอร์ ขนาด 800mm ลึก 47 เมตร (ฉรงค์ และคณะ, 2543ข)

5. คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะ

การรับน้ำหนักของเสาเข็มน้ำหนักจะถ่ายลงสู่หัวเข็มโดยตรงก่อนแล้วจึงถ่ายต่อไปสู่ดินในรูปของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ส่วนที่เหลือจึงถ่ายผ่านลงสู่ปลายเสาเข็มในรูปของแรงเสียดทานที่ปลายเสาเข็ม Fleming และ Slewinski (1977) ได้แนะนำคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตสำหรับใช้เทในงานเสาเข็มเจาะเปียกภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินสภาพปกติ (Normal Soil Conditions) ตั้งแต่ปี 1977 ซึ่งยังใช้ได้ดีจนถึงปัจจุบันตามตารางที่4 และ Bartholomew (1979) ได้แนะนำขนาด Cement Content และ Water Cement Ratio ของคอนกรีตสำหรับใช้ในงานเสาเข็มชนิดต่างๆ เพื่อใช้ก่อสร้างในชั้นดินในสภาวะตั้งแต่ธรรมดา (Normal) ถึงสภาวะที่ผิดปกติอย่างรุนแรง (Highly very highly agressive) ซึ่งในกรณีหลังส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินที่มีน้ำใต้ดินไหลผ่านหรือมีสารเคมีปนเปื้อนในชั้นดินเป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 Suggested Concrete Mix for Bored Piles Cast under Bentonite (After Fleming & Sliwinski 1977)

Slump	>175 mm.
Water/Cement	Below 0.6
Aggregate Type	Natural round stone if possible, 20 mm. max. size
Sand Type	Natural and complying with zone 2 or 3 grading
Sand Content	30% to 45% of total aggregate weight
Cement Content	Not less than 400 kg./m^3
Admixture	The use suitable admixture which will improve the workability and extend the period during which such workability is maintained are to be advocated.

ตารางที่ 5 Range of Cement Content and Water Cement Ratio in General use for Concrete Mixes (After Bartholomew 1979)

Pile Type	Cement	Conditions		
		Normal	Moderately Aggressive	Highly and Very Highly Aggressive
Precast	Content (kg/m^3)	450-475	450-475	450-475
	w/c	0.4 - 0.5	0.4	0.4
Bored Piles Dry Process	Content (kg/m^3)	300-450	350-450	380-500
	w/c	0.5 - 0.55	0.475 - 0.5	0.45 - 0.5
Bored Piles with Tremie Process	Content (kg/m^3)	350-450	350-450	400-500
	w/c	0.5 - 0.6	0.475 - 0.5	0.43 - 0.45
Driven Cast-In-Situ Piles	Content (kg/m^3)	280-370	330-450	370-500
	w/c	0.25 - 0.6	0.3 - 0.55	0.3 - 0.45

5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียก

Reese และ O' Neil (1988) ได้แนะนำคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะระบบเปียกเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ไว้ว่าจะต้องมีคุณสมบัติครบถ้วนเจ็ดประการต่อไปนี้คือ

- เคลื่อนไหลได้ดี (Excellent Fluidity)
- สามารถอัดแน่นได้ดีภายใต้น้ำหนักตัวเอง (Self Compaction under Self Weight)
- ทนทานต่อการแยกตัว (Resistance to Segregation)
- ควบคุมเวลาการก่อตัวได้ (Controlled Setting)
- ทนทานต่อภาวะแวดล้อมที่กระด้าง (Resistance to Hash Environment)

- ทนทานต่อการถูกชะล้าง (Resistance to Leaching)
- มีความแข็งแรง (Appropriate Strength and Stiffness)

ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานในสนามส่วนใหญ่ จะพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตจากผลการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test), ระยะเวลาการหน่วงการแข็งตัว (Retardation Time) และกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) เป็นเกณฑ์ ซึ่งความจริงแล้วการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตอาจบอกถึงความสามารถในการเทได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น แต่จะไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงการเกาะตัวและความทนทานในการแยกตัว (Cohesiveness และ Resistance to Segregation) ของคอนกรีตได้เลย ทำให้การเทคอนกรีตเสาเข็มระบบเปียกภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์อาจเกิดปัญหาขึ้นได้ ทั้งในขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่และแข็งตัวในภายหลังแล้ว

5.1.1ปัญหาที่เกิดขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่

มักจะพบว่าผู้ขายคอนกรีตผสมเสร็จ ส่งคอนกรีตที่เหลวและมีลักษณะที่อาจเกิดการแยกตัวง่าย ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อเทคอนกรีตเสร็จแล้วจะมีน้ำเยิ้ม (Bleeding) ขึ้นสู่ผิวด้านบนมาก (รูปที่34) ซึ่งการเยิ้มนี้จะเกิดจากการจมตัวของเม็ดหิน, ทราย และซีเมนต์ขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่ทำให้ความผันแปรในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) ของส่วนผสมของคอนกรีตสดด้านล่างมีอัตราส่วนต่ำสุด และจะสูงสุดที่ส่วนบนของคอนกรีตที่เทลงไปทำให้คอนกรีตเกิดการพรุนและทำให้การซึมผ่านของน้ำแข็งสู่คอนกรีตสูง (High Permeability) และในกรณีที่เกิดการเยิ้มมากแล้วคอนกรีตในท่อเท (Tremie Pipe) ที่ระดับล่างถูกอัดแน่นด้วยน้ำหนักของคอนกรีตส่วนบนและน้ำจะถูกดันขึ้นสู่ด้านบนภายในท่อเทจนทำให้คอนกรีตเกิดติดขัด (Blocked) และไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้ (รูปที่35)



รูปที่34 รูปการเยิ้มที่หัวเสาเข็มเนื่องจากส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่เหมาะสม (Thorborn et al 1977)



รูปที่ 35 คอนกรีตติดขัดในท่อเนื่องจากความผันแปรของคอนกรีตสด

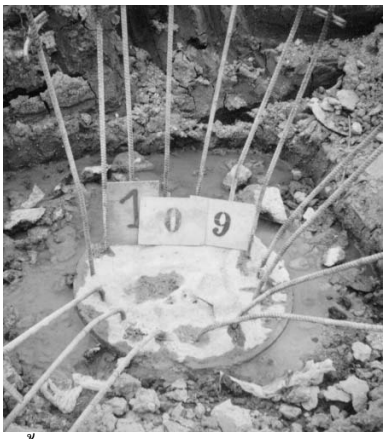
Slewinski & Fleming (1982) ได้เคยรายงานไว้ว่าสาเหตุที่เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ที่เกิดขึ้นที่หัวเสาเข็มเจาะจะทำให้เกิดช่องทางการเยิ้มเกิดขึ้นมาตามแนวเหล็กเสริมเสาเข็มยืนหรือตามบริเวณตำแหน่งท่อเท (Tremie) จนทำให้เป็นช่องทางของน้ำภายนอกซึมผ่านขึ้นมาภายหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วได้

นอกจากปัญหาการเยิ้มของคอนกรีตสดแล้ว ผู้ออกแบบและเจ้าของโครงการหรือผู้ว่าจ้างควรทำการสำรวจหาข้อมูลสภาพชั้นดินนอกเหนือจากการหาค่ากำลังของดินตามปกติโดยควรทำการสำรวจหาข้อมูลระดับน้ำและสภาพช่องทางไหลและความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดินเพื่อกำหนดปริมาณซีเมนต์ (Cement Content) และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) ตามที่ Bartholomew (1977) ได้แนะนำไว้ให้เหมาะสมกับสภาพชั้น

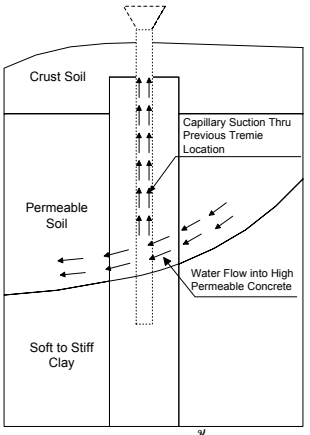
ดินในแต่ละแห่งเนื่องจากคอนกรีตสดอาจถูกทำลายโดยสภาวะแวดล้อมใต้ดินที่ผิดปกติ (Aggressive Subsurface Condition) ซึ่งเคยมีตัวอย่างที่เคยเกิดขึ้นในต่างประเทศมาแล้วดังตัวอย่างต่อไปนี้

Thorburn & Thorburn, (1979) รายงานว่าในโครงการหนึ่งที่ทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่น้ำสามารถไหลผ่านได้ (Permeable Material) เมื่อผู้รับเหมาเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะเสร็จแล้วและทำการชักปลอกเหล็กชั่วคราวออกปรากฏว่ามีฝนตกหนักอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ภายหลังเมื่อทำการขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานรากพบว่าคอนกรีตส่วนบนได้ถูกน้ำชะล้างและกร่อนโดยน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านตัวเสาเข็มในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัว และในอีกโครงการหนึ่งที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะบริเวณที่เป็นทางระบายน้ำเก่าที่ถูกถมด้วยทรายที่ยังสามารถรองรับน้ำที่ไหลมาจากพื้นที่โดยรอบได้ทำให้คอนกรีตเสาเข็มหลังจากที่หล่อเสร็จแล้วขณะที่ยังไม่แข็งตัวถูกน้ำใต้ดินไหลผ่านอย่างรวดเร็วชะล้างกร่อนจนเสียหายเป็นจำนวนมาก

Reese & O'Neil (1988) พบว่าเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างในบริเวณระดับน้ำใต้ดินขึ้น-ลงได้ จะทำให้น้ำใต้ดินเคลื่อนไหลผ่านตรงบริเวณรอยต่อของชั้นดิน ทำให้คอนกรีตขณะที่ยังไม่แข็งตัวถูกชะล้าง (Leaching) จนทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตตัวเสาเข็มได้ โดยน้ำจะค่อยๆ ซึมผ่านช่องว่างหรือรูพรุนในคอนกรีตขึ้นสู่ด้านบนของหัวเสาเข็ม ซึ่งกรณีดังกล่าวได้เคยเกิดขึ้นกับเสาเข็มเจาะก่อสร้างริมแม่น้ำเจ้าพระยามาแล้วหลายโครงการ (รูปที่36) และคาดว่าขบวนการซึมของน้ำเป็นไปตาม รูปที่37 อันเนื่องจากคอนกรีตเสาเข็มมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูง (High Permeability)



รูปที่ 36 น้ำซึมตามแนวเหล็กเสริมและแนวท่อเท



รูปที่ 37 ขบวนการซึมของน้ำเข้าสู่คอนกรีตเสาเข็ม

5.1.2 ปัญหาหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

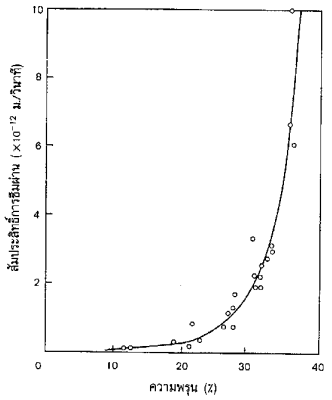
เสาเข็มเจาะก่อสร้างในชั้นดินที่มีสภาวะผิดปกติ (Aggressive Subsurface Condition) แม้นไม่เกิดความเสียหายในขณะที่ยังไม่แข็งตัวก็ตามหากออกแบบส่วนผสมที่ไม่เหมาะสมและป้องกันคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วอย่างไม่พอเพียง ก็อาจทำให้คอนกรีตเสาเข็มไม่มีความคงทนและถูกกัดกร่อนเสียหายได้ ซึ่งมีผู้ศึกษาเรื่องคอนกรีตไว้ดังนี้คือ

Fleming et al, (1992) ได้รายงานให้ทราบว่าประเทศทางตะวันออกกลางมีน้ำใต้ดินที่เค็มมาก (Highly Saline Ground Water) จึงกำหนดวิธีการป้องกันกรดเกลือกัดกร่อนทำลายคอนกรีตเสาเข็มโดยการใส่ปลอกพลาสติกถาวรหุ้มคอนกรีตเสาเข็มส่วนบนไว้

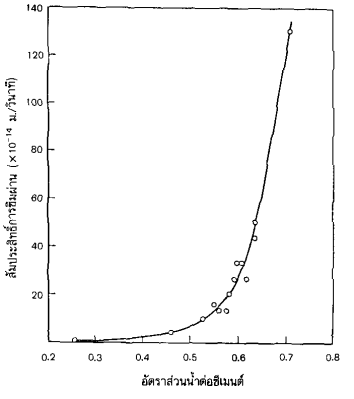
5.2 การซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต (Permeability)

ชัชวาลย์, (2536) รายงานไว้ว่าความทนทาน (Durability) ของคอนกรีตซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากมักจะถูกมองข้าม และสิ่งก่อสร้างคอนกรีตจำนวนมากที่ถูกออกแบบและก่อสร้างโดยไม่คำนึงความทนทานจึงส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมากในปัจจุบัน และปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อความทนทานของคอนกรีตนั้นคือ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต (Permeability) และขบวนการซึมผ่านของน้ำ ความชื้นและอากาศสู่คอนกรีต

ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานเสาเข็มเจาะส่วนใหญ่มักจะมองข้ามปัญหาเรื่องความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต ที่จริงแล้วผู้ออกแบบควรกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไว้ในรายการด้วยเพราะความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำสู่คอนกรีต (Permeability) ไม่สามารถทดสอบได้ในสนามแต่สามารถวัดได้ในห้องทดลองและจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าคอนกรีตนั้นๆ จะทนทานมากน้อยเพียงใด ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะถูกควบคุมโดยความพรุนของซีเมนต์เพสต์ (รูปที่38) และความพรุน (Capillary porosity) จะมีมากน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำทับซีเมนต์ (W/C Ratio) และความสมบูรณ์ของไฮเดรชั่น (Degree of Hydration) โดยทั่วไปหากปฏิกริยาไฮเดรชั่นเกิดโดยสมบูรณ์และW/C Ratio ต่ำกว่า 0.6 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะต่ำ (รูปที่39)

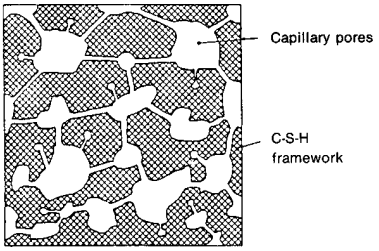


รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำกับความพรุนของคอนกรีต (ชัชวาลย์ 2536)

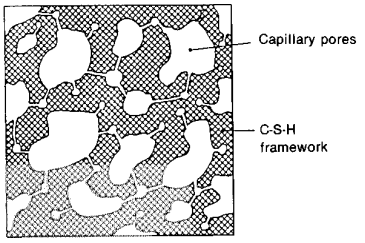


รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของน้ำต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (ชัชวาลย์, 2536)

อย่างไรก็ตามความสามารถการซึมผ่านของน้ำไม่ใช่สัดส่วนโดยตรงกับความพรุนแต่ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของ Capillary Pore หากมีการเชื่อมต่อกันเป็นแบบ Inter Connection Void (รูปที่40) จะเกิดการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าแบบที่แยกจากกัน (รูปที่41) นอกจากนั้นแล้วสภาวะการอัดแน่นของคอนกรีตก็เป็นส่วนประกอบสำคัญคอนกรีตเสาเข็มเจาะ จึงต้องออกแบบให้เป็น Full Self Compaction



รูปที่ 40 การซึมผ่านของน้ำสูง-เนื่องจาก Capillary Pore เชื่อมต่อกัน (ชัชวาลย์ 2536)



รูปที่ 41 การซึมผ่านของน้ำต่ำ-เนื่องจาก Capillary Pore แยกจากกัน (ชัชวาลย์ 2536)

5.3 ขบวนการซึมผ่านของน้ำในเนื้อคอนกรีต

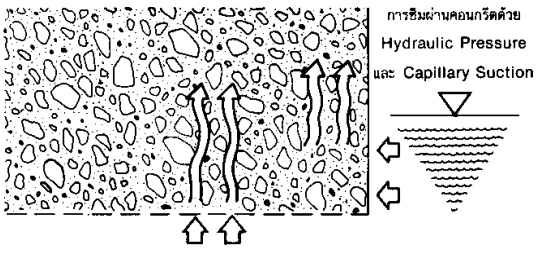
คอนกรีตเสาเข็มที่เกิดความเสียหายหรือขาดความทนทานส่วนใหญ่จะมาจากกรณีน้ำซึมผ่านช่องว่างที่ต่อเนื่อง (Inter Connection Void) หรือจากรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยน้ำที่ซึมผ่านนี้จะนำพาสารที่อาจเป็นตัวทำลายคอนกรีตเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เมื่อมีปริมาณที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเสาเข็ม ขบวนการนี้มักจะเกิดกับเสาเข็มที่ก่อสร้างในบริเวณชั้นดินประเภท Permeable Material ที่มีน้ำขังหรือไหลผ่านขึ้น-ลงไปมา การซึมผ่านของน้ำมีสองลักษณะคือ

5.3.1 แบบ Hydraulic Permeability

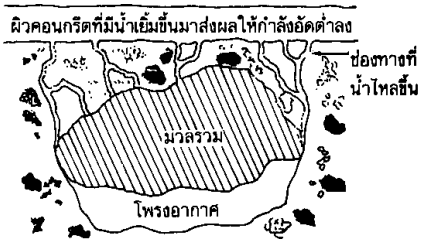
เกิดขึ้นเมื่อแรงดันด้านหนึ่งของโครงสร้างสูงกว่าอีกด้านหนึ่งเช่นห้องใต้ดิน, ถังเก็บน้ำ, สระว่ายน้ำ เป็นต้น โดยน้ำจะซึมจากด้านที่มีความดันสูงกว่าสู่ด้านที่ต่ำกว่า

5.3.2 แบบ Water Absorbed by Capillary Action

เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำจะค่อยๆ ซึมผ่านช่องว่างในคอนกรีตชนิด Inter Connection Void (รูปที่ 42) และ Inter Connection Void มักจะเกิดขึ้นจากคอนกรีตที่ใช้น้ำมากเกินไป น้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หินและบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีตด้านบน (รูปที่43) ซึ่งก็คือการเกิดการเยิ้ม (Bleeding) นั่นเอง



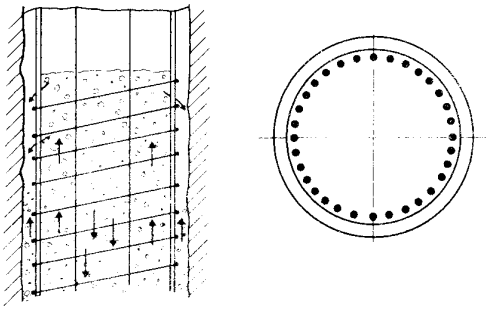
รูปที่ 42 ลักษณะการซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต (ชัชวาลย์ 2536)



รูปที่ 43 การจมตัวของหินทรายปูนซีเมนต์เป็นผลให้เกิดการเยิ้ม (ชัชวาลย์, 2536)

6. เหล็กเสริมเสาเข็ม

ปริมาณเหล็กเสริมในเสาเข็มขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรากกล่าวคือหากรับแรงกดอย่างเดียว เหล็กเสริมยืนจะใช้ประมาณ 0.5% ของหน้าตัดเสาเข็ม หากต้องรับโมเมนท์ดัด หรือแรงดันด้านข้าง ปริมาณเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับการคำนวณ อย่างไรก็ดีปริมาณเหล็กเสริมยืนไม่ควรมีปริมาณเกิน 1% ของหน้าตัดเสาเข็มเพราะหากปริมาณมากเกินไป เมื่อเทคอนกรีตใต้น้ำผ่านท่อเทคอนกรีตอาจไหลผ่านเหล็กเสริมยืนออกไปไม่ได้ ทำให้เหล็กเสริมไม่มีคอนกรีตหุ้ม (รูปที่ 44)



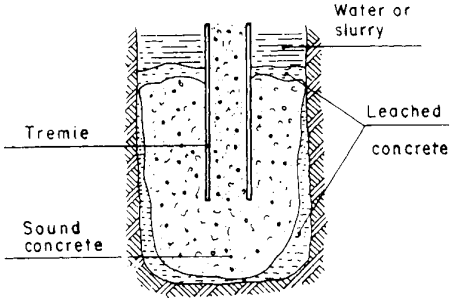
รูปที่ 44 เหล็กเสริมที่มีปริมาณมากเกินไป (Flemming et al, 1977)

7. การควบคุมการเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผ่านท่อเท

การเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผ่านท่อเท (Tremie Concrete) เป็นขั้นตอนที่สำคัญสูงสุดเพราะเป็นการหล่อผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งาน (End Product) หากควบคุมการเทคอนกรีตไม่ดีและผิดขั้นตอนจะทำให้ความสมบูรณ์ (Integrity) ของเสาเข็มเสียหายและสมรรถนะในการรับน้ำหนักลดลงปัญหาต่างๆ ในการเทคอนกรีตใต้น้ำสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

7.1 เทคอนกรีตครั้งแรก (First Batch) ทะลุตัวกันน้ำ (Plug) ทำให้คอนกรีตผสมกับสารละลายฯโดยตรง

7.2 วางปลายท่อห่างจากก้นหลุมมากเกินไป ทำให้คอนกรีตก้นหลุมผสมกับสารละลายเบ็นโทไนท์ (รูปที่ 45)



รูปที่ 45 ปลายท่อห่างก้นหลุมมากเกินไป (Reese et al, 1985)

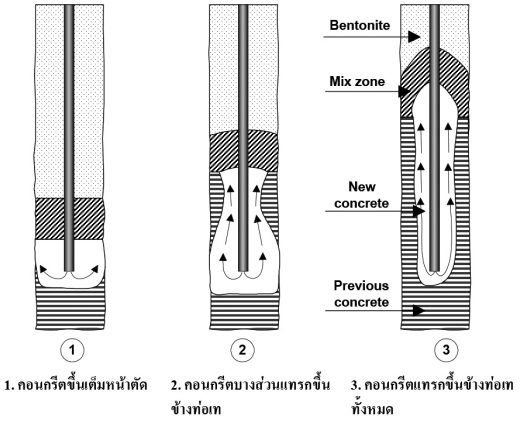
7.3 รอยต่อท่อเทรั่ว ทำให้ไหลเข้าสะสมในท่อเท อาจทำให้คอนกรีตในท่อแยกตัว

7.4 ไม่มีการทำความสะอาดสารละลายฯในหลุมเจาะแลไม่มีการเก็บตัวอย่างสารละลายฯที่ก้นหลุมมทดสอบก่อนเทคอนกรีตทำให้ไม่สามารถทราบสถาวะของหลุมเจาะอันอาจทำให้เกิดปัญหาติดตามมาเช่นมีตะกอนก้นหลุมมาก , ปริมาณทรายสูง, Filter Cake หนา ฯลฯ ทำให้เสาเข็มด้อยคุณภาพ สมรรถนะในการรับน้ำหนักได้ต่ำ

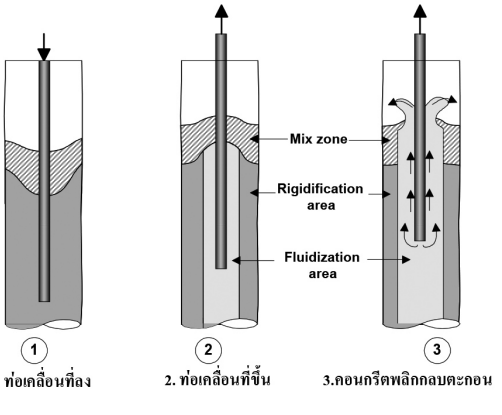
7.5 ระหว่างการเทคอนกรีตฝังปลายท่อในคอนกรีตลึกมากเกินไป ทำให้คอนกรีตที่ไหลออกจากปลายท่อไม่สามารถดันคอนกรีตชุดเก่าขึ้นเติมหน้าตัดรูเจาะ ทำให้คอนกรีตชุดหลังแทรกตัวขึ้นรอบๆ ท่อเทเท่านั้นทำให้ครูด filter cake ไม่ออกและกลบทับสิ่งสกปรกหน้าผิวคอนกรีต (รูปที่46)

7.6 ชักปลายท่อเทพ้นผิวหน้าคอนกรีตทำให้เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง

7.7 ทำการชักท่อเทขึ้นๆ ลงๆ (Jarring) ทำให้สารละลายฯแทรกลงข้างท่อหรือคอนกรีตพลิกกลับ (รูปที่ 47)



รูปที่46 ปลายท่อเทฝังในคอนกรีตลึกมากเกินไป

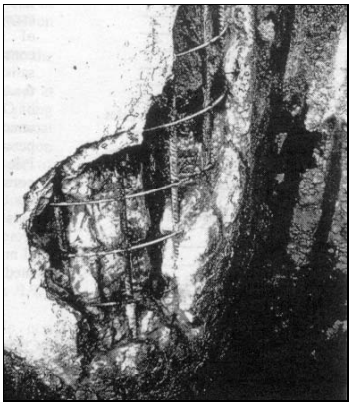


รูปที่47 การชักท่อเทคอนกรีตขึ้น ๆ ลง ๆ เป็นการเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผิดวิธี

7.8 ตะกอนก้นหลุมมากและผสมกับคอนกรีตทีเทชุดแรกและไล่ตะกอนขึ้นไม่หมด ทำให้กำลังแบกทานปลายเสาเข็มลดลง

7.9 ตะกอนก้นหลุมมาก ผสมกับคอนกรีตที่เทชุดแรกและถูกดันขึ้นมาข้างบนบางส่วนอาจติดค้างโครงเหล็ก (รูปที่ 48)

7.10 คอนกรีต Workability ไม่ดี อาจมาจากส่วนผสมผิด, รูปร่างหินแบนมาก, ทำให้เทแล้วไม่ลื่นไหลหรือไหลไม่เต็มหน้าตัดเสาเข็ม ทำให้สารละลายฯแทรกตัว, คอนกรีตที่มีน้ำส่วนเกินเยิ้มออกมามากทำให้คอนกรีตแยกตัว ดังรูปที่ 49



รูปที่ 48 โพรงเกิดจากตะกอนดินติดค้างบนโครงเหล็ก



รูปที่ 49 คอนกรีตที่เกิดการแยกตัว

7.11 คอนกรีตมี Slump ต่ำไป ทำให้ Flowability ไม่ดี

7.12 มีระยะเวลาหน่วงการแข็งตัวน้อยไปคอนกรีตเกิดกระด้าง (Stiff) หรือแข็งตัว (Initial Set) ก่อนเทคอนกรีตเสร็จ ทำให้เสาเข็มเสียหาย

8. เสาเข็มเจาะอัดน้ำปูน (Grouted Bored Pile)

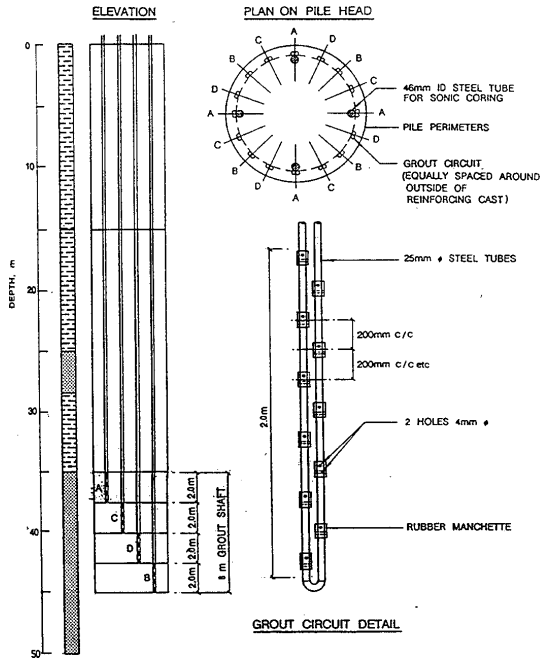
เนื่องจากวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะไม่ว่าระบบใดก็ตามจะมีผลทำให้ผิวดินรอบหลุมเจาะมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงเนื่องจากสาเหตุหลายประการคือ

- เกิดการหลวมตัว (Soil relaxation) ในดินรอบหลุมเจาะและที่ก้นหลุมเจาะ
- การขุดดินออกเท่ากับเป็นการลด Overburden Pressure ของดินกับทรายทำให้เกิด Stress Refief
- ดินทรายก้นหลุมเจาะถูกกระทบกระเทือน (Disturbed)

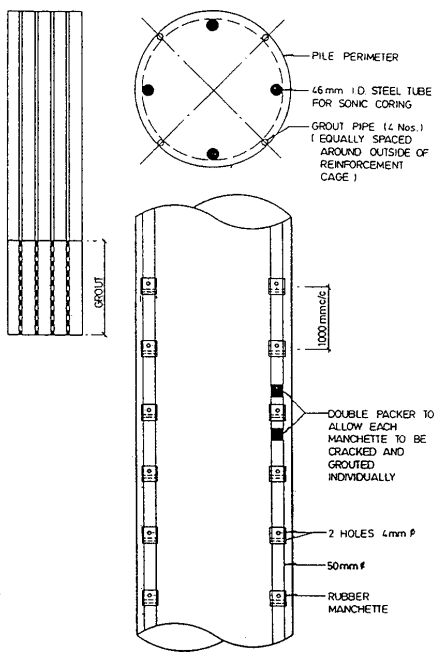
จึงทำให้เกิดวิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวและปลายเสาเข็มเพื่อลดปัญหาดังกล่าวข้างต้นลงได้ การอัดฉีดน้ำปูนทำให้เสาเข็มรับน้ำหนักได้มากขึ้น และพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มดีขึ้น วิธีการอัดฉีดน้ำปูนมีทั้งอัดฉีดที่ปลายเสาเข็ม และที่ผิวเสาเข็ม

8.1 การอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวเสาเข็ม (Shaft grouted bored piles)

ได้มีการนำเอาการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวมาใช้ครั้งแรกในโครงการ Hopewell (ซึ่งได้เปลี่ยนชื่อเป็น BERTS 'ในปัจจุบัน) เป็นครั้งแรกโดยมีการจัดเรียงท่ออัดฉีดน้ำปูนดังแสดงใน รูปที่ 50 และ 51

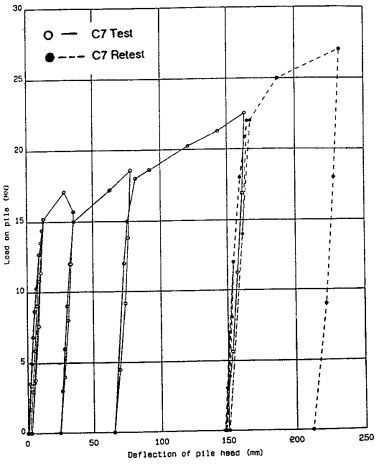


รูปที่ 50 Arrangement of initial shaft grout circuit detail (Littlechild et al, 1998b)



รูปที่ 51 Arrangements of final shaft grout detail (Littlechild et al, 1998b)

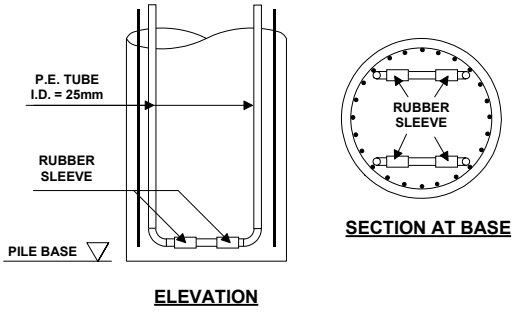
ในโครงการดังกล่าวได้มีการทดสอบเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวทั้งในขณะก่อสร้างและทดสอบซ้ำในเวลาหนึ่งปีให้หลัง พบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่หนึ่งปีให้หลังไม่ลดลงแต่อย่างใดดังแสดงใน รูปที่ 52



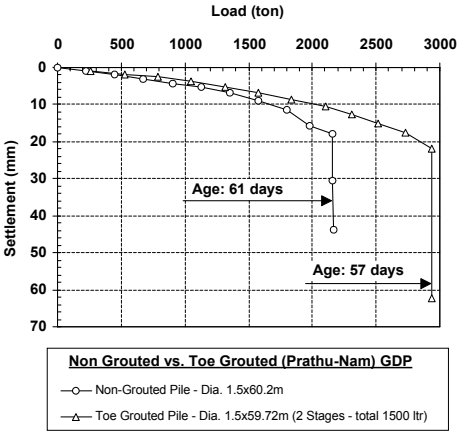
รูปที่ 52 Load versus pile head movement for pile shaft grouted in sand showing initial and reload test loading (Littlechid et al, 1998b)

8.2 การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base grouted bored piles)

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ได้มีการดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 ในโครงการก่อสร้างสะพานแขวนพระราม 9 และต่อมาอีกหลายโครงการ การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มส่วนใหญ่จะใช้ระบบท่อแบบ Tube-A-Manchette รูปที่ 53 และได้มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเปรียบเทียบกับเสาเข็มเจาะที่ไม่ได้มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มซึ่งก่อสร้างในหน่วยงานเดียวกันพบว่าเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักดีกว่ามากดังแสดงใน รูปที่ 54



รูปที่ 53 ตำแหน่งท่ออัดฉีดน้ำปูนในระบบ Tube-A-Manchette (ณรงค์, 2540)



รูปที่ 54 การทดสอบเสาเข็มเปรียบเทียบในหน่วยงานเดียวกัน (ณรงค์, 2540)

9. การทดสอบเสาเข็ม

9.1 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก

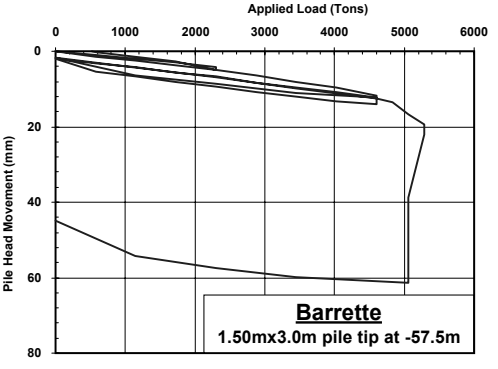
เสาเข็มเจาะที่ออกแบบไว้เมื่อจะลงมือก่อสร้างอาจทำการทดสอบก่อน (Preliminary pile load test) เพื่อนำผลมาออกแบบหรืออาจทดสอบในภายหลัง (หากแน่ใจ) เพื่อยืนยันความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การทดสอบสามารถดำเนินการได้ 2 วิธีคือ

9.1.1 การทดสอบแบบสถิตศาสตร์ (Static Load Testing)

โดยทั่วไปจะทำการทดสอบโดยใช้เสาสมอรั้ง (Anchor piles) จำนวน 4 ต้นและใช้แม่แรง Hydraulic เป็นจุดกำเนิดแรงดันระหว่างหัวเสาเข็มกับคานปฏิกิริยา (Reaction Frame) เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักในแต่ละขั้นตอนก็ทำการวัดค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็มโดยใช้ Dial Gauge และในการทดสอบบางโครงการอาจมีการติดตั้ง Instruments ในตัวเสาเข็มไว้ด้วยเพื่อใช้วัดค่าแรงที่เกิดขึ้นในตัวเสาเข็มเพื่อนำมาใช้ยืนยันการออกแบบ และใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบในอนาคตต่อไป ในปัจจุบันได้มีการทดสอบด้วยวิธีนี้จนถึงน้ำหนักทดสอบกว่า 5,000 ตัน แล้วดังแสดง ในรูปที่ 55 และ รูปที่ 56



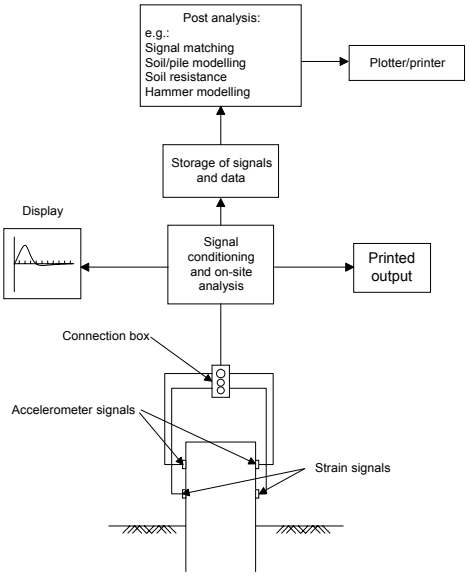
รูปที่ 55 Test frame ของ Barrette ขนาด 1.5x3.0 ลึก 57.0 เมตร



รูปที่ 56 ผลทดสอบการรับน้ำหนักของ barrette

9.1.2 การทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load Testing)

การทดสอบชนิดนี้มีความคล่องตัวสูง ราคาประหยัด และกำลังได้รับความนิยมในการยืนยันการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มข้อเสียของระบบนี้คือความคลาดเคลื่อนของการทดสอบอาจสูงถึง 30% ได้ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและความชำนาญของผู้ทำการทดสอบ การทดสอบกระทำโดยกระแทกน้ำหนักบนหัวเสาเข็ม และจับความเร็วของคลื่นความสั่นสะเทือนในตัวเสาเข็มแล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก รูปที่ 57 เป็นการแสดงวิธีการทดสอบโดยสังเขป





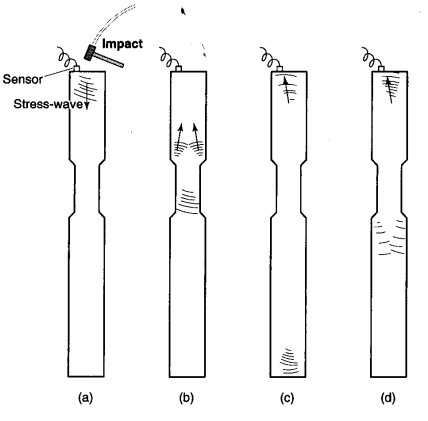
รูปที่ 57 การทดสอบแบบพลศาสตร์

9.2 การทดสอบความสมบูรณ์ (Integrity Test)

การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มสามารถกระทำได้โดยหลายวิธีแต่ในประเทศไทยนิยมใช้อยู่2วิธีคือ

9.2.1 Sonic Integrity Test

เป็นวิธีการทดสอบโดยใช้ ฆ้อนขนาดเล็กเคาะที่หัวเสาเข็มให้คลื่นความสั่นสะเทือนวิ่งลงสู่ปลายเสาเข็ม หรือตำแหน่งที่มีค่า Impedance (EA/c: E=Young's modulus ของคอนกรีต, A=พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, c= ความเร็วคลื่นในเสาเข็ม) เปลี่ยนแปลงแล้วสะท้อนกลับมาที่หัวเสาเข็ม และถูกตรวจจับโดย Sensor แล้วนำคลื่น Reflectogram ที่ตรวจจับได้ไปวิเคราะห์ความสมบูรณ์ (รูปที่ 58)



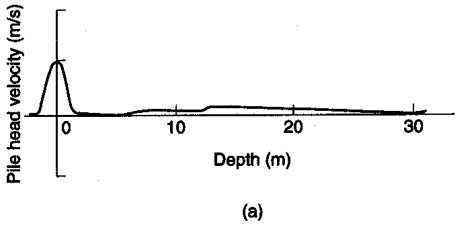
Principle of time-based low strain integrity test (a) initial impact on pile;
(b) partial reflection and partial transmission at change of section;
(c) arrival of reflection from change of section at sensor;
(d) arrival of reflection from pile toe at sensor

รูปที่ 58 Principle of time-based low strain integrity test (Turner, 1997)

เดยทว เป Deflectogram ทตรวจจบ เดจะมอยู 3 ลกษณะ (Turner, 1997) คอ

9.2.1.1 ลักษณะแรก (Type 0)

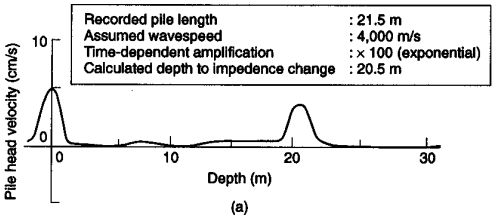
คลื่นลักษณะนี้จะไม่แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติของเสาเข็มและคลื่นมีลักษณะถูกดูดซึมซาบเข้าไปในดิน (รูปที่ 59) ทำให้ไม่เห็นคลื่นสะท้อนที่ปลายเสาเข็ม คลื่นชนิดนี้แสดงถึงเสาเข็มที่ไม่มีปัญหา



รูปที่ 59 Reflectogram ลักษณะ Type 0 (Turner, 1997)

9.2.1.2 ลักษณะที่สอง (Type 1)

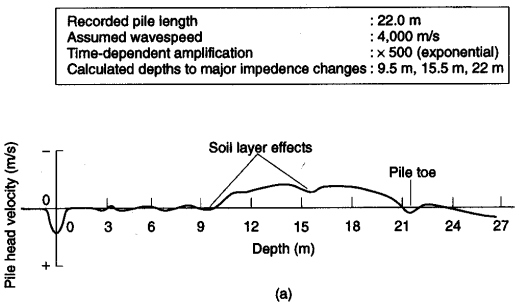
คลื่นทดสอบลักษณะนี้จะมีคลื่นสะท้อนกลับหนึ่งตำแหน่งอาจสะท้อนจากตำแหน่งปลายเสาเข็มหรือจุดหนึ่งจุดใดในตัวเสาเข็ม การวิเคราะห์ไม่มีความยุ่งยากดังแสดงใน รูปที่ 60



รูปที่ 60 Reflectogram ลักษณะ Type 1 (Turner, 1997)

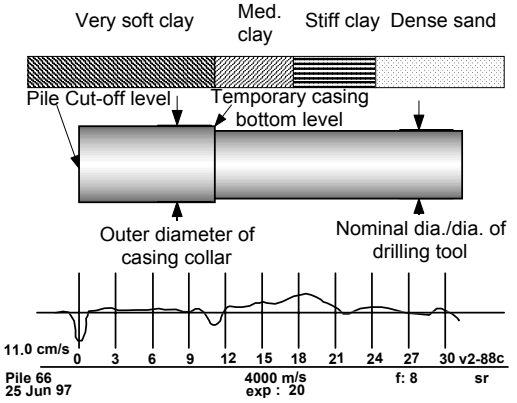
9.2.1.3 ลักษณะที่สาม (Type 2)

คลื่นทดสอบลักษณะนี้จะมีลักษณะคลื่นสะท้อนกลับมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง โดยคลื่นสะท้อนกลับส่วนที่สองที่ไม่ได้มาจากปลายเสาเข็มอาจเป็นคลื่นสะท้อนจากอิทธิพลของชั้นดิน หรือ Impedance ที่เปลี่ยนไปในตัวเสาเข็ม การวิเคราะห์คลื่นลักษณะนี้ไม่สามารถทำได้โดยผู้ไม่ชำนาญการ ดังแสดงใน รูปที่ 61



รูปที่ 61 Reflectogram ลักษณะ Type 2 (Turner, 1997)

9.2.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบ Sonic Integrity Test โดยระบบเบต้า (beta method) ได้มีผู้ผลิตเครื่องมือทดสอบ Sonic Integrity Test ที่โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบหาค่า Impedance ของเสาเข็มในระดับต่ำลงไปจากหัวเสาเข็มเพื่อเปรียบเทียบกับ Impedance ที่ระดับหัวเสาเข็มโดยเรียกค่าที่เปรียบเทียบได้นี้ว่าค่า เบต้า โดยตั้งกฎเกณฑ์หากค่าเบต้าที่จุดใดๆ ของตัวเสาเข็มมีค่าต่ำกว่า 0.85 จะวิเคราะห์ว่าเสาเข็มชำรุดหรือเสาเข็มมีสภาพบกพร่องมาก ต้องทำการซ่อมแซมหรือห้ามใช้ (Rejected) การวิเคราะห์ดังกล่าวไม่น่าจะถูกต้องนัก เนื่องจากยังมีปัจจัยแวดล้อมอีกหลายประการที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถรู้ได้ เปรียบเสมือนเครื่องเอ็กซ์เรย์ไม่สามารถบอกว่าคนไข้เป็นโรคอะไรได้ แต่ต้องให้แพทย์เป็นผู้วิเคราะห์ภาพเอ็กซ์เรย์ฉันใด การทดสอบก็ต้องการผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์ผลการทดสอบจาก Reflectogram ฉันนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งธรรมชาติของเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ช่วง 15 เมตรแรกซึ่งเป็นชั้นดินอ่อนจะต้องใช้ปลอกเหล็กซึ่งมีความหนาของ Shoe ประมาณ 2 –3 ซม. ซึ่งจะทำให้เสาเข็มในส่วน 15 เมตรบนนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าเสาเข็มส่วนที่อยู่ต่ำกว่าปลายปลอกเหล็กประมาณ 5-10 ซม. เสมอตามรูปที่ 62 (Thasananipan et al, 2000)



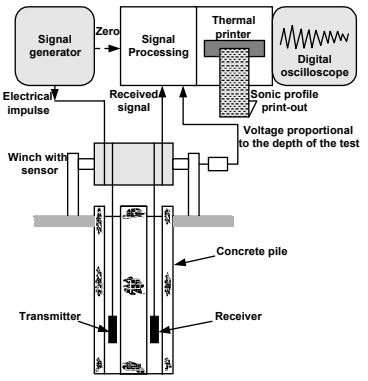
รูปที่ 62 ลักษณะเสาเข็มที่อาจแปลผลผิดพลาด

ตัวอย่างเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 ซม. หลังจากก่อสร้างเสร็จขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่หัวเสาเข็มซึ่งอยู่ในช่วงใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวมักจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 67 ซม. (เท่ากับพื้นที่หน้าตัด 3524 ตร.ซม.) ขณะที่เสาเข็มระดับต่ำกว่าปลายปลอกเหล็กลงไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตามแบบคือ 60 ซม. (พื้นที่หน้าตัด 2826 ตร. ซม.) แสดงว่าค่า Impedance ที่เปรียบเทียบระหว่างเสาเข็มส่วนที่ต่ำกว่าปลายปลอกเหล็กกับหัวเสาเข็มจะเท่ากับ 2826/3524 = 0.80 หากอ่านโดยเครื่อง เครื่องจะแสดงผลว่าเสาเข็มต้นนี้มีพื้นที่หน้าตัดลดลงจากแบบแต่ข้อเท็จจริงแล้วเสาเข็มต้นนี้มีหน้าตัดส่วนบนใหญ่กว่าแบบ ดังนั้นการวิเคราะห์โดยระบบเบต้า พึงใช้ด้วยความระมัดระวังและควรดำเนินการโดยผู้ชำนาญการที่รู้ถึงวิธีการก่อสร้างเสาเข็มด้วย

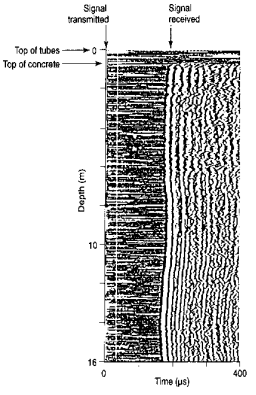
9.2.3 Sonic Logging Test

Sonic Logging Test เป็นวิธีการตรวจสอบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับตัวเข็ม ซึ่งมีหลักการสำคัญคือ การวัดระยะเวลา (Transit Time or Travelling Time) ที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น Sonic/Ultrasonic ระหว่างท่อ 2 ท่อ ซึ่งถูกติดตั้งลงไปในขั้นตอนของการลงเหล็กก่อนเทคอนกรีต โดยลูกตุ้ม (Piezo-Electric Probe) ทั้งสองอัน อัน

หนึ่งคือตัวส่งสัญญาณ (Transmitter or Emitter) อีกอันหนึ่งคือตัวรับสัญญาณ (Receiver) จะถูกหย่อนลงไปในท่อที่มีน้ำอยู่เต็มสำหรับเป็นสื่อกลางในการส่งผ่านสัญญาณ ดังแสดงในแผนภาพ Schematic (รูปที่63) ในขณะที่ Probes ทั้งสองถูกดึงขึ้นมาพร้อม ๆ กัน สัญญาณคลื่น Sonic/Ultrasonic ที่ส่งจาก Probe ตัวส่งสัญญาณผ่านคอนกรีตไปยังตัวรับสัญญาณที่อยู่อีกท่อหนึ่ง จะถูกเปลี่ยนให้เป็น Density Log ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นแนวเส้นขาว-ดำ โดยเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่นขณะที่ดึง Probe ขึ้นในแต่ละระดับความลึกจะถูกบันทึกบนแกน X ส่วนระดับความลึกจะถูกบันทึกบนแกน Y ดังรูปที่ 64

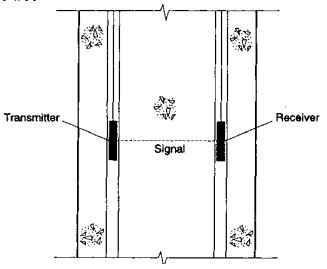


รูปที่ 63 Elements of sonic logging system (after Strain and Williams, 1991)

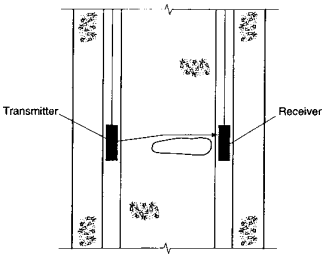


รูปที่ 64 Typical Sonic profile from sonic logging

จาก Sonic Logging Profile จะแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ (homogenous concrete) ตลอดทั้งต้น สัญญาณที่ได้จากการทดสอบ Sonic Logging Test จะไม่แสดงความผิดปกติใด ๆ (no anomalies) เพราะคลื่น sonic จะเดินทางเป็นเส้นตรงทำให้ความเร็วที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่นคงที่ดังแสดงในรูปที่65 ส่วนคอนกรีตที่เป็นรูพรุนหรือมีกำลังต่ำ ความเร็วคลื่น sonic จะลดลง และคอนกรีตที่มีสิ่งเจือปน เช่น ก้อนดินหรือสารละลายเบนโทไนท์ คลื่น sonic จะเดินทางเบี่ยงรอบสิ่งเจือปนนั้น ดังแสดงในรูปที่66 ซึ่งทั้ง 2 กรณีทำให้เวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวส่งถึงตัวรับเพิ่มขึ้นรวมทั้งทำให้สัญญาณของ Sonic Profile จางลง ลักษณะของแนวคลื่นจะผิดปกติไปไม่ต่อเนื่อง โดยส่วนที่จางหรือผิดปกติไปจะเป็นส่วนสำคัญสำหรับช่วยในการวิเคราะห์ผลต่อไป

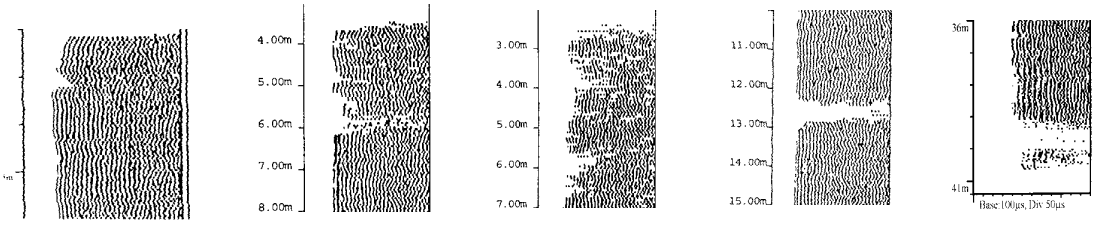


รูปที่ 65 Typical horizontal positioning of probes



รูปที่ 66 Possible diversion of signal

จากหลักการข้างต้นสามารถนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ถึงความสมบูรณ์ของเสาเข็มได้ดังตัวอย่างที่ทดสอบในสนามดังรูปที่ 67



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูป (ก) พบก้อนดินขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ที่บริเวณหัวเสาเข็ม

รูป (ข) พบคอนกรีตเป็นปูนทรายบริเวณหัวเสาเข็ม เนื่องจากคอนกรีตเกิดการเยิ้ม (bleeding)

รูป (ค) พบคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ มีสารละลายเบ็นโทไนท์ปนที่บริเวณหัวเสาเข็ม

รูป (ง) พบตะกอนดินเป็นบริเวณกว้างในเนื้อคอนกรีตที่ระดับ 12.5 ถึง 13 เมตร

รูป (จ) พบคอนกรีตที่ปลายเสาเข็มแยกตัวและผสมกับสารละลายฯ

รูปที่ 67 เสาเข็มที่ทดสอบความสมบูรณ์ด้วย Sonic logging test (ภัคพงศ์ และคณะ, 2542)

10. บทสรุป

พัฒนาการของเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกได้มีการพัฒนาทั้งด้านอุปกรณ์, เครื่องจักร และวิธีการก่อสร้างดีขึ้นกว่าอดีตมาก เมื่อก่อสร้างอย่างถูกวิธีจะสามารถรับน้ำหนักได้สูง และยังสามารถเสริมสมรรถนะในการรับน้ำหนักให้ดีขึ้นไปอีกด้วยการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวหรือปลายเสาเข็มอีกด้วย และในปัจจุบันสามารถออกแบบก่อสร้างได้หลายรูปทรงหลายระดับความลึกและมีผลทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในชั้นดินกรุงเทพฯ สูงกว่า 5,000 ตันแล้ว อย่างไรก็ตามแม้นเสาเข็มเจาะระบบนี้จะมีข้อดีมากมายก็ตาม หากในการออกแบบใช้ตัวแปร (Parameters) ที่ไม่เหมาะสมหรือก่อสร้างโดยละเว้นในการพิจารณาหรือปฏิบัติในขั้นตอนที่สำคัญแล้ว อาจทำให้สมรรถนะของเสาเข็มต่ำกว่าที่ต้องการได้ ดังนั้นผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานควรให้ความสำคัญในหัวข้อต่อไปนี้ คือ

1) ผลการสำรวจดิน นอกจากจะหาความลึกของระดับชั้นดิน, กำลังของชั้นดินตามปกติแล้ว ควรสำรวจรวมถึงสารเคมีในดิน, ธารน้ำใต้ดิน และอื่นๆ ที่จำเป็นด้วย
2) คอนกรีตที่ใช้ต้องอัดแน่นได้ด้วยตัวเองสมบูรณ์และไม่เกิดการเยิ้ม มีความสามารถในการซึมของน้ำต่ำ
3) ต้องควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ให้ได้ตามรายการอย่างเคร่งครัดในทุกขั้นตอนและก่อนเทคอนกรีตต้องเก็บตัวอย่างจากก้นหลุมมาทดสอบด้วยทุกครั้ง หากไม่ได้ตามรายการต้องเปลี่ยนถ่ายใหม่
4) อย่าปล่อยให้สารละลายเบ็นโทไนท์ในหลุมเจาะอยู่นิ่งๆ เกิน 4 ชั่วโมง หากปล่อยให้อยู่นิ่งนานกว่านี้หรือมีระยะเวลาในการขุดเจาะก่อนเทคอนกรีตนานกว่า 24 ชั่วโมง ต้องทำการขุดคว้านหลุมเจาะใหม่ และนำสารละลายเบ็นโทไนท์จากก้นหลุมมาตรวจสอบคุณสมบัติใหม่อีกครั้งด้วย
5) หากเลือกใช้สารละลายโพลิเมอร์ต้องทำการสำรวจชั้นดินโดยละเอียดก่อนว่ามีความเหมาะสมพอเพียงหรือไม่

6) การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มต้องเลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับลักษณะงาน และผู้ทำการทดสอบต้องมีประสบการณ์และเป็นมืออาชีพอย่างแท้จริง เพื่อป้องกันการแปรสัญญาณที่ผิดพลาด

11. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ พนักงานบริษัท ซีฟโก้ จำกัด ทุกคนที่ได้ช่วยพิมพ์ ตรวจสอบคำ และจัดเรียงบทความฉบับนี้

12. เอกสารอ้างอิง

- AASHO (1992), Standard and specification for highway bridges.
- ACI (1994), Standard specification for end bearing drilled piers, (ACI 336.1)
- ADSC (1995) Standard and specification for the foundation drilling industry. (Incorporating ACI 336.1 94)
- ADSC and DFI (1989), Drill shaft inspector's manual.
- Balasubramanium, A. S. (1991), Inaugural Lecture on Contributions in Geotechnical Engineering Soil Mechanics and Foundation Engineering, AIT, Bangkok.
- British Standard Institution, BS8004: Code of practice for foundation, BSI London.
- Flemming, W. G. K. and Sliwinski, Z. J. (1977), The use and influence of bentonite in bored pile construction, CIRIA report PG3.
- Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., Elson, W. K. (1992), Piling Engineering, John Wiley&Sons, Inc.
- Katzenbach, R. and Moormann, C. (1998), Large Diameter Bored Pile, Performance versus Design, Keynote Lecture, 3rd International Geotechnical Seminar on Bored&Auger Piles, Ghent, Belgium.
- Littlechild B., Plumbridge G. (1998a), Effect of Construction Technique on the Behavior of Plain Bored Cast In-situ Piles Constructed Under Drilling Slurry, Conference Papers of 7th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria, pp. 1.6.1 to1.6.8.
- Littlechild B., Plumbridge G., Free M. W. (1998b), Shaft Grouted Piles in Sand and Clay in Bangkok, Conference Papers of 7th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria, pp. 1.7.1 to1.7.8.
- Morrison, I. M., Freeman, R. A., Paveenchana T., Ferguson, D. R., (1987), Bored Piled Foundations for Chao Phya River Crossing at Wat Sai, Bangkok, Proc. 9th Southeast Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand, pp. 6-207 to 6-218.
- Reese, L. C. and Tucker, K. L. (1985), Bentonite slurry in constructing drilled piers, Drilled piers and caisson II, ASCE convention., Denver, Colorado, USA.
- Reese, L. C. and O'Niel, M. W. (1988), Drill Shafts Construction Procedures and Design Methods, US. Department of Transportation Incorporation with ADSC.

- Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. (1974), Practical consideration affecting the performance of diaphragm walls, Proceedings of the conference on diaphragm wall and anchorage, ICE, London.
- Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. (1982), The Integrity and performance of bored piles, Advance in Piling&Ground Treatment for Foundation, ICE, London., pp.153-165
- Stain, R.T. & Williams, H.T. (1991) "Interpretation of Sonic Coring Results: A research Project. ", 4th international DFI conference Piling and Deep Foundations., Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1991, pp. 633-640
- Thasananipan N., Anwar M.A., Muang, A.W. & Tansengs, P. (1999), Performance comparison of bored and excavated piles in the layered soils of Bangkok., Symposium on Innovative solutions in structural and geotechnical engineering, In honor of professor Seng Lip Lee, AIT, Bangkok., Thailand, pp. 345-353.
- Thasananipan N., Baskaran G. & Anwar, M. A (1998), Effect of construction time and bentonite viscosity on shaft capacity of bored piles, 3rd Intl. Geotechnical seminar on deep foundations on bored and auger piles, Ghent, Belgium, Balkema, pp. 171-177.
- Thasananipan N., Anwar M. A. and Muang A. W. (1999a), Failure Mechanism of Long Bored Piles in Layer Soils of Bangkok, Civil and Environmental Engineering Conference New Frontiers and Challenges, AIT, Bangkok, Thailand, pp. V69 – V74.
- Thasananipan, N., Muang, A. W., Navaneethan, T. (2000), Non-Destructive Integrity Testing on Piles Founded in Bangkok Subsoils, 6th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles (Stress Wave 2000), São Paulo City, Brazil, (Paper has been accepted by organizing committee)
- The Institution of Civil Engineers, ICE (1996), Specification for piling and Embedded Retaining wall (1996) Thomas Telford. London.
- Thorburn, S. and Thorburn J. Q. (1977), Review of problems associated with the construction of cast-in-place piles, CIRIA report PG.2
- Tonnisen, J. Y., Den Haan, E. J., Luger, H. J., and Dobie M. J. D. (1985), Pier foundations of the Saudi Arabia-Bahrain causeway, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 1575-1578
- Turner, M.J. (1997) **"**Integrity testing in piling practice**",** Construction Industry Research and Information Association. CIRIA Report 144 , London, UK., pp. 208-229
- ชัชวาลย์ เศรษบุตร (2536) Concrete Technology, CPAC
- ชัย มุกตพันธุ์ และ กาซุโต นากาซาวา (2528), ปฐพีกลศาสตร์ และ วิศวกรรมฐานราก, สำนักพิมพ์ดวงกมล
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2524), การตรวจสอบคุณสมบัติในสนามของสารละลายเบ็นโทไนท์ ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่, เอกสารวิชาการเล่มที่ 1 สาขาวิศวกรรมโยธา, วสท., หน้า 63 ถึง 70
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2540), ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพ ในปัจจุบัน, การสัมนาทางวิชาการเรื่องฐานราก 40, จัดโดย ว.ส.ท., ณ. โรงแรมเซ็นทรัลพลาซ่า,ลาดพร้าว, หน้า 1-26

- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ทัชชพงษ์ ประเวศวรารัตน์ (2542ก), สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมใหญ่ทางวิชาการ 2542, จัดโดย วสท. หน้า 9-16
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว, พรพจน์ ตันเส็ง (2542ข), ประสบการณ์การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, พัทยา, หน้า GTE144-GTE149
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว, พรพจน์ ตันเส็ง (2543ก), สารละลายเบ็นโทไนท์ในงานกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตในชั้นดินกรุงเทพฯ: คุณสมบัติต่างๆ และ วิธีการควบคุม, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6, เพชรบุรี, หน้า GTE211-GTE216
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ เผดิจ รุจิขจรเดช และ พรพจน์ ตันเส็ง (2543ข) การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6, เพชรบุรี, หน้า GTE115-GTE120
- ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, จรุง หิรัญอ่อน และ สมบูรณ์ พิมสาร (2542), การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะลึกมากก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพ โดยวิธี Sonic Logging และการแปลคลื่นสัญญาณ, การประชุมใหญ่ทางวิชาการ 2542, จัดโดย วสท. หน้า 1-8
- วันชัย เทพรักษ์ (2540), ประสิทธิภาพและพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะพร้อมอัดน้ำปูนปลายเสาเข็มสำหรับดินกรุงเทพฯ, การสัมนาทางวิชาการเรื่องฐานราก 40, จัดโดย ว.ส.ท., ณ. โรงแรมเซ็นทรัลพลาซ่า,ลาดพร้าว, หน้า 27-47
- อรุณ ชัยเสรี (2524), การทำเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่, เอกสารวิชาการ เล่มที่ 1, สาขาวิศวกรรมโยธา, วสท., หน้า 1 – 54

การสร้างมาตรฐานงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทย ที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในยุคโลกาภิวัฒน์

Thai Standardization of the Construction of Wet Process Bored Piles in Line with Global Standards

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด
26/10 ถนนรามอินทรา 109 แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510
โทร. 9190090 โทรสาร. 5183088
E-Mail: seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ

เสาเข็มระบบเจาะเปียกได้รับความนิยมในประเทศต่างๆทั่วโลกมาแล้วเป็นเวลากว่า 50 ปี และได้ถูกนำเข้ามาใช้ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯเป็นครั้งแรกเมื่อประมาณ 20 ปีเศษมาแล้ว เมื่อนำเข้ามาใช้ในกรุงเทพฯในระยะแรกๆ เสาเข็มเจาะแต่ละขนาดจะถูกออกแบบให้รับน้ำหนักได้ต่ำกว่าความสามารถการรับน้ำหนักในปัจจุบันมาก เมื่อมาตรฐานของเครื่องจักรงานเสาเข็มที่นำมาใช้มีความทันสมัยมากขึ้น, วิธีการก่อสร้างที่ได้รับการพัฒนาสูงขึ้นและการเลือกใช้รายการก่อสร้างที่ได้มีการปรับปรุงจนมีความเหมาะสมมากขึ้นทำให้เสาเข็มเจาะเหล่านี้มีความมั่นคงและสามารถออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักได้สูงมากขึ้นและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงกว่าเดิมเป็นอย่างมาก บทความนี้จะบรรยายถึงมาตรฐานการก่อสร้างงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกบางข้อที่ใช้ในประเทศไทยที่ควรปรับปรุงให้เหมาะสมกับการทำงานในยุคโลกาภิวัฒน์นี้

Abstract

Wet process bored piles have become popular in many countries since over 50 years ago, and have been first constructed in Bangkok subsoil over 20 years ago. In the past few decades, piles constructed with this system in Bangkok have been designed to carry the load significantly less than the pile capacities at this day. The positive development in application of these piles today comes from the proper selection of modern piling equipment, advanced construction techniques and practical specifications. Hence, bored piles constructed in recent days provide better integrity with higher load carrying capacity as well as less impact to the environment than those constructed in the past. This paper discusses on the clauses of impractical construction specifications used in Thailand which need to be improved to suit the global standards of wet process bored piling works.

1. บทนำ

สิ่งก่อสร้างในยุคโลกาภิวัฒน์เช่น อาคารสูง, สะพานข้ามแม่น้ำ, ทางด่วนยกระดับและทางรถไฟลอยฟ้า ฯลฯ ล้วนแล้วแต่เป็นโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนและมีน้ำหนักที่ถ่ายลงฐานรากสูงมากกว่าสิ่งก่อสร้างในทศวรรตก่อนๆมาก ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจึงต้องเลือกใช้ระบบเสาเข็มที่มีความเหมะสมทังในแง่ของความมั่นคงและราคาประหยัด เสาเข็มระบบเจาะเปียกเป็นเสาเข็มระบบหนึ่งที่มักจะถูกเลือกใช้ให้เป็นเสาเข็มฐานรากของสิ่งปลูกสร้างที่กล่าวมาข้างต้นและมีแนวโน้มว่าจะได้รับการเลือกใช้มากขึ้นทุกขณะ ในอดีตจนถึงปัจจุบันแม้นจะมีการใช้เสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยกันค่อนข้างมากแต่กลับปรากฏว่ายังไม่มีการจัดทำมาตรฐานงานเสาเข็มเจาะไว้เป็นแนวทางให้ผู้เกี่ยวข้องแต่ละฝ่ายได้ออกแบบและก่อสร้างให้เป็นมาตรฐานเดียวกันเฉกเช่นนานาอารยะประเทศ บทความนี้ได้รวบรวมมาตรฐานงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกบางหัวข้อที่สำคัญไว้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับหน่วยงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องเขียนมาตรฐานสำหรับประเทศไทยในอนาคต

2. มาตรฐานงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทย

ในอดีตจนถึงปัจจุบันถึงแม้นว่าจะยังไม่มีหน่วยงานทางวิศวกรรมกำหนดมาตรฐานงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกออกมาให้ผู้เกี่ยวข้องทั่วไปใช้ก็ตาม แต่ผู้ออกแบบในแต่ละกรมกองหรือผู้ออกแบบภาคเอกชนก็ได้ทำการกำหนดมาตรฐานของตนเองขึ้นมาใช้งาน ซึ่งมาตรฐานบางฉบับบ้างก็มีความสอดคล้องไม่มีข้อความขัดแย้งกันเองเมื่อนำมาใช้ปฏิบัติก็ใช้งานได้ดี แต่บางฉบับมีข้อกำหนดบางประการที่ยังไม่เหมาะสมต่อการปฏิบัติในสนามจนทำให้งานติดตั้ง (Installation) เสาเข็มเจาะเกิดปัญหา เช่นเรื่อง ข้อกำหนดมาตรฐานคุณสมบัติและการทดสอบของสารละลายฯ, ระยะเวลาสูงสุดทีอณุญาติให้ใช้ในการติดตั้ง(Maximum construction time and Maximum contact time), ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (Allowable Tolerances) และคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ เป็นต้น จากการที่ไม่มีมาตรฐานกลางที่เหมาะสม เสาเข็มที่ติดตั้งแล้วเสร็จในเมืองไทยจึงมีสมรรถนะหลากหลายระดับที่ไม่อยู่ในระดับมาตรฐานเดียวกัน

3. มาตรฐานสารละลายฯที่ใช้ในงานเสาเข็มระบบเจาะเปียก

การติดตั้งเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯมีการใช้สารละลายเบ็นโทไนท์เป็นตัวต้านแรงดันดินไม่ให้หลุมเจาะอ่อนตัวหรือพังทลายได้ผลดีมากว่า 20 ปี แล้วและขณะนี้ก็ยังได้ความนิยมอยู่ในปัจจุบันทั้งในประเทศและในต่างประเทศ แต่เนื่องจากเบ็นโทไนท์ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยง่ายหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมแล้วจะงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก ในยุคโลกาภิวัตน์ที่มีการอนุลักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้นกว่าเดิมในต่างประเทศจึงเริ่มมีการนำสารละลายโพลีเมอร์ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติมาใช้งานแทนซึ่งพบว่าได้ผลดีและให้ค่าการรับน้ำหนักที่ดีกว่าการใช้เบ็นโทไนท์ ขณะนี้ได้เริ่มมีการนำเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยแล้ว (ณรงค์และคณะ, 2542) อย่างไรก็ตามเบ็นโทไนท์ก็ยังคงสามารถใช้งานได้ดีเมื่อมีการควบคุมที่ถูกต้อง

3.1 สารละลายเบ็นโทไนท์

3.1.1 คุณสมบัติ

ในอดีตผู้ออกแบบในประเทศไทยจะกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ไว้แต่เพียงค่า Density, Viscosity, Sand content และ pH Value เท่านั้น แต่ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกตามมาตรฐานของประเทศที่มีการพัฒนาแล้วหลายๆประเทศเช่นของอังกฤษ (ICE, 1996) และของสหรัฐอเมริกา (ADSC,1995) กำหนดให้มีการตรวจสอบเรื่องการปริมาณน้ำในสารละลายที่ซึมหายเข้าไปในชั้นดิน(Fluid Loss) และปริมาณความหนาของผงเบ็นโทไนท์ที่ก่อตัวขึ้นที่ผิวผนังชั้นทรายในรูเจาะ(Filter Cake) และค่าอื่นๆไว้ด้วย ตามตารางที่ 1 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ใช้กันทั่วไปในต่างประเทศ

ตารางที่1 คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ที่ใช้กันทั่วไปในต่างประเทศ

Authors	**FPS (1975, 1977)**	**Hutchingson et al. (1975)**	**FDOT (1987, 1988)**	**Reese and O' Neil (1988)**	**ICE (1988)**	**ACI (1989)**	***AASHTO (1992)**	***Majano & O' Neil (1993)**	***ICE & FPS (1996)**
Slurry Type	**Bentonite**	**Calcium Bentonite**	**Bentonite or Attapulgite**	**Bentonite or Attapulgite**	**Bentonite**	**Bentonite or Polymer**	**Bentonite or Attapulgite**	**Bentonite**	**Bentonite**
Density (gm/cc)	<1.10	1.024 to 1.218	1.03 to 1.20	1.03 to 1.20	<1.10	<1.36 (bearing pile) <1.12 (firction pile) <1.02 (Polymer)	1.03 to 1.10 1.03 to 1.20	1.02 to 1.07 1.02 to 1.13	<1.10 <1.15
pH	9.5 to 12	<11.7	8 to 12	8 to 11	9.5 to 12	8 to 12	8 to 11 8 to 11	8 to 10 8 to 10	9.5 to 10.8 9.5 to 11.7
Sand Content	<6% (by weight)	<35% (by weight)	<4% (by volume)	-	-	<4% (bearing pile) <25% (friction pile) <1% (Polymer)	<4% <4% (by volume)	<4 % <10%	<2% <2%
Marsh Funnel Viscosity (sec/Qt)	30 to 90	-	28 to 40	28 to 45	30 to 90	26 to 50	28 to 45 28 to 45	32 to 60 32 to 60	30 to 70 < 90
Plastic Viscosity (cP)	<20	<20	<20	-	<20	-	-	6 to 8.5 6 to 10.0	-
Yield Point (Pa)	-	-	-	-	-	-	-	2 to 6.0 2 to 6.5	-
10 min. Gel Strength (Pa)	4 to 40	3.6 to 20	1.9 to 10	-	4 to 40	-	-	-	4 to 40 4 to 40
Differential Head (m)	>1	-	-	-	-	1.5	-	-	-
Fluid Loss (30 minute test)	-	-	-	-	-	-	-	-	< 40 <60
**Maximum Contact Time (hr.)	-	-	-	-	-	-	-	4	-

Notes : *** Upper line for as supplied to pile and lower line for sample from pile prior to placing concrete**
**** Without agitation and sidewall cleaning**

จากประสบการของผู้เขียนเห็นว่าการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในดินกรุงเทพฯ ควรกำหนดคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ ตาม ตารางที่ 2 โดยปรับค่าคุณสมบัติบางตัวเช่น Viscosity และ pH ให้เหมาะกับดินกรุงเทพฯที่มีซิลท์ (Silt) ผสมอยู่

ตารางที่ 2 Test and compliance values for support fluid (ICE, 1996)

Property to be measured	Test Method and apparatus	API RP13 Section	Compliance values measured at 20 °C	
			As Supplied to pile	Sample from pile prior to placing concrete
Density	Mud balance Low temperature	1	Less than 1.10 g/ml	Less than 1.15 g/ml
Fluid loss (30 minute test)	test fluid loss	3	Less than 40 ml	Less than 60 ml
Viscosity	Marsh Cone	2	30 to 70 seconds (27 - 50)(1)	Less than 90 sec. (Less than 60 sec.)(1)
Shear strength (10 min gel strength)	Fann Viscometer	2	4 to 40 N/m^2	4 to 40 N/m^2
Sand Content	Sand screen set	4	Less than 2%	Less than 2%
pH	(2)		9.5 - 10.8 (8 - 11)(1)	9.5 - 11.7 (<12)(1)

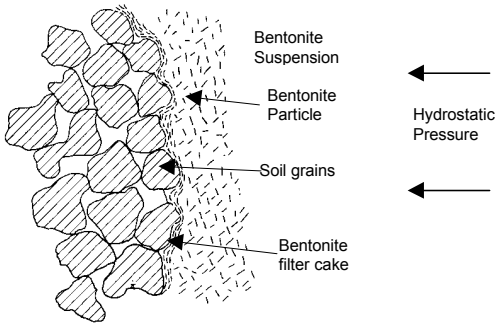
หมายเหตุ 1). ตัวเลขในวงเล็บเป็นความเห็นของผู้เขียน 2.) วัดโดย Electrical pH meter แต่ใช้ pH paper แทนได้

3.1.2 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบ

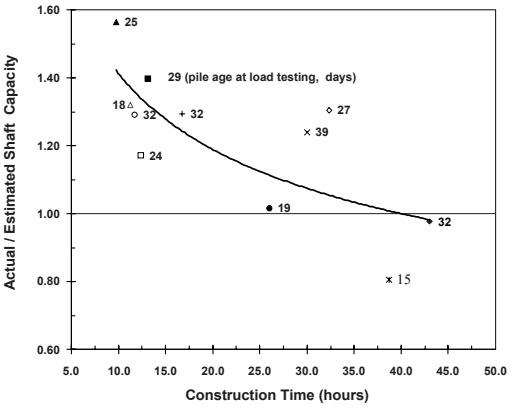
รายการก่อสร้างเสาเข็มที่กำหนดโดยผู้ออกแบบในประเทศไทยมักจะกำหนดคุณสมบัติของสารละลายไว้ลอยๆ ในงานสนามผู้ควบคุมงานจึงให้เก็บตัวอย่างจากถังเก็บหรือตักจากผิวบนของสารละลายในรูเจาะมาทดสอบ แต่ในต่างประเทศจะกำหนดให้เก็บตัวอย่างของสารละลายที่ก้นหลุมเจาะมาทำการทดสอบก่อนทำการเทคอนกรีต (เช่น ICE, 1996 และ ADSC, 1995 เป็นต้น) หากคุณสมบัติของสารละลายไม่ได้ตามเกณฑ์จะต้องทำการปรับปรุงเปลี่ยนถ่ายและทดสอบใหม่จนกว่าจะได้จึงเทคอนกรีต

3.1.3 ระยะเวลาในการติดตั้งและปล่อยให้สารละลายเบ็นโทไนท์อยู่นิ่งๆ

การติดตั้งเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยไม่มีการกล่าวถึงระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง (Construction Time) แต่อย่างไร ซึ่ง แตกต่างจากต่างประเทศที่ได้มีการศึกษาว่าสารละลายเบ็นโทไนท์มีคุณสมบัติเฉพาะที่เรียกว่า Thixothropy Characteristic คือเมื่ออยู่นิ่งๆ (Explosure Time / Contact Time) นานในระยะเวลาหนึ่งแล้วจะก่อตัวจนข้นเหนียว (Thick Slurry) แต่เมื่อถูกกวน(Agitation) แล้วอนุภาคจะเกิดการแตกตัวกลับกลายเป็นใสลื่นไหลง่าย (Thin Slurry) จากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าขณะที่สารละลายทำหน้าที่ต้านแรงดันดินอยู่นั้นจะมีน้ำในสารละลายปริมานหนึ่งแทรกซึมหายเข้าไปในชั้นดินประเภทที่น้ำผ่านได้ (Pervious Materials) เช่นชั้นทรายและผงเบ็นโทไนท์จะถูกกรองติดอยู่ที่ผิวผนังรูเจาะที่เป็นชั้นทราย ตามรูปที่ 1 เมื่อเวลาผ่านไปยิ่งนานน้ำก็จะซึมหายมากขึ้น และ ผงตะกอนเบ็นโทไนท์ก็จะเกาะติดที่ผิวผนังหนายิ่งขึ้นตามลำดับ ซึ่งจะทำให้แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มลดลง ผู้เขียนเคยทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯพบว่าเมื่อใช้เวลาการติดตั้งยิ่งนานค่าแรงเสียดทานก็จะยิ่งลดต่ำลงตามรูปที่ 2 มาตรฐาน ADSC จึงกำหนดไว้ว่าหากใช้เวลาการติดตั้งเสาเข็มนานมากกว่า 24 ชั่วโมงหรือปล่อยให้สารละลายในรูเจาะอยู่นิ่งนานเกินกว่า 4 ชั่วโมงแล้วก่อนจะเทคอนกรีตต้องทำการเจาะคว้านใหม่เพื่อครูดผงเบ็นโทไนท์ที่เกาะติดผิวรูเจาะออก



รูปที่ 1 Surface Filtration (Flemming et al, 1977)



รูปที่ 2 Effect of construction time on shaft capacity of bored piles. (Thasnanipan et al, 1998)

3.2 สารละลายโพลีเมอร์

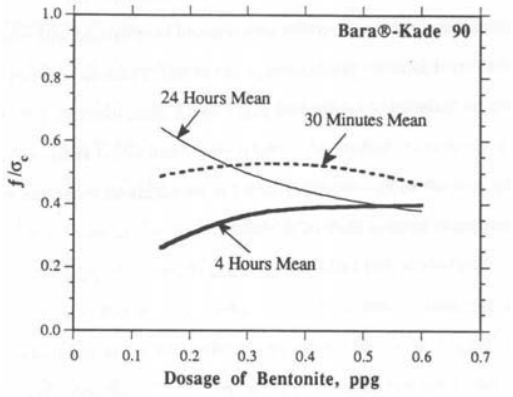
3.2.1 คุณสมบัติ: เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ยังเป็นของใหม่ในวงการเสาเข็มเจาะในประเทศไทยจึงยังไม่มีการกำหนดคุณสมบัติไว้ ในปัจจุบันผู้ประกอบการต่างๆ จึงนำข้อกำหนดจากต่างประเทศมาใช้ ตามตารางที่ 3 โดยข้อกำหนดจะคล้ายกับสารละลายเบ็นโทไนท์ยกเว้นเรื่อง Sand Content และวิธีการเก็บตัวอย่างมาทดสอบใช้หลักเกณฑ์เดียวกับการเก็บสารละลายเบ็นโทไนท์

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสารละลายจาก ADSC, 1995 (โพลีเมอร์ ดูหัวข้อ 3 C ในตาราง)

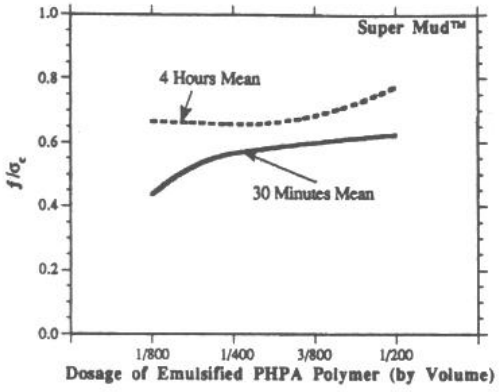
Item to be measured	Range of results at 20 ^{o} C	Test methods
1. Density before concreting, l gg/cc, for slurry 30 cm. from pile toe a. No end bearing b. With end bearing c. Polymer slurry	 1.36 maximum 1.12 maximum 1.024 maximum	API 13B, section1 (Mud balance) ASTM D 4380
2 Marsh Funnel Viscosity, sec/qt, for entry slurry and pile slurry.	26 to 50	API 13B, Section 2 (Marsh Funnel and Cup)
3 Sand content by volume, percent, before concreting for Slurry 30 cm. from pile bottom. a. Pile with design end bearing and no side friction b. Pile with no design end bearing. c. Polymer slurry.	 4% maximum 25% maximum 1% maximum	API 13B, Section 4 (Sand Screen Set) ASTM D 4381
4. pH, during excavation.	8 to 12	API 13B, Section 6 (Paper Test Strips or Glass – Electrode pH Meter)

3.2.2 ระยะเวลาในการติดตั้งและการปล่อยให้สารละลายโพลีเมอร์อยู่นิ่งๆ

เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ไม่มีคุณสมบัติ Thixotropy Characteristic ดังนั้นระยะเวลาก่อสร้างหรือระยะเวลาที่สารละลายอยู่นิ่งๆจึงไม่มีผลกระทบกับสมรรถนะของเสาเข็มแต่ประการใด Majano and O' Neil (1993) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้และสรุปผลว่าค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างจะให้ผลตรงกันข้ามกับเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยสารละลายเบ็นโทไนท์กล่าวคือเสาเข็มที่ใช้โพลีเมอร์เมื่อใช้เวลาก่อสร้างหรือปล่อยให้สารละลายในรูเจาะอยู่นิ่งนานจะไม่มีผลกระทบใดๆต่อค่าแรงเสียดทานเสาเข็ม ตามรูปที่ 3 ข



รูปที่ 3ก. ผลกระทบของระยะเวลาที่ปล่อยให้สารละลายเบ็นโทไนท์อยู่นิ่งๆ ต่อค่าแรงเสียดทานที่ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (after Majano et al, 1993)



รูปที่ 3ข. ผลกระทบของระยะเวลาที่ปล่อยให้สารละลายโพลีเมอร์อยู่นิ่งๆ ต่อค่าแรงเสียดทานที่ไม่ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น (after Majano et al, 1993)

4. ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (Allowable Tolerances)

ในงานก่อสร้างทุกชนิดย่อมมีความคลาดเคลื่อนในการทำงานแอบแฝงอยู่เสมออย่างไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้และออกแบบเผื่อความคลาดเคลื่อนดังกล่าวข้างต้นไว้ด้วยให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน การก่อสร้างเสาเข็มในประเทศที่ผ่านมาพบว่าในหลายโครงการได้มีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ชนิดที่ไม่สามารถก่อสร้างได้จริง ทำให้ต้องทำการแก้ไขฐานรากโดยการเสริมคานยึดฐานรากในภายหลังซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการออกแบบเผื่อความคลาดเคลื่อนในการติดตั้งที่เหมาะสมไว้แต่แรกเป็นอย่างมาก และความมั่นคงอาจต่ำกว่าที่ออกแบบไว้เดิมได้ด้วย

4.1 ความคลาดเคลื่อนในการติดตั้ง

ความคลาดเคลื่อนในการติดตั้งจะเกิดขึ้นในระหว่างการติดตั้งในสองลักษณะคือ ในแนวราบ (Horizontal Deviation) และในแนวดิ่ง (Vertical Deviation)

4.1.1 ความคลาดเคลื่อนในแนวราบ: ,ข้อกำหนดตามมาตรฐานต่างประเทศเช่น ICE (1996) ,ADSC (1995) กำหนดไว้ว่าให้คลาดเคลื่อนที่ระดับตัดใช้งาน(Cut Off Level) วัดในทุกแกน.ที่ระดับเครื่องจักรทำงานอยู่ (Working Platform Level) มีค่าไม่เกิน 7.5 ซม. และยอมให้บวกเพิ่มค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มเติมที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง(ความเอียง) ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวสมเหตุผลเนื่องจากระหว่างการติดตั้งไม่สามารถควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนที่ระดับตัดใช้งานของเสาเข็มใช้งานได้ เนื่องจากระดับตัดใช้งานส่วนใหญ่จะอยู่ต่ำกว่าระดับเครื่องจักรทำงาน ข้อกำหนดที่ใช้กันในประเทศไทยส่วนใหญ่มักเขียนไว้ลอยๆว่าค่าความความความเคลื่นของเสาเข็มในแนวราบที่ยอมให้มีค่าไม่เกิน 7.5 ซม.ทำให้การปฏิบัติงานในสนามยึดถือว่าเป็นค่าวัดที่ระดับตัดใช้งาน(ซึ่งระดับตัดใช้งานของโครงการก่อสร้างในกรุงเทพฯมีตั้งแต่ 2-20 กว่าเมตร) จึงทำให้เกิดการแก้ไขฐานรากกันเนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกินข้อกำหนดที่กำหนดไว้มาก

4.1.2 ความตลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง: ข้อกำหนดมาตรฐานในต่างประเทศเช่น ICE(1996), ADSC (1995) กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งของเสาเข็มที่ยอมให้ไม่เกิน 1:80 ส่วนในประเทศไทยจะกำหนดไว้ให้เอียงได้น้อยกว่าคือ 1: 100 และ 1:200 บ้าง สมมุติว่าใช้ความเอียงได้ไม่เกินค่า 1:100 และระดับตัดใช้งานของเสาเข็มอยู่ที่ระดับ 8 เมตรต่ำกว่าระดับพื้นดินที่เครื่องจักรยืนทำงาน หากติดตั้งเสาเข็มเกิดเอียงไป 1:100 และความคลาดเคลื่อนในแนวราบที่ระดับเครื่องจักรทำงานเท่ากับศูนย์ เมื่อขุดดินถึงหัวเสาเข็มจะพบว่าความคลาดเคลื่อนที่ระดับตัดใช้งานจะเท่ากับ 8 ซม.และหากการติดตั้งมีการคลาดเคลื่อนในแนวราบที่ระดับเครื่องจักรทำงานเท่ากับ 5 ซม. จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ระดับตัดใช้งานเพิ่มขึ้นเป็น 13 ซม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่ระดับตัดใช้งานจะมีค่าความเคลื่อนในแนวดิ่ง(ความเอียงที่ยอมให้ที่เกิดระหว่างการติดตั้ง) ประกอบร่วมด้วยเสมอ

จากรายละเอียดในข้อ 4.11 และ 4.1.2 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าการจะกำหนดค่าความเคลื่อนที่ระดับตัดเสาเข็มจะต้องพิจารณาความลึกของระดับตัดใช้งานว่าอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นดินที่เครื่องจักรทำงานมากน้อยเพียงใดก่อนด้วยจึงจะสามารถออกแบบเผื่อความคลาดเคลื่อนได้อย่างปลอดภัยและประหยัด และไม่สมควรกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับระดับตัดเสาเข็มที่อยู่ตื้นๆ ใกล้ผิวดินแล้วนำไปใช้กับเสาเข็มที่มีระดับตัดใช้งานที่อยู่ลึกลงไปจากระดับผิวดินมาก เพราะไม่สามารปฏิบัติได้จริงในงานสนามจนทำให้มีการแก้ไขฐานรากติดตามมา จนความมั่นคงของฐานรากอาจน้อยกว่าฐานรากที่ออกแบบเผื่อความคลาดเคลื่อนไว้ตั้งแต่ขั้นตอนออกแบบ

4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการหล่อคอนกรีตสูงกว่าระดับตัดใช้งาน

การหล่อคอนกรีตเสาเข็มเจาะเป็นการหล่อคอนกรีตชนิดหล่อในดิน (Cast In-Situ Concrete) ที่จะต้องมีการหล่อเผื่อให้สูงกว่าระดับตัดใช้งานและทำการสะกัดออกในภายหลัง ผู้รับเหมาอาคารที่มีหน้าที่สะกัดจะต้องการให้

หล่อเผื่อไว้ให้น้อยเพื่อสะกัดง่ายในขณะที่ผู้ติดตั้งเสาเข็มเจาะเกรงว่าคอนกรีตอาจมีการเยิ้ม (Bleeding) เกิดขึ้น และต้องการให้มั่นใจว่าเมื่อทำการสะกัดถึงระดับตัดแล้วจะมีแต่คอนกรีตที่ดีจึงมักจะหล่อคอนกรีตเผื่อไว้สูงกว่าที่ผู้รับเหมาอาคารคาดคิดไว้ จนทำให้เกิดข้อโต้แย้งกันอยู่บ่อยๆ หรือผู้ออกแบบกำหนดการหล่อคอนกรีตเผื่อไว้น้อนเกินไป เช่นไม่เกินความยาว 1.00 หรือ 2.00 เมตร ซึ่งการกำหนดดังกล่าวอาจเหมาะสมกับระดับตัดเสาเข็มใช้งานที่อยู่ต่ำกว่าระดับดินไม่มากนัก สำหรับระดับตัดใช้งานที่อยู่ลึกมาก (มากกว่า 6 เมตร) หากกำหนดไว้ไม่เหมาะสมอาจเกิดปัญหาได้ทั้งเผื่อไว้มากเกินไปหรือน้อยเกินไป มาตรฐาน ICE (1996) ได้ให้แนวทางสำหรับความยาวของคอนกรีตที่ควรหล่อเผื่อให้สูงกว่าระดับตัดใช้งานที่ความลึกต่างๆไว้ ตาม ตารางที่ 4 และได้รับการยอมรับนำไปใช้กันเป็นสากล

ตารางที่ 4 Casting tolerance above cut-off levels for specified conditions (after ICE, 1996)

Cut-off level below commencing surface, *H*, m*	Casting tolerance above cut-off level, m	Condition
0.15 to any depth	$0.3 + H/10$	Piles cast in dry bore within permanent casing or cut-off level in stable ground below base of casing
0.15–10.00	$0.3 + H/12 + C/8$	Piles cast in dry bore using temporary casing other than above
0.15–10.00	$1.0 + H/12 + C/8$ Where C = length of temporary casing below the commencing surface	Pile cast under water or support fluid**

* Beyond $H = 10$ m, the casting tolerance applying to $H = 10$ m shall apply.
** In cases where a pile is cast so that the cut-off level is within a permanent lining tube, the appropriate tolerance is given by deleting the casing term C/8.

การถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากหัวเสาเข็มเข้าสู่ชั้นดินเบื้องล่างต้องอาศัยคอนกรีตเป็นตัวถ่ายแรงโดยต่อเนื่องตลอดทั้งต้น ดังนั้นความสมบูรณ์ของคอนกรีตเสาเข็มจึงสำคัญต่อการถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งในระยะสั้นและยาวเป็นอย่างมาก ผู้ออกแบบส่วนใหญ่มักจะกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกไว้เพียงบางเรื่อง เช่น ปริมานปูนซีเมนต์ต่อลูกบาศก์เมตร,ค่าการยุบตัว, อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำ (W/C), ระยะเวลาหน่วงการก่อตัวและค่ากำลังอัดประลัยเป็นหลักเท่านั้น ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวดูจะยังไม่เพียงพอสำหรับงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกซึ่งเป็นโครงสร้างแนวตั้งที่ต้องเทคอนกรีตได้น้ำลงไปในชั้นดินในที่คอนกรีตเสาเข็มจะต้องอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเองโดยไม่สามารถใช้การจี้ช่วย จึงจำเป็นต้องออกแบบส่วนผสมที่พิเศษกว่าคอนกรีตโครงสร้างบนดินทั่วไป หากคอนกรีตงานเสาเข็มเจาะกำหนดและผสมไว้ไม่ได้มาตรฐานจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ทั้งขณะยังเหลวและแข็งตัวได้ ตามรูปที่ 4 เกิดการติดขัดในท่อเทเนื่องมาจากการผันแปรของคุณสมบัติ รูปที่ 5 เกิดการแยกตัวจากเยิ้มของน้ำในคอนกรีต (Bleeding) ซึ่งจะทำให้คอนกรีตหัวเสาเข็มต่ำจนทำให้ความยาวที่หล่อเผื่อไว้มีความยาวไม่พอ รูปที่ 6 การเยิ้มทำให้เกิดโพรงในคอนกรีต รูปที่ 7 การเยิ้มทำให้คอนกรีตพรุน และรูปที่ 8 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการซึมของน้ำต่ำ (High Permeability Concrete) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความทนทานของคอนกรีตในระยะยาว



รูปที่ 4 คอนกรีตอัดแน่นในท่อ เทเนื่องจาก
คอนกรีตเกิดการผันแปรจากการเยิ้ม



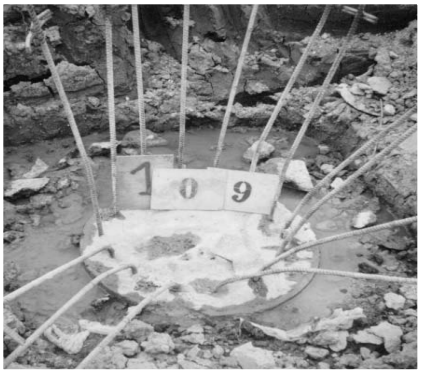
รูปที่ 5 การเยิ้มของคอนกรีตที่หัวเสาเข็ม



รูปที่ 6 โพรงใต้มวลรวมที่เกิดจากการเยิ้มของน้ำ
ในเนื้อคอนกรีต (ชัชวาลย์, 2536)



รูปที่ 7 สภาพคอนกรีตที่เจาะขึ้นมาจากหัว
เสาเข็มเจาะที่คอนกรีตเกิดมีการเยิ้ม



รูปที่ 8 น้ำซึมขึ้นตามแนวเหล็กเสริมยืนและ
ตามแนวเก่าของท่อ Tremie (ณรงค์,2543)

ในต่างประเทศได้มีผู้วิจัยและแนะนำส่วนผสมสำหรับให้เลือกใช้กับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่มีสภาวะแวดล้อมทั้งที่ปกติและผิดปกติจากชั้นดินทั่วไปไว้หลายท่านเช่น Bartholomew , (1979) ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Range of cement content and w/c in general use for concrete mixed (after Batholomew 1979)

Pile Type		Conditions		
		Normal	Moderately aggressive	Highly and very highly aggressive
Bored Piles Dry Process	Cement content (kg/m^3)	300 –450	350 – 450	380 –500
	Water/cement Ratio	0.5 –0.55	0.475 –0.5	0.45- 0.5
Bored Piles Wet process	Cement content (kg/m^3)	350-450	350 –450	400 – 500
	Water/cement Ratio	0.5 – 0.6	0.475 – 0.5	0.43 – 0.45

Reese and O' Neil, (1988) ได้ศึกษาและให้คำแนะนำว่าคอนกรีตที่เหมาะกับเสาเข็มระบบเจาะเปียกต้องผสมให้มีคุณสมบัติพิเศษมากกว่าคอนกรีตโครงสร้างปกติหลายประการคือต้องผสมให้มีคุณสมบัติดังนี้

ก) ต้องมีความสามารถในการเคลื่อนไหลดี (Excellent Fluidity)
ข) ต้องมีความสามารถในการอัดตัวแน่นด้วยน้ำหนักตัวเอง (Self compaction under self-weight)
ค) ต้องมีการทนทานต่อการแยกตัวและการเยิ้ม (Resistance to Segregation and Bleeding)
ง) ต้องสามารถควบคุมเวลาการก่อตัวได้ (Controlled setting)
จ) ต้องมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่ปกติ (Resistance to harsh environment)
ฉ) ต้องมีความทนทานต่อการถูกน้ำได้ดินชะล้าง (Resistance to leaching)
ช) ต้องมีกำลังอัดและความแข็งแรงตามที่ออกแบบไว้ (Appropriate Strength and Stiffness)

มีผู้ทำการวิจัยเรื่องค่าความทึบน้ำของคอนกรีตเสาเข็มไว้คือ Valenta,(1968) ได้ทดลองเจาะแก่นคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ที่คอนกรีตใช้มวลหยาบขนาด 20 มม., มี W/C Ratio ที่ 0.6 และคอนกรีตมีสภาพการอัดตัวแน่นที่สมบูรณ์ดี (Dense) พบว่าคอนกรีตที่เจาะขึ้นมามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 10^{-10} m/sec ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าการซึมน้ำต่ำจากการทดลองในห้องทดลอง

เนื่องจากงานติดตั้งเสาเข็มเจาะไม่สามารถไล่ฟองอากาศเพื่อให้คอนกรีตแน่นโดยการจี้ได้ ดังนั้นถ้าคอนกรีตที่ผสมมาไม่สามารถอัดแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเองแล้ว จะทำให้กำลังอัด, ความสมบูรณ์และความทนทานของคอนกรีตลดน้อยลงไป Xanthakos, (1994) ได้ศึกษาและแนะนำไว้ว่า คอนกรีตที่ใช้ในการเทใต้น้ำผ่านท่อเท (Tremie Concrete) จะสามารถอัดตัวแน่นได้โดยน้ำหนักตัวเองได้ดีนั้นควรมีค่า Compaction Ratio ประมาณ 0.95 –0.96

6. สรุป

การติดตั้งเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานกลางสำหรับให้ปฏิบัติในสนามเฉกเช่นในประเทศที่พัฒนาแล้ว การติดตั้งเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศที่ผ่านมาจึงเป็นการกำหนดมาตรฐานโดยผู้ออกแบบของแต่ละโครงการให้ผู้รับเหมาดำเนินการตามอย่างไม่สามารถบิดพลิ้วได้ แม้นข้อกำหนดที่มีออกมามีทั้งนำมาปฏิบัติได้ดีและที่ไม่เหมาะสมต่อการปฏิบัติงานจริงจนอาจเกิดปัญหาขึ้นกับงานเสาเข็มก็ตาม ในยุคโลกาภิวัฒน์นี้จึงควรจะถึงเวลาที่สถาบันทางวิศวกรรมเร่งออกมาตรฐานข้อกำหนดงานเสาเข็มเจาะออกมาใช้ให้เป็นสากลเฉกเช่นนานาประเทศเพื่อให้งานเสาเข็มเจาะสามารถก่อสร้างหรือติดตั้งออกมาแล้วมีมาตรฐานอ้างอิงได้กับมาตรฐานสากล

7. เอกสารอ้างอิง

1. ชัชวาลย์ เศรษบุตร, (2536) Concrete Technology , CPAC.

.2. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, (2543) ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพฯ,เอกสารการสัมมนาเรื่องฐาน ราก 2000 จัดโดย อนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา วสท. หน้า P ถึง 38

3. ADSC (1995) Standard and specification for the foundation drilling industry. (Incorporating ACI 336.1 94)

4. Bartholomew, R.F., (1979). The protection of concrete pile in aggressive ground conditions: An international appreciation in Proc. Conf. Recent Piling Developments in the Design and Construction of Piles. ICE, London, pp 131 –141

5. Flemming, W. G. K. and Sliwinski, Z. J. (1997), The use and influence of bentonite in bored pile construction CIRIA report PG3

6. Majano, R. E. and O' Neill, M. W. (1993, Effect of Mineral and Polymer Slurries on Perimeter Load Transfer in Drill Shafts. A Report to ADSC: The Inter. Asso. Of Foundation Drilling. University of Houston, Department of Civil Engineereing and Environmental Engineering, UHCE 93-1.

7. Reese, L. C.,O'Neil, M. W., (1988). Drill shafts: Construction Procedures and Design Method. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Virginia. Incorperation with ADSC, Dallas. Texas. USA.

8. The Institution of Civil Engineers, ICE (1996), Specification for piling and Embedded Retaining wall (1996) Thomas Telford. London.

9. Valenta, O., (1968). Durability of Concrete. Proc. 5th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, tokyo, Part III, 193

10. Xanthakos, P. P., (1994) Slurry Walls as Structural Systems. McGraw – Hill Inc.

การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะจากระยะเวลาก่อสร้าง และความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์

EFFECTS OF CONSTRUCTION TIME AND BENTONITE SLURRY VISCOSITY ON THE SHAFT CAPACITY OF BORED PILES

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1], เผด็จ รุจิขจรเดช [2], สิทธิพล สุรอังกูร [3] และพรพจน์ ตันเส็ง [4]

[1] กรรมการผู้จัดการ, [2] กรรมการและผู้อำนวยการโครงการ, [3] ผู้จัดการโครงการ
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร
[4] อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

บทคัดย่อ: มีการวิจัยในอดีตกล่าวถึงการด้อยค่าของแรงเสียดทานเสาเข็มเจาะที่เกิดจากเวลาก่อสร้างและความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์แต่ผลที่ประเมินไว้ยังไม่ชัดเจนพอ เพราะยังมีผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆเกิดขึ้นพร้อมกันอีก บทความนี้จึงเสนอผลทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะเปียกด้วยสารละลายฯที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดหน่วยแรงไว้ด้วยจำนวนสิบเอ็ดต้นที่ก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ พบว่าค่าความหนืดของสารละลายฯที่ไม่เกิน 55 sec/quart. จะไม่มีผลกระทบต่อเสาเข็มที่เห็นได้ชัดเจน แต่เสาเข็มต้นที่ใช้เวลาก่อสร้างนานกว่าจะมีค่าแรงเสียดทานลดน้อยกว่าต้นที่ใช้เวลาสั้นกว่า โดยการด้อยค่าจะลดลงในลักษณะเอ็กโปเนนเชี่ยล (Exponential Decrease) และค่าแรงเสียดทานที่ลดลงในสองสามชั่วโมงแรกของเวลาก่อสร้างจะมีปริมาณที่สูง ต่อจากนั้นอัตราการลดลงจะน้อยไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาประมาณ 40 ชั่วโมงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจึงจะเริ่มต่ำกว่าที่คาดการไว้ในขั้นตอนการออกแบบ

Abstract: Effect of construction time and bentonite slurry viscosity on the shaft friction capacity of bored piles have been studied by various investigators in the past but the extent to which these parameters effect the shaft capacity is still not clear. Major obstacle in this regard is that it is hard to normalize the shaft capacity degradation against other numerous parameters, which are influencing simultaneously. Results from eleven instrumented pile load tests, constructed with different bentonite slurry viscosities and construction times, in Bangkok are presented in this paper. It has been concluded that bentonite slurry viscosity, do not have significant effect on the shaft load transfer but considerably reduced with increase in construction time. Reduction in capacity seem to follow an exponential decrease with increase in construction time with major part of degradation within first 24 hours . Load carrying capacity would be reduced below design capacity at construction time beyond 40 hours.

KEYWORDS: Instrumented pile load test, Bentonite slurry viscosity, Thixotropy Characteristic.

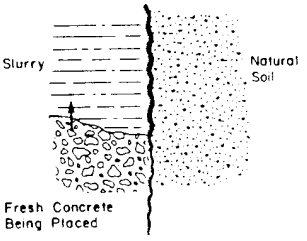
For further details, contact *Mr. Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd. 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangkok 10510,Thailand.*

1.บทนำ

เป็นที่ทราบกันว่าการติดตั้งเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นทรายจะมีผลกระทบต่อแรงเสียดทานและมีนักวิจัยในอดีตศึกษาเรื่องความหนืดและการอยู่นิ่งๆของสารละลายเบ็นโทไนท์ในรูเจาะ (Exposure time or Contact time) และเวลาในการก่อสร้าง (Construction Time) เพื่อหาผลทางลบต่อแรงเสียดทาน แต่ผลการวิจัยไม่สามารถแสดงผลให้เห็นได้ชัดเจนและมีรายงานการวิจัยหลายชิ้นที่สรุปแล้วขัดแย้งกัน เนื่องจากไม่สามารถแยกพารามิเตอร์ (Parameters) อื่นๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระหว่างก่อสร้างออกไปได้อย่างถูกต้อง จากปัญหาดังกล่าวจึงพบว่ามีงานวิจัยในชั้นดินที่คล้ายคลึงกันในอดีตหลายชิ้นที่สรุปผลออกมาตรงข้ามกัน บทความนี้จึงนำผลทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดหน่วยแรงไว้จำนวนสิบเอ็ดต้นมาศึกษา โดยที่เสาเข็มทุกต้นใช้เครื่องมือกับวิธีการก่อสร้างชนิดเดียวกันในชั้นดินที่คล้ายคลึงกัน จึงสามารถแยกพารามิเตอร์อื่นๆออกจนเหลือที่ต้องการวิเคราะห์ได้ ทำให้สามารถประเมินผลกระทบต่อแรงเสียดทานที่เกิดจากความหนืดและการอยู่นิ่งของสารละลายหรือจากเวลาการก่อสร้างได้ชัดเจนมากขึ้นอีกระดับหนึ่ง

2. ลักษณะเฉพาะและความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์

สารละลายเบ็นโทไนท์เป็นสารละลายที่มีความหนืด (Viscous Slurry) เมื่อปล่อยให้อยู่นิ่งๆในระยะเวลาหนึ่งที่เรียกว่า Exposure Time หรือ Contact Time ความเหนียวหนืดจะเพิ่มขึ้นเองและ Filter Cake จะก่อตัวขึ้น แต่เมื่อถูกกวนให้แตกตัว (Agitated) ความเหนียวหนืดจะลดลงกลับกลายเป็นใสได้อีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Thixotropy Characteristic สารละลายเบ็นโทไนท์ที่ใช้ในงานขุดเจาะจะสามารถต้านแรงดันดินและลอยแขวนตะกอนดินได้ดีนั้นต้องมีค่าความหนืด(Viscosity) ที่เหมาะสมและหาก Filter Cake ที่ผิวผนังรูเจาะไม่ถูกกำจัดออกก่อนหรือขณะเทคอนกรีต ตามรูปที่ 1 แล้วจะทำให้แรงเสียดทานลดลงได้



รูปที่ 1 การเทคอนกรีตใต้น้ำที่ถูกวิธีจะครูด Filter Cake ออกได้ (after Reese et al, 1985)

3. ข้อสังเกตจากรายงานการวิจัยบางงานในอดีต

แรงเสียดทานของเสาเข็มระบบเจาะเปียกที่ลดลง (Shaft Degradation) ในชั้นทรายมีสาเหตุจาก Filter Cake ก่อตัวขึ้นที่ผนังรูเจาะและไม่ถูกกำจัดให้หลุดออกก่อนหรือขณะเทคอนกรีต ส่วนในชั้นดินเหนียวมีสาเหตุจากการอ่อนตัว (Softening) ของชั้นดินรอบๆ รูเจาะ มีนักวิจัยในอดีตบางท่านให้ข้อสรุปหรือสิ่งที่ค้นพบที่น่าสนใจ เช่น

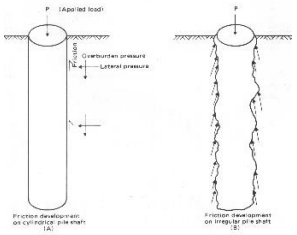
Corbette, [3] สรุปว่าการขุดเจาะเสาเข็มโดยใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ที่ใช้เวลาก่อสร้าง 48 ชั่วโมงแต่ถ่ายสารละลายใหม่ก่อนเทคอนกรีตเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ประเมินไว้ล่วงหน้า

Cernak, [2] พบว่าการรับน้ำหนักบรรทุกของแบเร็ตต์ (Barrettes) ในชั้นกรวดผสมทราย (Sandy Gravel) สองต้นแรกขุดโดยสารละลายเบ็นโทไนท์ใช้เวลาก่อสร้าง 8 และ 97 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่สามที่ขุดแบบแห้งและเทคอนกรีตทันทีที่ขุดเสร็จ ค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มสองต้นแรกลดลงไป 43% และ 56% ตามลำดับ

Littechild and Plumbridge, [5] สรุปผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะโดยสารละลายเบ็นโทไนท์ในโครงการหนึ่งในกรุงเทพฯ ว่าหากใช้เวลาการก่อสร้างนานและความหนืดของสารละลายมีค่าสูงแล้วค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มมีแนวโน้มที่จะลดลง

O'Neill et al, [9] สรุปว่าเสาเข็มเจาะโดยสารละลายเบ็นโทไนท์ต้นที่หนึ่งและต้นที่สองที่ก่อสร้างในชั้นดินแข็งสลับชั้นทรายแน่นมีค่าความหนืด เท่ากับ 37 และ 49 Sec/Quart และเวลาก่อสร้าง 5 และ 7 ชั่วโมงตามลำดับ มีผลการทดสอบการรับน้ำหนักแตกต่างกันน้อยมาก

Fleming and Sliwinski, [4] ได้รายงานผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะที่มีสภาพผิวขรุขระว่าจะรับน้ำหนักได้สูงกว่าเสาเข็มที่มีผิวเรียบเนื่องจากมีแรงต้านเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเจาะผิวเรียบกับเสาเข็มที่มีผิวขรุขระ รูปซ้ายมือคือลักษณะของแรงเสียดทานที่เกิด ส่วนรูปขวามือเป็นลักษณะแรงเสียดทานของเสาเข็มผิวขรุขระ(after Fleming and Sliwinski, 1977)

Majano and O' Neill, [6] รายงานว่าการถ่ายแรงเสียดทานจากผิวเสาเข็มสู่ดินชั้นต่างๆ เป็นขบวนการซับซ้อนมากที่เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัยทั้งด้านกายภาพและด้านเคมีของสารละลายเบ็นโทไนท์และลักษณะของวัสดุที่ใช้ (Geomaterials), ความขรุขระของผนังหลุมเจาะ, แรงดันของคอนกรีตเหลวต่อผิวผนังหลุมเจาะ, ค่าแรงเฉือนของดิน และปฏิกิริยาทางเคมีจากคอนกรีตเหลวเป็นต้น จนไม่สามารถหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้จากพารามิเตอร์เพียงหนึ่งหรือสองประการ จากการทดลองใช้ผงเบ็นโทไนท์ 72 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ความแตกต่างของความดัน 0.5 psi. ขณะสารละลายฯอยู่นิ่งๆ เป็นเวลา 4 และ 24 ชั่วโมงพบว่า Filter Cake เกิดขึ้นหนา 3.14 และ 4.5 ม.ม. ตามลำดับ เมื่อเทียบผลการทดลองกับงานในสนามทราบว่าเมื่อความแตกต่างของความดันในรูเจาะสูงมากแล้ว Filter Cake จะก่อตัวขึ้นเร็วและหนามากในเวลาเพียงสองสามชั่วโมงเท่านั้น และหาก Cake ไม่ถูกขจัดออกแรงเสียดทานจะลดลง และได้แสดงให้เห็นว่าหากความดันในชั้นทรายภายในรูเจาะมีความแตกต่างเพียง 10 psi การก่อตัวของ Filter Cake ที่มีความหนาถึง 6 ม.ม.จะเกิดขึ้นได้ภายในในระยะเวลาเพียงสองสามชั่วโมงเท่านั้น

4. การประเมินค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มทดสอบ

เสาเข็มทั้งสิบเอ็ดต้นเจาะโดยใช้เบ็นโทไนท์มีปลายเสาเข็มลึกตั้งแต่ 43 เมตรถึง 62 เมตรในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้เวลาก่อสร้างตั้งแต่ 9.8 - 43 ชั่วโมง เสาเข็มต้นที่ใช้เวลานานกว่า 24 ชั่วโมงก่อนลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตได้ควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ให้ได้ตามที่กำหนดไว้ใน ตารางที 1

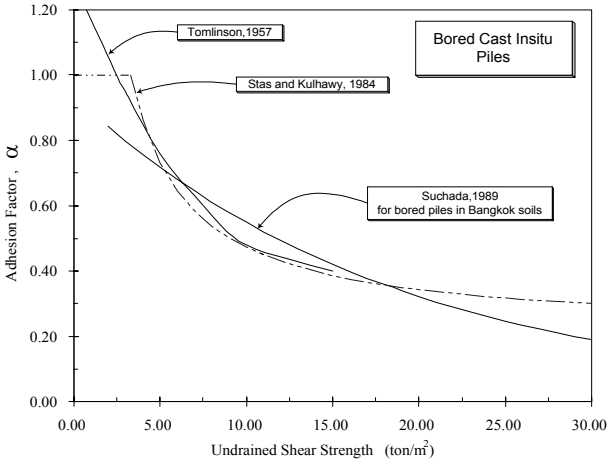
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารละลายฯ

Slurry Property	Control Limit
Viscosity (Marsh Cone)	30 - 60
Density (g/ml)	1.04 ─ 1.15
pH	7 ─ 11
Sand Content	Less than 4%

การประเมินค่าแรงเสียดทานใช้วิธี Total Stress ในชั้นดินเหนียวและ Effective Stress ในชั้นทราย ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Adhesion Factor), α ของชั้นดินกรุงเทพฯนำมาจากงานวิจัยของ Suchada, [12] ซึ่งค่า α ของ Suchada ในรูปที่ 3 สามารถเทียบเคียงได้กับงานวิจัยของ Tomlinson, [15] และของ Stas and Kulhawy [12] ค่า Cu (Undrained shear strength) ของชั้นดินเหนียวอ่อนใช้จากผลในห้องทดลองส่วน Cu ของชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Hard Clay) ประมาณจากค่า SPT (N- Value) จากสมการ $Cu = C_1$. N-value (ton/m^2) โดย C_1 มีค่าเท่ากับ 0.674 และ 0.507 สำหรับดินที่มีค่า High และ Low Plasticity ตามลำดับ ค่า C_1 ดังกล่าวข้างต้นหาได้จากงานวิจัยของ Samphantharak and Pitupakorn, [11] ส่วนค่าแรงเสียดทานในชั้นทรายประเมินจากสมการ $f = \sigma_V' .K_s.\tan\delta$ (ton/m^2) โดยที่ Coefficient of horizontal earth pressure (K_s) มีค่า 0.7, ส่วน δ มีค่า 0.75 ϕ , ค่า K_s นี้สอดคล้องกับที่ Fleming et al, [4] แนะนำไว้สำหรับเผื่อการเกิด Filter Cake ที่ทำให้แรงเสียดทานลดลงว่าไม่ควรใช้เกินกว่า 0.75, ส่วน Bowels, [1] แนะนำว่าการหาค่า ϕ (Angle of internal friction) จาก SPT-N values นั้นต้องปรับแก้ค่า N-Value เนื่องจากอิทธิพลของน้ำหนัก Overburden ก่อนนำไปใช้ ผู้ออกแบบบางท่านอาจใช้ค่า β (Empirical Factor) ซึ่งคำนวณจาก $K_s.\tan\delta$ มาใช้แทน ค่า Empirical Parameters ต่างๆ ที่ใช้คำนวนในบทความนี้นำมาจากเอกสารอ้างอิงที่วิจัยบนทฤษฎี Effective Overburden Pressure (σ_V')ที่ตั้งสมมุติฐานว่าสภาวะของแรงดันน้ำใต้ดิน (Hydrostatic Condition) เริ่มที่ระดับผิวดิน ไม่ได้พิจารณาถึงสภาวะน้ำใต้ดินที่ลดตัวต่ำลงจากการสูบน้ำบาดาล (Piezometric Draw Down Conditions) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

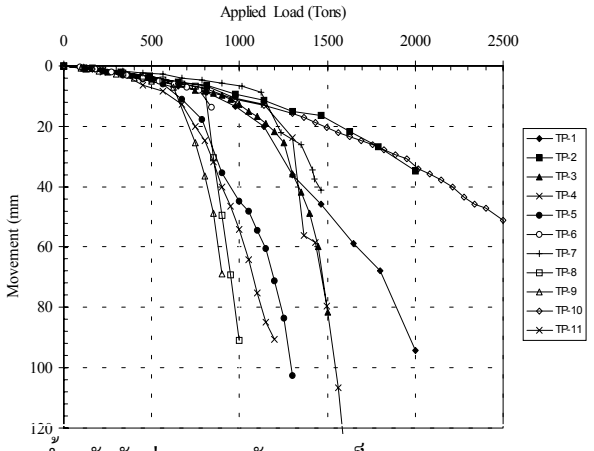
5. เสาเข็มทดสอบ

เสาเข็มทั้ง 11 ต้นใน ตารางที่ 2 มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดหน่วยแรงในตัวเสาเข็ม (Vibrating Strain Gages, VWSG) จำนวนห้าถึงเจ็ดระดับในระดับชั้นดินต่างๆ และมีการติดตั้งท่อใส่แกนเหล็กเส้นหยั่งปลายเสาเข็ม (Telltale Extensometer Rods) ไว้ใช้วัดการยืดหดตัว (Elastic Shortening) ของเสาเข็มขณะรับน้ำหนักและวัดค่าทรุดตัวของปลายเสาเข็มในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบ การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มกระทำโดยวิธีคงน้ำหนักบรรทุก (MLT) การทดสอบกระทำถึงน้ำหนักสองเท่าครึ่งของน้ำหนักบรรทุกออกแบบหรือถึงน้ำหนักที่คาดไว้ก่อนล่วงหน้า เสาเข็มบางต้นมีการทดสอบแบบ Quick Test จนได้น้ำหนักสูงสุดแล้วคงน้ำหนักไว้สองชั่วโมง เสาเข็มทุกต้นใน ตารางที่ 2 ยกเว้นหมายเลข TP-2 และ TP-10 ถูกทดสอบจนมีค่าการรับน้ำหนักที่สูงกว่าที่ได้คาดหมายไว้ เพื่อให้ได้ค่าทรุดตัวของเสาเข็มสูงพอที่จะทำให้ปลายเสาเข็มรับแรงแบกทานได้เต็มที่ดังแสดง



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่า adhesion factor สำหรับการคำนวณแรงเสียดทานเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ

ในรูปที่ 4 แรงเสียดทานคำนวณจากข้อมูล VWSG ที่การทรุดตัวสูงสุดแสดงในตารางที่ 2 ช่อง G



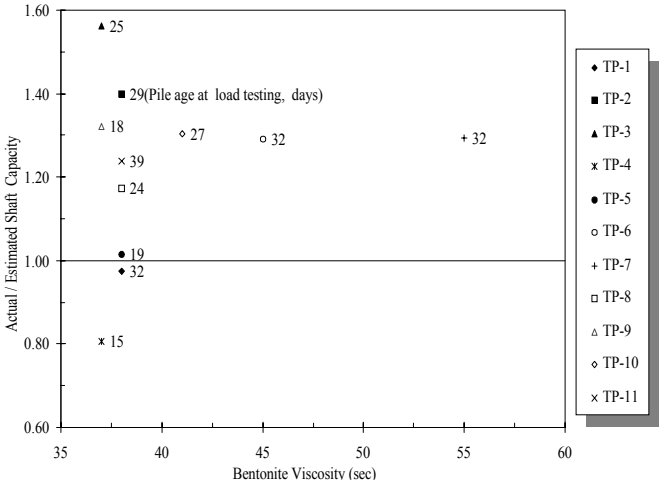
รูปที่ 4 กราฟแสดงน้ำหนักกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ (after Thasnanipan et al, 1998)

ตารางที่ 2 รายละเอียดการก่อสร้างและค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มทดสอบ 11 ต้น (Thasnanipan et al, 1998)

Pile No.	Pile Dimensions (m)	Bentonite Slurry Viscosity (sec)	Construction Time (hrs)	Pile Age (days)	Estimated Shaft Capacity (ton)	Actual Shaft Capacity (ton)	Actual/Estimated Shaft Capacity
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H = G/H)
TP-1	ϕ1.2 X 57.1	38	43.0	32	1230	1200	0.98
TP-2	ϕ1.2 X 46.3	38	13.1	29	930	1300	1.40
TP-3	ϕ1.0 X 46.5	37	9.8	25	800	1250	1.56
TP-4	ϕ1.0 X 49.5	37	38.7	15	930	750	0.81
TP-5	ϕ1.0 X 43.0	38	26.0	19	690	700	1.01
TP-6	ϕ1.0 X 46.0	45	11.8	32	620	800	1.29
TP-7	ϕ1.2 X 43.6	55	16.8	32	850	1100	1.29
TP-8	ϕ1.2 X43.5	38	12.3	24	640	750	1.17
TP-9	ϕ1.0 X 43.5	37	11.3	18	530	700	1.32
TP-10	ϕ1.2 X 62.0	41	32.4	27	1534	2000	1.30
TP-11	ϕ1.2 X 54.2	38	30.0	39	1050	1300	1.24

6. ผลกระทบจากความหนืดสารละลายเบ็นโทไนท์

รูปที่ 5 เป็นอัตราส่วนของค่าแรงเสียดทานที่ได้ต่อแรงเสียดทานที่ประมาณการไว้ (Actual/Estimated Shaft Capacity) กับความหนืด (Viscosity) ของสารละลาย ค่าที่หาได้มีลักษณะกระจัดกระจายแต่ไม่มีแนวโน้มของการด้อยค่าลงของแรงเสียดทาน เสาเข็มทดสอบหมายเลข TP-6, 7 และ 9 มีระยะเวลาการก่อสร้างแตกต่างกันไม่มากคือ 11.8, 16.8, 11.3 ชั่วโมง แต่สารละลายที่ใช้ในงานเสาเข็มทั้งสามต้นมีค่าต่างกันอย่างชัดเจน คือ 45, 55 และ 37 sec ตามลำดับแต่อัตราส่วน Actual / Estimated ของแรงเสียดทานเสาเข็มทั้งสามต้นนี้กลับมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าความหนืดไม่เกิน 55 sec ไม่มีผลต่อแรงเสียดทาน และจากข้อมูลกลุ่มเสาเข็มหมายเลข TP-1, 4 และ5 ซึ่งมีค่า Actual/Estimated น้อยที่สุด คือ 0.98, 0.81 และ1.01 นั้น มีความหนืดใกล้เคียงกันมากคือ 38,37และ 38 sec แต่เวลาก่อสร้างต่างกันคือ 43,38.7 และ 26 ชั่วโมงตามลำดับ จึงเป็นการตอกย้ำว่าความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์ หากอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ในรายการและมีการควบคุมตามขั้นตอนแล้วจะไม่มีผลกระทบโดยตรงกับค่าแรงเสียดทานเสาเข็มแต่อย่างไร



รูปที่ 5 ผลกระทบจากความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์ต่อแรงเสียดทานเสาเข็มเจาะ (after Thasnanipan et al 1998)

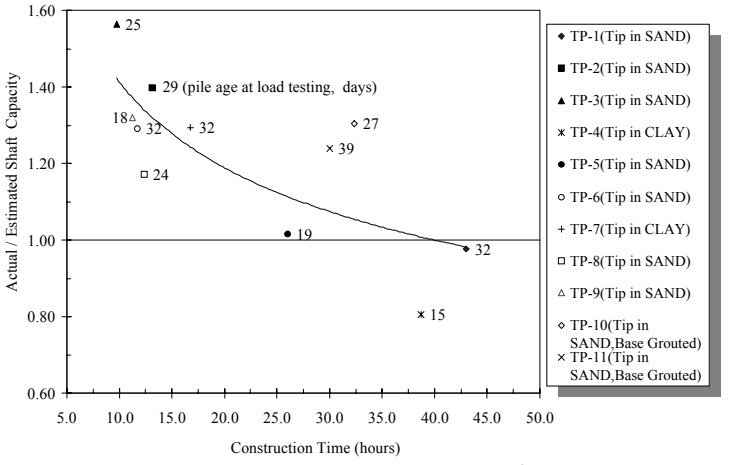
7.ผลกระทบจากระยะเวลาการก่อสร้าง

เสาเข็มทดสอบจำนวน 9 ต้นจาก 11 ต้นก่อสร้างด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ซึ่งมีค่าความหนืดที่แตกต่างกันในช่วงแคบๆ คือจาก 37 ถึง 41 sec ผลกระทบจากระยะเวลาการก่อสร้างต่อแรงเสียดทานสามารถดูได้จาก รูปที่ 6 ที่แสดงอัตราส่วนของแรงที่วัดได้ต่อแรงที่ประเมินไว้กับเวลาที่ใช้ก่อสร้างแม้ว่าค่าที่ได้จะค่อนข้างกระจัดกระจายก็ตาม แต่เส้นค่าเฉลี่ยที่ลากอย่างเหมาะสมได้แสดงให้เห็นแนวโน้มของการด้อยค่าลงจากเวลาการก่อสร้างจะลดลงในลักษณะ Exponential Decrease และจากเส้นค่าเฉลี่ยที่ได้นี้ยังเผยให้เห็นว่าแรงเสียดทานที่วัดได้ของเสาเข็มที่ใช้เวลาก่อสร้างภายใน 24 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าที่ประเมินไว้มาก (ซึ่งอาจเป็นได้ว่าเสาเข็มทดสอบที่ใช้วิจัยหาพารามิเตอร์ในอดีตมีการควบคุม

การก่อสร้างและสารละลายฯไม่เข้มงวดเช่นในปัจจุบันนี้) Fleming, [4] ได้แนะนำให้ทำการเทคอนกรีตให้แล้วเสร็จภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงภายหลังจากการเจาะเสร็จสิ้น และ Martin, [7]ได้แนะนำว่าระยะเวลาหลังจากการขุดเจาะเสร็จจนถึงเวลาเริ่มเทคอนกรีต ม่ควรเกิน 5 ชั่วโมง ส่วน MaJano et al, [6] และ O'Neill, [8] แนะนำว่าอย่าให้สารละลายในรูเจาะอยู่นิ่งๆ เกิน 4 ชั่วโมง จากตารางที่ 2 เสาเข็ม TP-4 มีอัตราส่วนแรงเสียดทานที่วัดได้ต่อการประเมินต่ำที่สุดคือ 0.81นั้น มีค่าความหนืดของสารละลายต่ำที่สุดคือ 37 sec แต่มีเวลาการก่อสร้างนานที่สุดเป็นลำดับที่สองคือ 38.7 ชั่วโมง และมีอายุขณะทดสอบน้อยที่สุดในกลุ่มคือ 15 วัน แสดงว่าแรงเสียดทานที่ด้อยค่าลงนั้นเกิดจากเวลาการก่อสร้างที่ยาวนานกว่าปกติหรือจากอายุของเสาเข็มที่ยังน้อยมากกว่าผลของความหนืดของสารละลายฯ และเป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณของแรงเสียดทานที่ด้อยค่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในเวลา 24 ชั่วโมงแรกและ เสาเข็มที่ก่อสร้างเสร็จยิ่งเร็วก็จะมีสมรรถนะดีมากขึ้นเท่านั้น

8. บทอภิปราย และข้อสรุป

จากรูปที่ 6 เวลาก่อสร้างประมาณ 40 ชั่วโมงจะได้ค่าแรงเสียดทานเท่ากับที่ประเมินไว้ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณทั่วไปนั้น จึงยังมีความเหมาะสมกับการก่อสร้างที่ไม่เกิน 40 ชั่วโมง แต่ต้องควบคุมคุณสมบัติของสารละลายอย่างเหมาะสม และการเลือกค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบเช่นค่า α , β, δ และ K_s จะต้องพิจารณาถึงระยะเวลาการก่อสร้างที่เป็นไปได้ให้ครอบครุมถึงผลกระทบที่อาจเกิดล่าช้าจากข้อจำกัดในการทำงานในแต่ละแห่งไว้ด้วย และต้องระลึกไว้เสมอว่าความดันของน้ำในชั้นทรายกรุงเทพฯ มีค่าลดลงจากการสูบน้ำบาดาล เมื่อเติมสารละลายฯในรูเจาะจนถึงระดับผิวดินแล้วความดันน้ำในหลุมเจาะจะสูงกว่าความดันน้ำในชั้นทรายถึงประมาณ 30 psi. เมื่อคำนวณตามทฤษฎีที่แนะนำโดย Majano et al [6] แล้ว Filter Cake จะก่อตัวขึ้นหนาในเวลาไม่เกินหนึ่งวินาที ดังนั้นแม้จะทำการก่อสร้างภายในระยะเวลาที่กำหนดอย่างเหมาะสมแล้วก็ตามก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการก่อตัวของ Filter Cake ในชั้นทรายกรุงเทพฯ ได้เลย จึงต้องหาวิธีกำจัดหรือควบคุม Filter Cake ไม่ให้เกิดหนามากเกินไป และจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้



รูปที่ 6 ผลกระทบจากระยะเวลาก่อสร้างต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มระบบเจาะเปียกโดยสารละลายเบ็นโทไนท์ (after Thasnanipan et al, 1998)

1. เวลาในการก่อสร้างที่ยาวขึ้นจะมีผลให้แรงเสียดทานด้อยค่าลงได้ อย่างไรก็ดีการด้อยค่าส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงแรกซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในการก่อสร้างตามปกติ
2. การด้อยค่าภายหลัง 24 ชั่วโมงนั้นแม้จะเกิดขึ้นแต่ไม่มาก สามารถเผื่อไว้ในขั้นตอนการออกแบบได้
3. หากสารละลายเบ็นโทไนท์ในรูเจาะอยู่นิ่งก่อนเทคอนกรีตไม่นานเกินไปเสาเข็มจะรับน้ำหนักได้สูง
4. ต้องคุมเวลาหลังทำความสะอาดสารละลายในรูที่เจาะเสร็จแล้วจนถึงเวลาเริ่มเทคอนกรีตให้สั้นที่สุด
5. เสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพฯ หากใช้เวลาก่อสร้างไม่เกิน 40 ชั่วโมง และความหนืดของสารละลายไม่เกิน 55 sec/qt. แล้วจะมีค่าแรงเสียดทานไม่น้อยกว่าค่าแรงเสียดทานที่ประเมินโดยใช้ตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้มีการวิจัยกันไว้ในทศวรรษก่อน

เอกสารอ้างอิง

1. Bowles, J.E, Foundation Analysis and Design., McGraw-Hill Inc., 1988.
2. Cernak, B., The Time Effect of Suspension on the Behaviour of Piers., Sixth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering., Vienna , Austria., 1976
3. Corbett, B. O., Davie, R.V. and Landford, A.D. , A Load Bearing Diaphragm Wall at Keinsington and Chelsa Town Hall, London. Conf. on Diaphragm Walls and Anchorages , ICE , London. Pp.57-62., 1975.
4. Fleming, W. K., Sliwinski, Z.J., The Use and Influence of Bentonite in Bored pile Construction., CIRIA Report PG3., 1977
5. Littlechild, B. and Plumbridge, G., Effect of Construction Technique on The Behaviour of Plain Bored Cast In Situ Piles Constructed under Drilling Slurry., 7th Intl Conf. and Exh. on Piling and Deep Foundation., Vienna,Pp. 1.6.1 –1.6.8., 1998.
6. Majano, R. E. and O' Neill , M. W., Effect of Slurry Dosage and Exposure Time on Perimeter Load Transfer of Drill Shaft., ADSC Publication.,1993.
7. Martin, W. S., Site Guide to Foundation Construction., CIRIA Special Publication 136.,1996
8. .O'Neill, M.W.., Effect of Mineral and Polymer Slurries on Drill Shafts. DFI. 16thAnnual Member Meeting Conference. "Recognizing Solutions to Today's Problems and Defining Tomorrow's Challenges"., Chicago. Pp.141-154 , 1991
9. O'Neill, M.W.and Reese, L.C, Behavior of Axially Loaded Drilled Shafts in Beaumont Clay. Report No. 89-8, The University of Texas at Austin. U.S.A., 1992.
10. Reese, L. C. and Tucker, K. L. (1985), Bentonite slurry in constructing drilled piers, Drilled piers and caisson II, ASCE convention., Denver, Colorado, USA .1985

11. Samphantharak, S. and Pitupakorn, W., Prediction of Prestressed Concrete Pile Capacity in Bangkok Stiff Clay and Clayey Sand., Eighth Southeast Asian Geotechnical Conference, Kuala Lumpur, 1985.
12. .Stas, C. V. and Kulhawy, F. H., Critical Evaluation of Design Methods for Foundations Under Axial Uplift and Compression Loading, Report EL-3771, EPRI, Palo Alto, California, USA., 1984.
13. Suchada, . Bored Piles in Bangkok Subsoil., M. Engg. Thesis., AIT., Bangkok., 1989.
14. Thasnanipan, N., Baskaran, G. and Anwar, M. A., Effect of Construction Time and Bentonite Viscosity on Shaft Capacity of Bored Piles. 3rd Intl. Seminar Deep Foundation on Bored and Auger Piles., Ghent, Belgium. Pp 171-177.,1998.
15. Tomlinson, M. J., Pile Design and Construction Practice. 4th edition., Chapman & Hall,1995

ความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้ง

DAMAGES TO BORED PILES AT THE POST INSTALLATION STAGE

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1], ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์ [2] และกมล อยู่ยืนพัฒนา [3]

[1] *กรรมการผู้จัดการ* , [2] *กรรมการอำนวยการ* , [3] *ผู้อำนวยการโครงการ*

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ: ความเสียหายของเสาเข็มเจาะอาจเกิดขึ้นได้ในหลายขั้นตอนของการทำงาน โดยความเสียหายอาจเกิดในทางโครงสร้างเสาเข็ม (Structural Defects) หรือเกิดในทางธรณีเทคนิค (Geotechnical Defects) ก็ได้ อย่างไรก็ตามมีผลการสำรวจถึงความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะพบว่าส่วนใหญ่ของความเสียหายนั้นได้เกิดขึ้นจากสาเหตุในขั้นตอนภายหลังการติดตั้งเสาเข็ม (Post Installation Stage) เช่น เกิดจากการขุดดินก่อสร้างฐานราก, การสกัดหัวเสาเข็ม หรือเกิดจากน้ำใต้ดินตามธรรมชาติไหลผ่านคอนกรีตเสาเข็มที่ยังไม่แข็งตัวหรือเกิดจากการเยิ้มของน้ำในคอนกรีต มีจำนวนสูงกว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง (ติดตั้ง) เป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้เกี่ยวข้องกับการทำงานในขั้นตอนภายหลังการติดตั้งเสาเข็มเสร็จแล้ว ต้องทำงานอย่างเป็นขั้นตอนด้วยวิธีการที่เหมาะสมและด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันความเสียหายเกิดขึ้นต่อเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างไว้แล้ว

Abstract: Structural and geotechnical defects in bored piles can be developed in many phases of construction works. However, according to the investigations, higher percentage of defects were caused at post installation stage and commonly caused by pile head cutting, adjacent excavation works and flow of ground water through newly formed concrete of bored piles or from bleeding of concrete. Therefore, in order to prevent damages to bored piles at post installation stage, all parties concerned should employ appropriate and careful construction methods.

KEYWORDS: Pile Damages, Underground water flow, Collapsible Loess

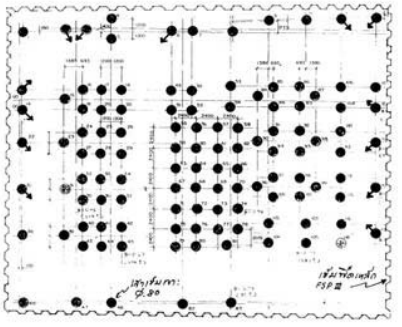
---

For further details, contact *Mr. Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd. 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangkok 10510,Thailand.*

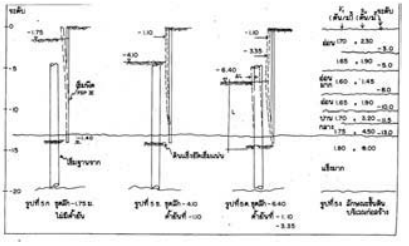
1. บทนำ

ผู้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างฐานรากที่ใช้เสาเข็มเจาะส่วนใหญ่มักจะเข้าใจว่าความเสียหายที่พบในงานเสาเข็มเจาะนั้นทั้งหมดเกิดขึ้นในขั้นตอนการก่อสร้าง(ติดตั้ง)เสาเข็ม Thorburn and Thorburn ได้รวบรวมสาเหตุต่างๆไว้ในเอกสารอ้างอิง [10] และอีกหลายท่านได้สำรวจเสาเข็มโดย Low Strain Integrity Test (Seismic Test) เพื่อหาความเสียหายของเสาเข็มเจาะว่าอาจเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนและจากสาเหตุใดบ้าง จากผลการสำรวจของทุกรายได้พบข้อมูลที่สอดคล้องกัน คือ Sliwinski et al, [6] สรุปว่าจากการตรวจสอบเสาเข็มเจาะ จำนวน 5,000 ต้นในปี 1982 ได้พบเสาเข็มจำนวน 73 ต้น (1.46%) เกิดความไม่สมบูรณ์ขึ้นโดยสามารถแยกแยะเสาเข็มในส่วนที่เกิดปัญหาขึ้นว่าเกิดจากมีดินเจือปนในคอนกรีตจำนวน 33 %, เกิดจากคอนกรีตคุณภาพต่ำจำนวน 6%, เกิดโพรงจำนวน 3% และเกิดจากการขุดดินฐานรากและสกัดหัวเสาเข็มจำนวนสูงถึง 58%, Fleming et al, [3] รายงานผลตรวจสอบเสาเข็ม 9,550 ต้นระหว่างปี 1981 ถึง 1982 ว่าพบเสาเข็มที่เกิดความไม่สมบูรณ์ขึ้นในขั้นตอนการติดตั้งเสาเข็มมีจำนวน 0.5% แต่เกิดจากการสกัดหัวเสาเข็มเจาะหรือจากการขุดดินฐานรากมีอัตรารวมกันสูงกว่ามากคือประมาณ 1.5 ถึง 2.0% ตามลำดับ Ellway, [2] ได้ตรวจสอบเสาเข็ม จำนวน 4,400 ต้นในปี 1985 และรายงานว่าพบเสาเข็มจำนวน1.33% มีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นจากขั้นตอนการขุดดินฐานรากและสกัดหัวเสาเข็ม ส่วนอีกจำนวน 1.33% เกิดจากคุณภาพคอนกรีตต่ำหรือมีสิ่งเจือปนที่หัวเสาเข็มในระดับสองเมตรบน และจำนวนอีก1.33% สุดท้ายพบว่ามีดินเจือปนในคอนกรีตหรือคอนกรีตเกิดขาดแหว่งหายไป ที่หัวเสาเข็มระดับต่ำกว่าสองเมตร

ประจิต, [1] ได้ทำการศึกษางานขุดห้องใต้ดินในกรุงเทพฯ ด้วยกำแพงเข็มพืดเหล็กมีค้ำยันภายในพบว่าเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซม. บริเวณใกล้เคียงกับเข็มพืดรอบๆบ่อขุดเกิดเคลื่อนเข้าสู่ภายในบ่อขุดอย่างเป็นระบบ ตามรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 จากการตรวจสอบด้วย Seismic Test พบว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวนี้โดยเสาเข็มบางต้นมีรอยแตกร้าวซึ่งเห็นได้จากแก่นคอนกรีตที่ถูกเจาะขึ้นมา ผู้ศึกษาได้สรุปว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงเข็มพืดเหล็กพาดินไปดันเสาเข็มให้เคลื่อนตัวจนเกิดการร้าวขึ้น และ Thasnanipan et al, [7] ได้รวบรวมผลการทดสอบ Sonic Integrity Test ของเสาเข็มเจาะจำนวน 8,629 ต้นในชั้นดินกรุงเทพฯ พบว่าเสาเข็มจำนวนประมาณ 3.3% (285ต้น) มีความบกพร่องเกิดขึ้นโดยเกิดจากคอนกรีตมีคุณภาพต่ำที่ระดับไม่เกิน 3 เมตรจำนวน 0.1%, เกิดจากเสาเข็มคอดจำนวน 1.0% และเกิดการร้าวจากขั้นตอนการขุดดินฐานรากและสกัดหัวเสาเข็มมีจำนวนสูงถึง 2.2% บทความนี้จึงนำเสนอกรณีศึกษาความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้งในเพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถนำไปวิเคราห์สาเหตุและหาทางป้องกันความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ



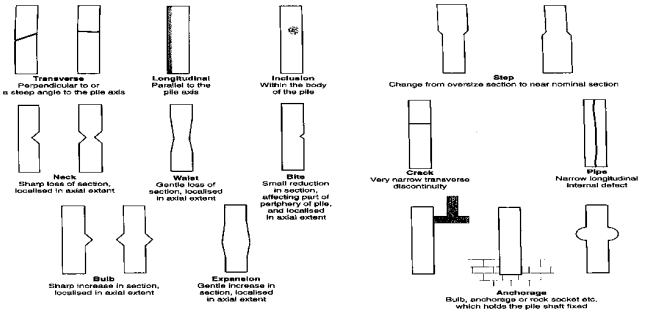
รูปที่ 1 ทิศทางการเคลื่อนตัวของเสาเข็มใกล้แนวเข็มพืดกันดิน (ประจิต, 2538)



รูปที่ 2 การเคลื่อนตัวด้านข้างของเข็มพืดเหล็กดันเสาเข็ม(ประจิต, 2538)

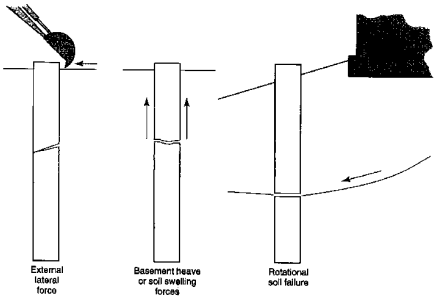
2. ลักษณะความบกพร่องต่างๆที่อาจเกิดขึ้นในเสาเข็มเจาะ

Poulos, [5] ได้กล่าวให้ทราบว่าความบกพร่องในงานเสาเข็มจะมีอยู่สองลักษณะคือความบกพร่องทางโครงสร้าง ((Structural Defects) เช่นร้าว, คอด, คุณภาพคอนกรีต ฯลฯ และความบกพร่องทางธรณีเทคนิค (Geotechnical Defects) เช่นการอ่อนตัวของดินโดยรอบเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม สถาบันการวิจัยและรวบรวมข้อมูลอุตสาหกรรมการก่อสร้างแห่งสหราชอาณาจักร (Construction Industry Research and Information Association), หรือในชื่อย่อว่า CIRIA โดย Turner, [11] ได้กำหนดการเรียกขานรูปลักษณะความบกพร่องหรือเสียหายแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเจาะ ตามรูปที่ 3 และได้แยกหมวดหมู่เสาเข็มเจาะที่เกิดมีปัญหาขึ้นไว้เป็น 4 หมวด โดยในแต่ละหมวดจะสามารถบ่งชี้ถึงความบกพร่องหรือความเสียหายได้ว่าเกิดขึ้นในขั้นตอนใดและเป็นความเสียหายในลักษณะใด ดังนี้คือ



รูปที่ 3 การเรียกชื่อลักษณะเฉพาะและข้อบกพร่องแบบต่างๆของเสาเข็มเจาะ (after Turner 1997)

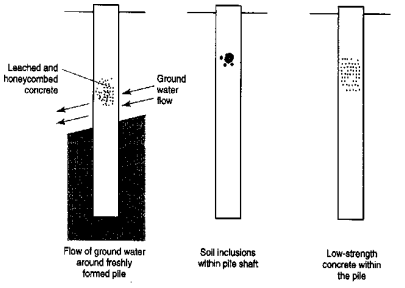
2.1 หมวดที่หนึ่ง แบบ เอ (Type A): ก่อสร้างแล้วมีรูปร่างผิดจากที่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนการติดตั้ง เสาเข็มในหมวดนี้คือเสาเข็มที่มีรูปร่างลักษณะตามคำจำกัดความในรูปที่ 3 ว่าคอด (Necks), เรียว(Waists), บวม(Bulbs), ขยาย(Expansions), Steps หรือ แหว่ง(Bites) นั่นเอง



รูปที่ 4 Type B รอยร้าวที่เกิดจากแรงดันหรือดึงภายนอก (after Turner, 1997)

2.2 หมวดที่สอง แบบ บี (Type B): เกิดการแตกหรือร้าวตามขวางของหน้าตัดเนื่องจากมีแรงดันหรือแรงดึงจากภายนอกที่ไม่ได้คาดคิดไว้มากระทำต่อเสาเข็มในภายหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ตามรูปที่ 4 ความเสียหายในหมวดนี้เป็น Structural Defects ซึ่งมักเกิดในขั้นตอนขณะขุดดินฐานรากหรือจากการสกัดหัวเสาเข็มโดยจะถูกดินหรือเครื่องจักรขุดดินดัน, กระแทกหรือเกี่ยวถูกหัวเสาเข็มเสียหาย บางกรณีรอยร้าวอาจเกิดขึ้นจากการยืดหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage)หรือการอูดตัวของดิน (Ground Heave) ทำให้เกิดแรงดึงในตัวเสาเข็มจนร้าวได้เช่นกัน

2.3 หมวดที่สาม แบบ ซี (Type C): เกิดปัญหาขึ้นกับคอนกรีตตามรูปที่ 5 ซึ่งอาจเกิดจากเทคอนกรีตผิดวิธี เช่นเทโดยตรงลงไปในรูเจาะที่มีน้ำหรือเกิดจากคุณภาพคอนกรีต (เช่น เกิดการเยิ้ม, อัดตัวไม่แน่นด้วยน้ำหนักตัวเองฯลฯ) หรือเกิดจากน้ำใต้ดินไหลชะคอนกรีตเสาเข็มที่เทเสร็จ



รูปที่ 5 Type C ความบกพร่องที่เกิดในคอนกรีตลักษณะต่างๆ (after Turner, 1997)

แต่ยังไม่แข็งตัวเสียหาย ปัญหาหมวดนี้เป็น Structural Defect อาจเกิดขึ้นได้ทั้งขณะทำการติดตั้งหรือในภายหลังก็ได้ กำลังของคอนกรีตที่ลดต่ำลงอาจเกิดขึ้นช้า ๆ หรือทันทีทันใดเลยก็ได้ ขึ้นอยู่ลักษณะและความรุนแรงของปัญหาซึ่งรวมไปถึงคอนกรีตที่ปนเปื้อนสิ่งแขวนลอยขณะทำการติดตั้ง

2.4 หมวดที่ 4 แบบ ดี (Type D): เป็นปัญหาแบบ Geotechnical Defects ที่เกิดกับปลายเสาเข็ม (Poor Toe Conditions) หรือเกี่ยวกับแรงเสียดทานจากการอ่อนตัวของรูเจาะ (Softening of Bored Hole) หรือ Filter Cake ของสารละลายจับตัวหนาที่ผนังรูเจาะ ปัญหาหมวดนี้จะเกิดในขั้นตอนติดตั้งเสาเข็มและจะมีผลกระทบโดยตรงกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ปัญหานี้เกิดขึ้นในขั้นตอนการติดตั้ง

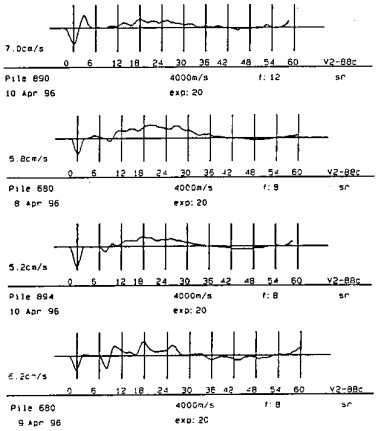
3. กรณีศึกษาความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ

3.1 เสียหายจากการขุดดินโดยใช้เข็มพืดเหล็กและลาดดิน

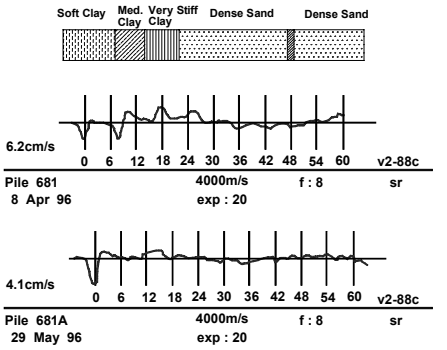
ได้มีการสำรวจความเสียหายของเสาเข็มเจาะในการก่อสร้างในกรุงเทพฯโครงการหนึ่งที่เกิดจากการขุดดินฐานรากเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0, 1.2 และ 1.5 เมตร ลึก 59 เมตรจำนวนกว่า 90 ต้นที่ใช้ระบบป้องกันดินชนิดเข็มพืดเหล็กชนิด FSP III ลึก 16 เมตร ร่วมกับลาดดินเป็นตัวป้องกันดินเคลื่อนตัวตามรูปที่ 6 ก่อนที่จะขุดถึงระดับสุดท้ายคือ 8.10 เมตร ดินเกิดการเคลื่อนตัวและสังเกตพบว่าผิวดินในระยะห่างจากหลังเข็มพืดมีการทรุดตัวลง ผู้รับเหมางานอาคารจึงเสริมค้ำยันลาดเอียง (Temporary Raking Strut) เพื่อพยายามหยุดการเคลื่อนตัวของดินหลังการแก้ไขแล้วได้ตรวจสอบเสาเข็มจำนวนกว่า 450 ต้น ด้วย Sonic integrity test (Seismic Test) พบว่าเสาเข็มมีการเสียหายตั้งแต่เล็กน้อยจนถึงมาก อันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวดังกล่าวข้างต้นจำนวนรวม 32 ต้น ตามรูปที่ 7 ซึ่งเป็นความเสียหายแบบ Type B อันเป็น Structural Defect



รูปที่ 6 การป้องกันดินเคลื่อนตัวโดยเสาเข็มพืดเหล็กและลาดดิน (after Thasnanipan et al, 1998)



รูปที่ 7 ผลการตรวจสอบความเสียหายต่อเสาเข็ม

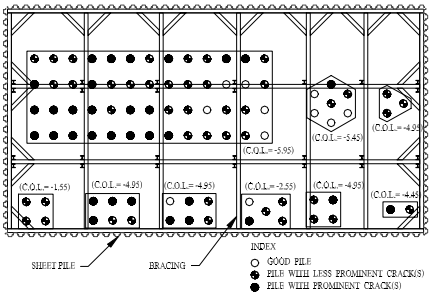


รูปที่ 8 ภาพแสดงผลการทดสอบก่อนและหลังการซ่อมเสาเข็ม (after Thasnanipan et al, 2000)

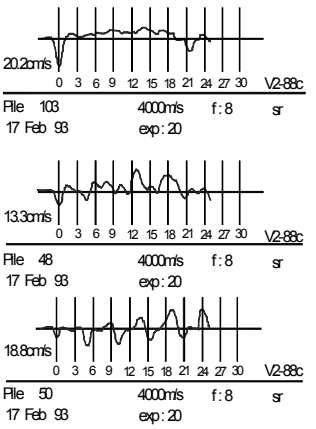
ผู้รับเหมางานอาคารทำการซ่อมแซมโดยเจาะคอนกรีตถึงระดับต่ำกว่ารอยร้าวแล้วฉีดน้ำปูนผสมพิเศษลงไปแทนที่ส่วนที่เสียหาย สำหรับต้นที่ถูกดินดันหรือรถขุดเกี่ยวจนเสียหายมาก ผู้รับเหมาอาคารทำการสกัดส่วนที่เสียหายออกออกแล้วหล่อกลับขึ้นมาใหม่ ซึ่งการซ่อมแซมได้ผลดีทั้งสองวิธีและเสียค่าใช้จ่ายไม่มากแล้วทำการทดสอบซ้ำตามรูปที่ 8

3.2 ความเสียหายของเสาเข็มเจาะจากการอูดของดิน (Soil Heave or Swelling)

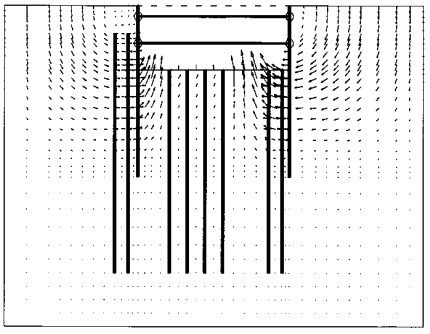
โครงการก่อสร้างในถนนสุขุมวิท ชั้นดินประกอบด้วยดินอ่อนลึก 15 เมตรและอ่อนปานกลางต่ำลงไปถึง 17 เมตร ลึกลงไปเป็นชั้นดินแข็งถึงแข็งมากถึงระดับกว่า 25 เมตร เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็มระบบเจาะแห้งขนาดหน้าตัดกลม 60 ซม.ลึก 26 เมตรเสริมเหล็กยืน ขนาด 16 มม. 6 เส้น จำนวน 143 ต้น ระบบกันดินชั่วคราวผู้รับเหมาอาคารใช้เสาเข็มพืดเหล็กยาว 14 เมตรชนิด FSP III มีค้ำยันสองชั้นที่ 1.0 และ 3.5 เมตร ระดับขุดอยู่ที่ 0.85 และ 5.95 เมตรตามลำดับ ในการขุดดินไม่เห็นว่าเข็มพืดเหล็กมีการโก่งจนผิดปกติ แต่จากการตรวจสอบเสาเข็มทุกต้นโดย Seismic Test พบว่าเสาเข็มที่อยู่ในบ่อขุดเกิดรอยร้าวถึง 71 ต้น (84%)โดยจะพบรอยร้าวอยู่ที่ระดับประมาณ 5.5 ถึง 13.8 เมตรวัดจากดินเดิม เสาเข็มที่ร้าวมากจำนวน 24 ต้นและที่ปกติ 1 ต้นถูกทดสอบด้วยวิธี Dynamic Load Test เพื่อเปรียบเทียบกัน ผลทดสอบพบว่าเสาเข็ม 22 ต้นรับน้ำหนักได้เกินกว่าที่กำหนดไว้ มีรับน้ำหนักได้ 90% ของที่ออกแบบไว้จำนวน 2 ต้น และรับน้ำหนักต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ 50% จำนวน 1 ต้น รูปที่ 9 เป็นผังเสาเข็ม รูปที่ 10 เป็นผลการทดสอบเสาเข็มที่เสียหาย ซึ่งต่อมาถูกซ่อมแซมโดยการเจาะแก่นคอนกรีตและอัดฉีดด้วยน้ำปูนพิเศษ ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์โดย โปรแกรม Plaxis ตามรูปที่ 11 ทำให้ทราบสาเหตุของความเสียหายว่าเกิดจากการที่ขุดดินส่วนบนออกทำให้ดินด้านล่างที่ถูกดินส่วนบนกดทับไว้เป็นหมื่นหรือล้านปี เกิดการพองหรืออูดตัวขึ้น (Swelling หรือ Heaving) จนเกิดแรงดึง (Tension Force) กระทำต่อเสาเข็มที่เสริมเหล็กไว้น้อยจนเกิดการร้าวขึ้น และจากการวิเคราะห์นี้ยังพบว่า Moment ที่เกิดในเสาเข็มเนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินจากงานขุดมีค่าสูงกว่า Ultimate Moment Capacity ของเสาเข็มจนเกิดร้าวที่ระดับรอยต่อของชั้นดินอ่อนกับดินแข็งเป็นส่วนใหญ่ ตามรูปที่ 12 จากผล Sonic Integrity test (Seismic Test) พบว่าเสาเข็มบางต้นเกิดรอยร้าวที่หลายระดับเนื่องจากเกิดทั้งแรงดึงและแรงดันในเสาเข็มต้น ซึ่งตรงกับ ความเสียหายแบบ Type B อันเป็น Structural Defect ที่เกิดขึ้นภายหลังการติดตั้ง(ก่อสร้าง)เสาเข็ม



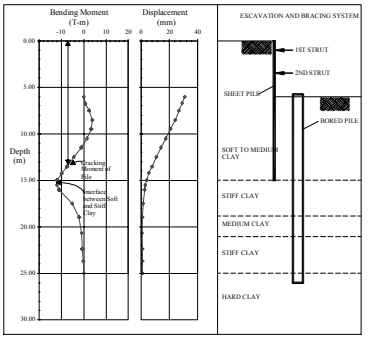
รูปที่ 9 ผังเสาเข็มในบ่อขุดที่เกิดความเสียหาย (after Thasnanipan et al, 1998)



รูปที่ 10 ผลการทดสอบเสาเข็มดี, เสียหายปานกลางและเสียหายมาก



รูปที่ 11 การวิเคราะห์โดย FEM
(after Thasnanipan et al, 2000)



รูปที่ 12 ค่าโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวที่คำนวณได้ของเสาเข็มต้นใกล้กับเข็มพืดมากที่สุด(after Thasnanipan et al, 2000)

3.3 ความเสียหายเนื่องจากคุณภาพของคอนกรีตเสาเข็มและจากสภาวะในชั้นดิน

3.3.1 เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 เมตรก่อสร้างที่ริมฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาเมื่อถูกสกัดถึงระดับตัดที่ระดับ 6.00 เมตรแล้ว พบว่ามีน้ำซึมขึ้นมาที่หัวเสาเข็มตรงแนวเหล็กเส้นและตรงแนวท่อเทคอนกรีตจนหัวเสาเข็มชื้นหลายต้นตามรูปที่ 13 ผู้รับเหมาจึงเจาะแก่นคอนกรีตส่วนบนขึ้นมาพบว่าคอนกรีตเนื้อไม่แน่นมีลักษณะพรุน (Capillary Porosity) เมื่อน้ำในแม่น้ำขึ้น น้ำจึงซึมผ่านคอนกรีตขึ้นสู่ด้านบนด้วย Capillary Suction ตามรูพรุนที่ต่อเนื่องกัน (Inter Connection Pore) ต่อมาผู้รับเหมาโครงสร้างซ่อมโดยสกัดคอนกรีตส่วนที่พรุนออกและหล่อขึ้นมาใหม่ สาเหตุของการพรุนเชื่อว่าเกิดมาจากการเยิ้มของน้ำในคอนกรีตหรือคอนกรีตเหลวถูกชะล้างโดยน้ำใต้ดินที่ขึ้นลงตามระดับน้ำในแม่น้ำซึ่งเป็นความเสียหายแบบ Type C อันเป็น Structural Defect ที่เกิดขึ้นภายหลังการติดตั้งเสาเข็มเสร็จแล้ว

3.3.2 Thorburn et al, [9] ได้สำรวจพบความเสียหายจากภัยธรรมชาติต่อเสาเข็มเจาะเกิดขึ้นชนิดที่ไม่คาดคิดมาก่อน เนื่องจากบริเวณก่อสร้างเคยเป็นทางน้ำเก่าและมีน้ำไหลผ่านเมื่อถมปรับบริเวณก่อสร้างแล้วแต่ผู้เกี่ยวข้องไม่ทราบว่าทางน้ำเก่ายังไหลผ่านใต้ดินได้อยู่ เมื่อเทเสร็จและถอนปลอกเหล็กออกแล้วนั้น ขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวมีน้ำใต้ดินไหลผ่านมาชะคอนกรีตเสาเข็มเสียหาย ตามรูปที่ 14 ความเสียหายนี้เป็น Structural Defect



รูปที่ 13 (ซ้ายมือ) น้ำซึมที่หัวเสาเข็มเนื่องจากคอนกรีตไม่แน่นตัว

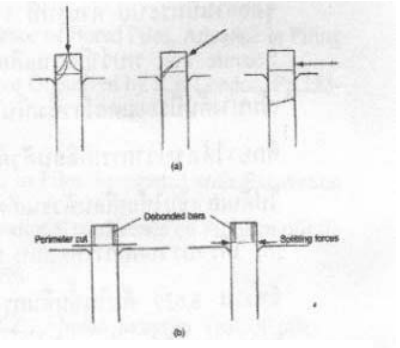
รูปที่ 14 (ขวามือ) ทางน้ำใต้ดินชะคอนกรีตเหลวเสียหาย
(Thorburn et al,. 1977)



3.3.3 ชั้นดินในภาคอีสานบางจังหวัดมีชั้นดินที่ไม่คงรูป (Collapsible Soil) เป็นชั้นฝุ่นสีแดง ซึ่งเป็นชั้นดินที่เกิดขึ้นจากลมพัดพาฝุ่นมาทับถมเป็นชั้นเหนือระดับน้ำใต้ดิน ในทางธรณีวิทยาจะมีชื่อเฉพาะเรียกดินที่ทับถมชนิดนี้ว่า Loess Deposits ชั้นดินชนิดนี้จะต่างจากชั้นดินในกรุงเทพฯ ที่เกิดจากการทับถมของของตะกอนที่ถูกน้ำพัดพามาทับถมเป็นชั้นๆที่ทางธรณีวิทยาจะเรียกชื่อเฉพาะว่า Alluvial Deposits ในฤดูแล้งชั้นดินฝุ่นแดง (Loess) จะแห้งมีความชื้น (Moisture Content) ต่ำและรับน้ำหนักได้สูง แต่เมื่อดินชนิดนี้สัมผัสกับน้ำใต้ดินในฤดูฝนหรือน้ำผิวดินอื่นๆ ที่ไหลซึมลงไปน้ำจะถูกดูดซึมซับเข้าในมวลดินอย่างรวดเร็วจนความชื้นเพิ่มขึ้นสูงและจะกลับกลายเป็นชั้นดินเหลวไม่คงรูปภายในเวลาสองชั่วโมงและจะไม่สามารถรับแรงจากภายนอก หรือแม้แต่น้ำหนักของตัวเองก็ยังรับไม่ได้ แสดงว่าดินฝุ่นแดง (Loess) นี้สามารถดูดซับน้ำได้ดีและรวดเร็ว ดังนั้นถ้าบริเวณก่อสร้างเสาเข็มเจาะในฤดูแล้งหากมีชั้นดินชนิดนี้อยู่ในบริเวณก่อสร้างด้วยแล้ว ดินชั้นนี้ในฤดูแล้งจะแห้งและมีค่าความชื้นต่ำเมื่อเทคอนกรีตเสาเข็มเสร็จและถอนปลอกเหล็กออกแล้ว คอนกรีตที่ยังเหลวอยู่จะสัมผัสโดยตรงกับชั้นดินฝุ่นแดงนี้ ของเหลวในคอนกรีตสดจะถูกมวลดินที่แห้งดูดซึมซับไปจนคอนกรีตที่เทไว้เกิดการพรุนและระดับคอนกรีตจะทรุดตัวต่ำลงเสียหายได้ และหากคอนกรีตมีการเยิ้มของน้ำ (Bleeding) เกิดขึ้นด้วยแล้วความเสียหายจะรุนแรงมากขึ้น ความเสียหายนี้เป็น Structural Defect การป้องกันต้องออกแบบให้คอนกรีตมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 400-500 กก./ม^3 และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ไม่เกิน 0.45 งานวิจัยของ Gasaluck et al, 2000. รายงานว่าได้พบชั้นดินชนิดนี้ในมหาวิทยาลัยขอนแก่นโดย ชั้นดินนี้มีความหนาตั้งแต่สองสามเมตรจนถึงหกเมตร

3.4 ความเสียหายเนื่องจากการสกัดหัวเสาเข็ม

ได้พบว่าในบางโครงการที่มีการทำเสาเข็มนำร่อง (Pilot Piles) ไว้สำหรับตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มก่อนและหลังการขุดดินและสกัดหัวเสาเข็ม โดยทำการหล่อคอนกรีตเสาเข็มไว้สูงถึงพื้นดินและทำการทดสอบ Sonic Integrity Testไว้ก่อนหนึ่งครั้งและพบว่าไม่มีข้อบกพร่องนั้น เมื่อการขุดดินฐานรากและสกัดหัวเสาเข็มเสร็จแล้วจึงทดสอบอีกครั้งกลับพบว่าเสาเข็มเกิดร้าวในภายหลังที่ต่ำกว่าระดับตัดใช้งาน แสดงว่าระหว่างขั้นตอนการขุดดินหรือสกัดหัวเสาเข็มได้ก่อความเสียหายต่อเสาเข็มขึ้น สถาบันวิศวกรรมโยธาและสมาพันธ์ผู้เชี่ยวชาญงานเสาเข็มแห่งอังกฤษ Institution of Civil Engineers and the Federal of Piling Specialists, London, [9] ได้กำหนดว่าการใช้เครื่องจักรกลขุดดินและสกัดหัวเสาเข็มมักจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเสาเข็ม จึงแนะนำว่าการสกัดหัวเสาเข็มควรใช้อุปกรณ์เบาถือได้ด้วยมือ หรือใช้หัวตัดคอนกรีตระบบไฮโดลิค และระยะ 300 มม. สุดท้ายควรขุดดินด้วยมือโดยขุดเป็นร่องรอบๆ เสาเข็มตามรูปที่ 15



รูปที่ 15 (บน) หลีกเลี่ยงการสกัดโดยการกระแทกที่หัวเสาเข็ม (ล่าง) ควรใช้สกัดด้วยมือที่ระยะ 30 ซม.สุดท้าย(after ICE/FPS,1999)

4. บทสรุป

แม้ว่าจะทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะตามแบบและรายการและได้รับการตรวจสอบจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องอย่างดีแล้วก็ตาม แต่หากเสาเข็มใส่เหล็กเสริมไว้น้อยเกินไป หรือคอนกรีตเกิดการเยิ้มหรือไม่แน่นตัวด้วยน้ำหนักตัวเอง

หรือคอนกรีตเกิดความเสียหายจากน้ำใต้ดิน ตลอกจนการดำเนินงานในขั้นตอนอื่นๆ ในภายหลังการติดตั้งเช่นการขุดดินและสกัดเสาเข็มกระทำไม่รัดกุมแล้ว ก็จะก่อให้เกิดปัญหาต่อเสาเข็มได้ ดังนั้นผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับงานขุดดินและหล่อฐานรากจึงต้องปฏิบัติงานด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจกระทบต่อความมั่นคงของเสาเข็ม การขุดดินและการสกัดหัวเสาเข็มอย่างไม่ระมัดระวังมักจะก่อให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวจากตำแหน่งเดิมแม้การเคลื่อนตัวไม่มากก็สามารถทำให้เสาเข็มร้าวได้ เนื่องจากเสาเข็มส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกออกแบบให้รับแรงด้านข้างไว้ด้วย การสำรวจสภาพชั้นดินในขั้นตอนการออกแบบควรให้ความสำคัญกับการสำรวจทางน้ำไหลหรือน้ำใต้ดินหรือชั้นดินไม่คงรูป (Collapsible Loess) ที่อาจมีอยู่ในบริเวณก่อสร้างและบริเวณใกล้เคียงไว้ด้วย หากเห็นว่าอาจก่อปัญหาขึ้นก็ควรเปลี่ยนการออกแบบเป็นเสาเข็มชนิดอื่น หรือกำหนดให้ใช้ปลอกถาวรหุ้มเสาเข็มส่วนบนไว้ในรายการก่อสร้าง การซ่อมเสาเข็มโดยวิธีเจาะคอนกรีตถึงระดับต่ำกว่ารอยร้าวแล้วอัดน้ำปูนด้วยแรงดันลงไปแทนที่รอยร้าว หรือสกัดคอนกรีตส่วนเสียหายออกและหล่อใหม่ ให้ผลเป็นที่น่าพอใจและค่าใช้จ่ายไม่สูง

เอกสารอ้างอิง

1. ประจิต จิรัปปภา กรณีศึกษาการวิบัติของเข็มฐานรากเนื่องจากการโก่งแอ่นด้านข้างของกำแพงเข็มพืดเหล็กมีค้ำยันภายในระหว่างขุดห้องใต้ดิน ประชุมใหญ่ทางวิชาการ หน้า CE –81 ถึง 94, 2538
2. Ellway. K., Practical guidance on the use of integrity tests for the quality control of cast-in-situ piles. Proceeding of the International. Conference on Foundation and Tunnels., London. Pp. 228-234, 1987
3. Fleming, W.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F.& Elson, W.K, Piling Engineer, second edition, John Willy & Sons. Inc, 1992.
4. Gasaluck, W., Luthisungnoen, P., Angsuwotai, P. Muktabhant,P. and Mobkhuntod, P. On thw Design of Foundation in Collapsible Khon Kaen Loess., Geo Eng 2000. An International Conference on Geotechnical and Geological Enineering., Melbourne, Australia, 19-24 November 2000. Pp in CD Rom.
5. Poulos, H.G, Behavior of pile groups with defective piles. Proceeding of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany. Pp. 871 – 876, 1997
6. Sliwinski, Z.J., & Fleming, W.K., The Integrity & Performance of Bored Piles. Advance in Piling and Ground Treatment for Foundation. Technical Conference Organized by ICE London. Pp.153-165,1982Thasnanipan, N., Maung, A.W., & Tanseng , P., Damages to Piles Associated with Excavation Works in Bangkok Soft Clay. Proceeding of the Sixth International conference on Problem of Pile Foundation Engineering. Russia. Pp.91-98 (Volume III), 1998
7. Thasnanipan, N., Maung, A. W., and Tanseng, P. Damages to Piles Associated with Excavation Works in Bangkok Soft Clay. Proceeding of the Sixth International Conference on Problem of Pile Foundation Engineering. Russia. Pp. 91-98 (Volume III) 1998.
8. Thasnanipan, N., Maung, A.W., Tanseng, P. and Aye, Z.Z., .Sonic Integrity Test of piles – Integrity Effected by Basement Excavation in Bangkok Subsoil. Proceeding of the Sixth International. Conference on the Application of Stress Wave Theory to piles. Quality Assurance on Land and 0ffshore Piling. Säu Paulo/Brazil/ 11-13 September 2000. Pp 163-170, 2000
9. The Institution of Civil Engineers and The Federal of Piling Specialists. (ICE/FPS), The Essential Guide to the ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls. Thomas Telford, 1999.
10. Thorburn, S., & Thorburn, J.G., Review of Problems with the Construction of Cast–In- Place Concrete Piles. Construction Industry Research and Information Association. (CIRIA Report PG 2) 1977.
11. Turner, M. J., Integrity Testing in Piling Practice. Construction Industry Research and Information Association. (CIRIA Report 144) 1997

ปัญหาในงานเสาเข็มเจาะที่เกิดจากคุณภาพคอนกรีต

PROBLEMS IN BORED PILING WORKS CAUSED BY IMPROPER CONCRETE MIXED

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1], ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล [2] และสุเมธ ประเวศวรารัตน์ [3]

[1] กรรมการผู้จัดการ, [2] กรรมการผู้จัดการทั่วไป, [3] วิศวกรโยธา

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ: การหล่อคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกเป็นการหล่อคอนกรีตใต้น้ำผ่านท่อเท (Tremie Concreting) ที่ไม่สามารถใช้เครื่องจี้ไล่ฟองอากาศในคอนกรีตออกเพื่อให้คอนกรีตอัดตัวแน่นได้ จึงต้องออกแบบและผสมคอนกรีตที่นำมาใช้ในงานเสาเข็มเจาะชนิดนี้ให้มีคุณลักษณะพิเศษหลากหลายกว่าคอนกรีตที่ใช้หล่อโครงสร้างบนดินทั่วไปมาก เพราะหากนำเอาคอนกรีตที่มีคุณภาพหรือมีคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสมกับงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกที่มีธรรมชาติและสภาวะแวดล้อมในการก่อสร้างที่แตกต่างจากงานหล่อคอนกรีตโครงสร้างประเภทอื่นๆ เป็นอันมากมาใช้แล้ว อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ทั้งในขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่หรือเมื่อแข็งตัวแล้วจนเป็นผลให้ความสมบูรณ์และความคงทนของเสาเข็มในระยะยาวลดลงได้ ดังนั้นคอนกรีตที่นำมาใช้ในงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกจึงต้องมีคุณลักษณะที่สามารถเคลื่อนไหลได้ดี, สามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง, ทนทานต่อการแยกตัวและการเยิ้ม , มีระยะเวลาการเริ่มก่อตัวนานกว่าปกติ, ทนทานต่อสภาวะผิดปกติในชั้นดิน, ทนทานต่อการน้ำใต้ดินชะล้างและข้อสุดท้ายต้องมีกำลังอัดและความแข็งแรงตามที่ออกแบบไว้

Abstract: Concreting of Cast-In- Situ Reinforce Concrete Wet Process Bored piles has to be done by tremie method, which concrete could not be compacted by vibrator. It is essential to design the better quality and characteristics mix than the concrete for other structural works in some aspects, considering the process of work. Due to the nature and environment of wet process bored piling is much differently from the normal concreting of the above ground structures. If the quality of concrete used did not meet the basic characteristics would cause some problems both during green consrete and after setting and would affecting the integrity and durability of piles. Therefore, the concrete use in bored piles works shall consist of the following characteristics:, excellent fluidity, self compaction under self weight, resistance to segregation, controlled setting, resistance to harsh environment, resistance to leaching and has an appropriate strength and stiffness.

KEYWORD: Self compaction concrete, Compaction ratio of concrete, Bleeding of concrete.

For fuether details contact *Mr.Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd., 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangkok 10510, Thailand.*

1.บทนำ

ส่วนผสมของคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์, หิน, ทราย, น้ำ, ฟองอากาศและน้ำยาผสมคอนกรีต เช่น สารพลาสติกไซเซ่อร์ (Plasticiser) เป็นต้น ผู้ออกแบบจะเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติคอนกรีตผสมเสร็จที่เหมาะสมไว้ในรายการก่อสร้างให้ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่ทำเป็นธุรกิจทั้งการขายผลิตภัณฑ์และการขายบริการ (ชัชวาลย์, 2536) ทำการผสมเสร็จมาจากโรงงานและลำเลียงใส่รถจัดส่งมายังหน่วยงานก่อสร้าง ผู้ออกแบบโดยส่วนใหญ่กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตไว้ไม่คลอบคลุมเพียงพอสำหรับงานเสาเข็มระบบเจาะเปียก ซึ่งเป็นโครงสร้างในแนวตั้งที่ใช้ดินเป็นแบบหล่อและต้องหล่อคอนกรีตระบบใต้น้ำที่เทผ่านท่อโดยที่ไม่สามารถจี้เขย่าคอนกรีตให้แน่นได้ คอนกรีตที่ผสมมาใช้จึงต้องมีคุณสมบัติดีกว่าคอนกรีตโครงสร้างบนดินทั่วไปคือต้องสามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่ต้องจี้ ในรายการก่อสร้างจึงควรกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ของคอนกรีตที่เหมาะสมกับงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกไว้ให้ชัดเจนเพราะคอนกรีตชนิดนี้จะมีราคาสูงกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป บทความนี้ได้รวบรวมปัญหาต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นจากคุณสมบัติของคอนกรีตเกิดการผันแปรเนื่องจากผสมไว้ไม่เหมาะสมไว้เป็นกรณีศึกษา

2. คุณสมบัติและลักษณะของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับงานเสาเข็มเจาะ

คอนกรีตสำหรับเสาเข็มระบบเจาะเปียกก่อสร้างในชั้นดินปกติทั่วไปนั้น Fleming and Sliwinski, [4] ได้แนะนำส่วนผสมไว้นานแล้วแต่ยังใช้ได้ดี ตามตารางที่ 1 และ Bartholomew, [3] ยังได้แนะนำให้ปรับเปลี่ยนส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูนซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกันให้เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่มีสภาวะแวดล้อมผิดปกติต่างๆกันไว้ ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อแนะนำส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเสาเข็มเจาะเปียกโดยสารละลายเบ็นโทไนท์ [4]

ค่าการยุบตัว	> 175 มิลลิเมตร
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ต่ำกว่า 0.6
ชนิดของหินผสม	ถ้าเป็นไปได้ให้ใช้หินทรงกลมจากธรรมชาติ, ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร
ชนิดของทรายผสม	ทรายธรรมชาติ (Natural and complying with zone 2 or 3 grading)
ปริมาณทราย	30 ถึง 45% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด
ปริมานปูนซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
สารผสมเพิ่ม	แนะนำให้ใส่สารผสมเพิ่มที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการลื่นไหลดีขึ้นและหน่วงเวลาการก่อตัวให้นานขึ้น

ตารางที่ 2 ข้อแนะนำใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตเสาเข็มในชั้นดินต่างๆ [3]

ชนิดเสาเข็ม	คุณสมบัติของคอนกรีต	สภาวะแวดล้อม		
		ปกติ (ก)	ความผิดปกติในชั้นดินระดับปานกลาง (ข)	ความผิดปกติในชั้นดินมีระดับสูงมาก (ค)
เสาเข็มเจาะแห้ง	ปริมาณซีเมนต์(กก.ต่อลูกบาศก์เมตร)	300 –450	350 – 450	380 –500
	อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	0.5 –0.55	0.475 –0.5	0.45- 0.5
เสาเข็มเจาะเปียก	ปริมาณซีเมนต์(กก.ต่อลูกบาศก์เมตร)	350-450	350 –450	400 – 500
	อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	0.5 – 0.6	0.475 – 0.5	0.43 – 0.45

นอกจากนั้นแล้ว Reese and O'Neill, [7] ยังได้กล่าวไว้ว่าคอนกรีตที่เหมาะกับงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกนั้น ต้องผสมให้คุณสมบัติดีกว่าคอนกรีตโครงสร้างปกติบนดินหลายประการคือ ต้องมีความสามารถลื่นไหลได้ดี (Excellent Fluidity), ต้องสามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง (Self compaction under self-weight), ต้องทนทานต่อการแยกตัวและการเยิ้ม (Resistance to Segregation and Bleeding), ต้องสามารถหน่วงเวลาการก่อตัวได้ (Controlled setting), ต้องสามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่ปกติ (Resistance to harsh environment), ทนทานต่อการไหลชะทำลายโดยน้ำใต้ดิน (Resistance to leaching) และต้องมีกำลังอัดที่ต้องการ (Appropriate Strength and Stiffness)

3. สาเหตุที่คุณสมบัติของคอนกรีตเกิดความผันแปร และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็ม

คอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกที่ถือว่ามีคุณภาพดีนั้นต้องมีคุณสมบัติครบถ้วนทั้งขณะที่ยังเหลวอยู่ และเมื่อแข็งตัวแล้วด้วย กล่าวคือขณะยังเหลวจะต้องมีความเหลวเพียงพอต่อการเทผ่านท่อ Tremie Pipe และสามารถลื่นไหลเข้าไปเต็มทุกส่วนของรูเจาะได้, มีการยึดเกาะตัวกันดีทั้งในขณะขนส่งและขณะทำการเทผ่านท่อ, สามารถอัดตัวแน่นได้เองด้วยน้ำหนักตัว, เนื้อคอนกรีตต้องมีความสม่ำเสมอไม่เกิดสภาวะการแยกตัวและเกิดการเยิ้มของน้ำในเนื้อคอนกรีตทั้งในขณะและหลังการเท, เมื่อแข็งตัวแล้วต้องมีกำลังอัดตามต้องการ, ต้องมีความคงทนทั้งในระยะสั้นและยาวและคอนกรีตต้องต้านทานการซึมของน้ำได้ดี ส่วนผสมคอนกรีตแม้จะถูกออกแบบและกำหนดไว้อย่างดีแล้ว แต่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเสร็จออกมาแล้วก็ยังอาจเกิดความผันแปรจนก่อปัญหาต่อความสมบูรณ์ของเสาเข็มได้จากสาเหตุหลายประการ คือ

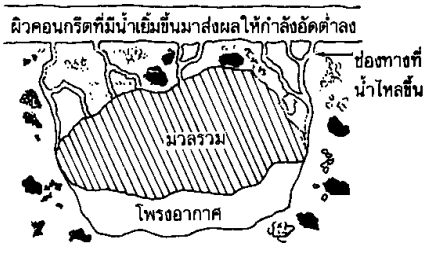
3.1 สาเหตุจากผู้ผลิตคอนกรีต: เนื่องจากวัสดุส่วนผสมส่วนใหญ่นำมาจากธรรมชาติ คุณสมบัติจึงไม่ค่อยแน่นอน เช่นความละเอียดของทรายซึ่งจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา, กรรมวิธีและช่วงเวลาที่นำขึ้นมาใช้เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังอาจมีความไม่แน่นอนเนื่องจากการชั่งตวงส่วนผสม ซึ่งความผิดพลาดในการชั่งตวงอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการควบคุมการผลิต, เทคนิคการขนส่ง ความผันแปรเช่นนี้หากเกิดขึ้นกับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปจะเกิดปัญหาไม่มากนักเนื่องจากจะกระจายทั่วไปในแนวราบ แต่ในงานเสาเข็มเจาะเป็นโครงสร้างหน้าตัดแคบๆ ที่ก่อสร้างในแนวดิ่ง ความผันแปรหากเกิดขึ้นจะเป็นชั้นๆ จนก่อปัญหาขึ้นมากกว่างานหล่อโครงสร้างทั่วไปในแนวราบ

3.2 สาเหตุจากเนื้อคอนกรีตเอง: คอนกรีตเป็นวัสดุเนื้อผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์, หิน, ทราย, น้ำ, และน้ำยาผสมคอนกรีตนำมาผสม รวมกันเป็นคอนกรีตสด หินที่อยู่ในส่วนผสมจะถูกพยุงไม่ให้เกิดการแยกตัวด้วยมอร์ต้า แต่แรงดึงดูดของโลกไม่เพียงแต่ทำให้หินทรายจมตัวลงแต่รวมถึงเม็ดปูนซีเมนต์ด้วย ดังนั้นหากส่วนผสมของคอนกรีตผสมออกมาแล้วเกิดการยึดเกาะกันไม่ดีพอ หิน, ทรายและปูนซีเมนต์จะจมตัวลงในเนื้อคอนกรีตสด จนเมื่อแรงต้านการจมตัวมากกว่าน้ำหนักของหินทรายหรือเม็ดปูนหรือจนเมื่ออนุภาคของหินทรายสัมผัสกันจนเป็นโครงข่าย ผลก็คือน้ำที่เบาที่สุดจะถูกดันขึ้นสู่ด้านบนจนเกิดการเยิ้ม (Bleeding) ขึ้น ตามรูปที่ 1 ซึ่งการเยิ้มนี้ก็คือการแยกตัวชนิดหนึ่งนั่นเอง และน้ำบางส่วนที่เยิ้มจะถูกกักไว้ใต้มวลรวม ตามรูปที่ 2 เมื่อคอนกรีตแข็งตัวบริเวณที่น้ำถูกกักไว้นี้จะเป็นโพรงอากาศ (Air Pocket) ซึ่งถ้าคอนกรีตเกิดการแยกตัว (Segregation) ด้วยก็ยิ่งทำให้ความพรุนมีมากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้น้ำซึมผ่านเข้าในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น (High Permeability Concrete) เกี่ยวกับการเยิ้มของน้ำนี้ Fleming et al, [5] ได้

สำรวจและกล่าวว่าอาจจะพบเห็นการเยิ้มนี้ในคอนกรีตเสาเข็มเจาะ โดยน้ำอาจจะใช้ช่องทางซึมขึ้นมาตามแนวเหล็กเสริมยืนหรือตรงตำแหน่งเดิมของท่อเทคอนกรีต (Tremie Pipe) สู่ด้านบนได้ ซึ่งความผันแปรของคุณสมบัติคอนกรีตจากการเยิ้มนี้เคยพบเห็นว่าเกิดขึ้นกับงานเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ ตามรูปที่ 3 และเคยสำรวจพบว่าหัวเสาเข็มระบบเจาะเปียกในกรุงเทพฯ ที่เทคอนกรีตซึ่งมีค่ายุบตัวประมาณ 20 ซม.ไว้สูงจนถึงระดับพื้นดิน เมื่อเวลาผ่านไปประมาณครึ่งชั่วโมงเกิดมีน้ำปุดขึ้นมาให้เห็น (ตามรูปที่ 1) และเมื่อเวลาผ่านไปสองชั่วโมงพบว่าระดับคอนกรีตหัวเสาเข็มที่เทไว้สูงวัดได้ว่าเกิดทรุดตัวต่ำลงไปถึง 80 ซม โดยจะมีน้ำเยิ้มขึ้นมาแทนที่ตลอดเวลา (เป็นการแสดงว่าการเยิ้มของน้ำในคอนกรีตจะทำให้ระดับคอนกรีตหัวเสาเข็มที่แข็งตัวแล้วมีระดับต่ำกว่าระดับคอนกรีตที่วัดไว้ขณะที่ยังเหลวอยู่ได้) ต่อมาได้ทำการเจาะเอาแก่นคอนกรีตหัวเสาเข็มที่แข็งตัวแล้วถึงความลึกประมาณ 5 เมตรขึ้นมาพบว่าคอนกรีตมีสภาพพรุนและกำลังต่ำ ตามรูปที่ 4 สาเหตุของปัญหาเกิดจากการเยิ้มทำให้มวลหยาบจมตัวลงเบื้องล่างดันน้ำในเนื้อคอนกรีตขึ้นสู่ด้านบน การซ่อมแซมหัวเสาเข็มนี้ผู้รับเหมาหลักที่ซื้อคอนกรีตมาใช้ได้ทำการสกัดคอนกรีตหัวเสาเข็มส่วนที่คุณสมบัติเกิดการผันแปรจนถึงระดับคอนกรีตที่แน่นตัว (Dense) ดีแล้วจึงหล่อคอนกรีตขึ้นมาใหม่โดยผู้ขายคอนกรีตรับค่าใช้จ่าย การเยิ้มของน้ำในคอนกรีตเป็นปัญหาหลักของข้อบกพร่องของคอนกรีตในงานเสาเข็มระบบเจาะเปียก เนื่องจากไม่สามารถตรวจพบการเยิ้มล่วงหน้าก่อนและภายหลังการเทในสนามได้ เพราะหัวเสาเข็มส่วนใหญ่อยู่ต่ำกว่าระดับผิวดินมาก และการเยิ้มจะเกิดขึ้นในขั้นตอนที่เทคอนกรีตเสร็จแล้วและคอนกรีตกำลังอยู่ในสภาวะนิ่งก่อนการก่อตัว (Bleeding occurs during the dormant period before the initial setting of the concrete: Sliwinski and Fleming,[7]) แต่จะทราบว่าเกิดการเยิ้มขึ้นหลังจากการขุดเพื่อก่อสร้างฐานรากแล้ว ความผันแปรของคอนกรีตจากการเยิ้มอาจเกิดขึ้นในขณะกำลังเทคอนกรีตผ่านท่อเทใต้น้ำได้เช่นกัน หากเกิดการเทคอนกรีตอย่างไม่ต่อเนื่องเช่นรอรถคอนกรีตแต่ละคันนานเกินไป แล้วคอนกรีตที่อยู่ภายในท่อเทที่ระดับล่างๆจะถูกอัดแน่นด้วยน้ำหนักของคอนกรีตส่วนบนและน้ำจะถูกผลักขึ้นไปด้านบนภายในท่อเทจนทำ ให้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ของคอนกรีตที่ระดับล่างของท่อมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถไหลได้โดยแรงโน้มถ่วง (Gravity) ทำให้เกิดการติดขัด (Blockage)ในท่อได้เช่นกัน ตามรูปที่ 5 ปัญหาการเยิ้มอาจลดลงได้โดยการใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดการเยิ้ม (Anti-Bleed Admixture) เข้าช่วย หรือใช้มวลผสมหยาบตามธรรมชาติรูปทรงกลมเช่นกรวด (แต่หายาก) และผสมปริมาณทรายที่ไม่มากเกินไป เพราะปริมาณมากจะทำให้การเยิ้มเกิดขึ้นได้มาก



รูปที่ 1 ลักษณะการเยิ้มที่เกิดขึ้นในคอนกรีต



รูปที่ 2 น้ำที่เยิ้มบางส่วนถูกกักไว้ใต้มวลรวม(ชัชวาลย์ ,2536)



รูปที่ 3 น้ำซึมขึ้นตามแนวเหล็กเสริมยืนและตามแนวเก่าของท่อ Tremie



รูปที่ 4 สภาพคอนกรีตที่เจาะขึ้นมาจากหัวเสาเข็มเจาะที่คอนกรีตเกิดมีการเยิ้ม (after Thasnanipan et al, 2000)



รูปที่ 5 คอนกรีตอัดแน่นในท่อ Ttemie เนื่องจากความผันแปรของคอนกรีต (ณรงค์, 2543)

3.3 จากการอัดตัวแน่นที่ไม่สมบูรณ์: คอนกรีตงานโครงสร้างบนดินโดยทั่วไปจะถูกทำให้อัดตัวแน่นโดยการจี้ไล่ฟองอากาศออก แต่ธรรมชาติของงานเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะไม่สามารถไล่ฟองอากาศออกเพื่อให้คอนกรีตแน่นตัวโดยการจี้ได้ ดังนั้นถ้าคอนกรีตที่ผสมมาไม่สามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเองแล้วคอนกรีตจะเกิดการพรุน ทำให้กำลังอัด, ความสมบูรณ์และความทนทานของคอนกรีตลดน้อยลงไป Xanthakos, [11] ได้แนะนำว่า คอนกรีตที่เทใต้น้ำผ่านท่อเทที่จะสามารถอัดแน่นโดยน้ำหนักตัวเองได้ดี ควรมีค่า Compaction Ratio ของคอนกรีตประมาณ 0.95 –0.96

4. ปัญหาจากสภาพแวดล้อมในชั้นดินที่ผิดไปจากปกติ (Aggressive Subsurface Conditions)

เสาเข็มเป็นโครงสร้างใต้ดินจึงต้องออกแบบให้คอนกรีตเสาเข็มทนต่อสภาพแวดล้อมในชั้นดิน และต่อการถูกทำลายจากสภาพแวดล้อมที่ผิดไปจากปกติเช่น จากสารเคมีหรือจากสิ่งอื่นๆ ทั้งขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่และเมื่อแข็งตัวแล้วตลอดอายุใช้งาน ผู้ออกแบบส่วนใหญ่มักจะมองข้ามปัญหาที่อาจกระทบกับคอนกรีตจากปัจจัยต่อไปนี้

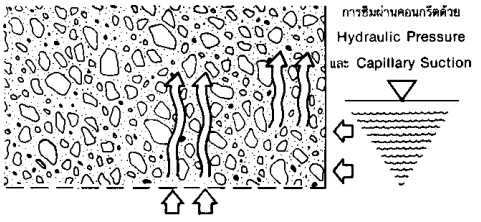
4.1 การซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability): การซึมของน้ำเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้มากหรือน้อยจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความคงทน การซึมของน้ำจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ (k) มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที การซึมของน้ำขึ้นอยู่กับความพรุนของซีเมนต์เพสต์ โดยความพรุนจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ถ้าไฮเดรชั่นเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ค่า k จะสูงและการซึมของน้ำก็จะมีมากขึ้นและความคงทนของเสาเข็มระยะยาวลดลง, ค่า k จะมีค่าต่ำหากค่า W/C มีค่าน้อยกว่า 0.6 อย่างไรก็ตามการซึมผ่านได้ของน้ำไม่ใช่สัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความพรุนแต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของความพรุน (Capillary Pore) ด้วย หากความพรุนที่เกิดจากการเยิ้ม (Bleeding) เกิดในลักษณะแบบเชื่อมต่อกัน (Inter-Connection Void) การซึมผ่านของน้ำก็จะสูงกว่าความพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน

4.2 ขบวนการซึมผ่านของน้ำในเนื้อคอนกรีต: การซึมผ่านของน้ำเข้าสู่คอนกรีตมีอยู่สองขบวนการ คือ

4.2.1 แบบ Hydraulic Permeability เกิดจากเมื่อมีแรงดันของน้ำในด้านหนึ่งของโครงสร้างผนังคอนกรีตสูงกว่า และซึมผ่านความพรุนคอนกรีตชนิดที่ต่อเนื่องกันมายังอีกด้านหนึ่งที่ต่ำกว่าเช่นถังเก็บน้ำ, ห้องใต้ดินและสระว่ายเป็นต้น การรั่วซึมบางชนิดในงานผนัง Diaphragm walls ก็เกิดขึ้นจากขบวนการนี้

4.2.2 แบบ Water Absorbed by Capillary Suction: เกิดจากน้ำจะค่อยๆ ซึมผ่านความพรุนชนิดต่อเนื่องกันที่ผิวคอนกรีตเข้าสู่ภายใน และซึมต่อขึ้นสู่ด้านบนโดย Capillary Action ซึ่งจะเกิดขึ้นในงานเสาเข็มเจาะ

ปรากฏการตามข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 แสดงไว้ใน รูปที่ 6 ซึ่ง Reese and O'Neill, [7] ได้ศึกษาไว้ว่าการซึมของน้ำตามลักษณะข้อ 4.2.2 จะพบในงานเสาเข็มบริเวณที่มีน้ำใต้ดินไหลผ่านหรือขึ้นลงได้ด้วย Capillary Action และ Valenta, [10] ได้ทำการทดลองเจาะแก่นคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ใช้มวลหยาบขนาด 20 มม., มีค่า W/C ที่ 0.6 และคอนกรีตมีการอัดตัวแน่นที่สมบูรณ์ (Dense) พบว่าคอนกรีตที่เจาะขึ้นมามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 10^{-10} m/sec ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่ดีในห้องทดลอง

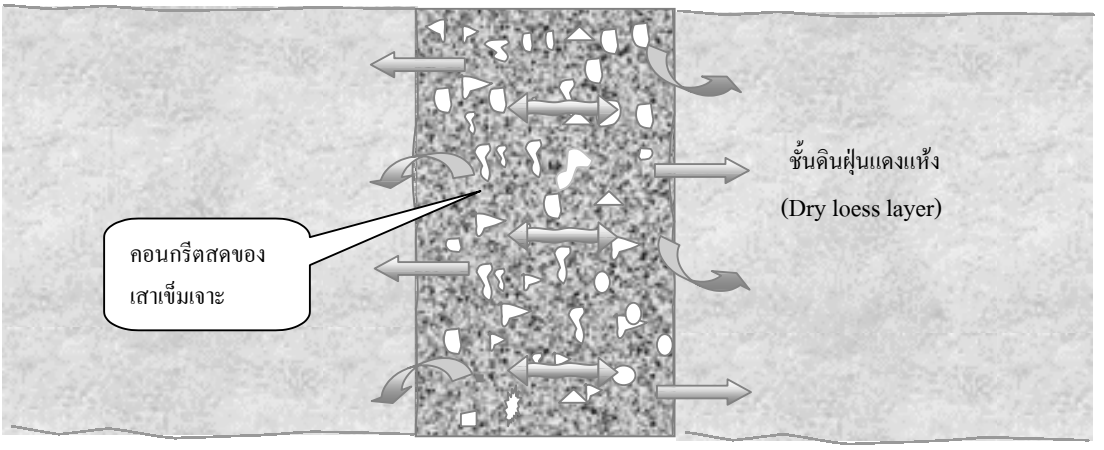


รูปที่ 6 การซึมของน้ำสู่คอนกรีตแบบ Hydraulic pressure และแบบ Capillary suction (ชัชวาลย์, 2536)

4.3น้ำในคอนกรีตถูกดูดซึมซับโดยชั้นดินฝุ่นไม่คงรูป (Collapsible Loess): โดยทั่วไปแล้วชั้นดินที่เกิดขึ้นจากดินตะกอนที่ถูกน้ำพัดพามาทับถมเป็นชั้นๆ (Alluvial Deposit) เช่นชั้นดินกรุงเทพฯนั้น มวลของชั้นดินจะมีปริมาณน้ำ (Water Content) ผสมอยู่โดยถาวรด้วย ทำให้น้ำในคอนกรีตเสาเข็มเจาะที่เทลงไปแต่ยังไม่แข็งตัวจะไม่ถูกดูดซึมซับเสียหายโดยชั้นดิน แต่ในชั้นดินตะกอนที่เกิดขึ้นจากลมพัดพาฝุ่นมาทับถมเป็นชั้นสีแดงซึ่งทางธรณีวิทยาจะเรียกดินฝุ่นแดงชนิดนี้ว่า Loess Deposits ดินฝุ่นแดงนี้จะมีลักษณะแห้งและรับแรงแบกทานได้ดี ที่ไม่คงรูป ไม่ยึดเกาะตัวกัน (None-Plastic) เป็น Sandy Silt หรือ Silty Sand (ML or SM) อนุภาคของเม็ดฝุ่นส่วนใหญ่มีขนาด 0.005 ถึง 0.042 มิลลิเมตร ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีขนาดตั้งแต่ 200-500 μm และบางส่วนอาจใหญ่ถึง 1 มิลลิเมตรได้ (Gasaluck et al, 2000) แต่เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วดินฝุ่นแดงชนิดนี้จะดูดซึมซับน้ำไว้จนความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจนอิ่มตัวและไม่คงรูปไม่สามารถรับน้ำหนักจากภายนอกหรือจากน้ำหนักตัวเอง ซึ่งจะใช้เวลาเพียงประมาณ 2 ชั่วโมง ดินฝุ่นแดงนี้จึงเป็นชั้นดินฝุ่นที่ไม่คงรูป (Collapsible Loess)

จากพฤติกรรมของดินฝุ่นแดงที่กล่าวข้างต้นนั้น หากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยไม่ทราบว่ามีชั้นดินฝุ่นแดงแห้งแทรกอยู่ด้วยและใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ตามปกติ เมื่อถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออกตามขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแล้วคอนกรีตเสาเข็มเจาะที่ยังเหลวอยู่จะสัมผัสกับผิวดินฝุ่นแดงนี้โดยตรง และจะถูกชั้นดินฝุ่นแดงนี้ดูดซึมซับน้ำออกไปจนคอนกรีตอาจเสียหายได้ (รูปที่ 7) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากคอนกรีตเกิดการเยิ้มขึ้นด้วย

แล้วการดูดซึมซับน้ำก็จะเกิดมากขึ้นด้วยจนคอนกรีตมีสภาพพรุนหรือทรุดตัวต่ำลงจากระดับที่เทไว้เดิม การป้องกันต้องออกแบบและกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ให้มากและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำตามที่ Bartholomew [3] แนะนำไว้ดังแสดงในตารางที่ 2 ช่อง (ค)



รูปที่ 7 น้ำในคอนกรีตสดถูกดูดซึมซับโดยชั้นดินฝุ่นแดงที่แห้ง (Dry Loess)

4.4 จากสารเคมีในชั้นดิน: ในชั้นดินอาจมีสารเคมีเจือปนหรือปนเปื้อนอยู่ด้วยและอาจซึมผ่านเข้ามากัดกร่อนคอนกรีตและเหล็กเสริมเสียหายได้ ความเสียหายต่อคอนกรีตเสาเข็มเจาะอันเกิดจากด้านเคมีมีหลายประการและความรุนแรงของแต่ละกรณีจะแตกต่างกันเช่นความเสียหายจากแคลเซี่ยมซัลเฟต, จากโซเดียมซัลเฟต, จากแมกนีเซี่ยมซัลเฟต, จากปฏิกิริยาระหว่างด่างกับหินและความเสียหายจากน้ำทะเล ดังนั้นจึงต้องหาทางป้องกันความเสียหายจากสารเคมีโดยการออกแบบและการให้รายละเอียดที่ชัดเจน, กำหนดส่วนผสมที่เหมาะสม, เลือกใช้ชนิดของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม, กำหนดระยะหุ้มให้พอเพียงและต้องอัดตัวแน่นโดยน้ำหนักตัวเองอย่างสมบูรณ์

5. บทสรุป

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก นอกจากการควบคุมการก่อสร้างตามขั้นตอนที่ถูกต้องแล้ว ส่วนผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้หล่อเสาเข็มยังเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อความสมบูรณ์ของตัวเสาเข็ม ในแบบรายการจึงต้องกำหนดให้คอนกรีตงานเสาเข็มเจาะมีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปอีกคือ

1. คอนกรีตต้องมีคุณสมบัติยึดเกาะตัวกันดี (Cohesive Mixed) ที่สามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง
2. คอนกรีตเสาเข็มเจาะชนิดเทใต้น้ำควรมีค่า Compaction Ratio ประมาณ 0.95 ถึง 0.96
3. คอนกรีตเสาเข็มเจาะควรมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) ไม่เกิน 10^{-10} เมตรต่อวินาที
4. คอนกรีตต้องมีความต้านทานต่อการแยกตัว(Segregation) และการเยิ้ม (Bleeding) ทั้งในขณะเทและภายหลังการเท

5. คอนกรีตเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างในชั้นดินที่มีน้ำขังหรือมีการเคลื่อนไหลขึ้นลงของน้ำได้หรือมีสารเคมีปนเปื้อน ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบและผู้ผลิตต้องผสมให้คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่าปกติ
6. การออกแบบใช้เสาเข็มเจาะในพื้นที่ที่มีชั้นดินฝุ่นแดงชนิดไม่คงรูป (Collapsible Loess) อยู่ด้วยคอนกรีตที่ใช้ควรมีปริมาณซีเมนต์ที่สูงกว่า 400-500 กก/ม^3 และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ไม่เกิน 0.45
7. ผู้ผลิตคอนกรีตต้องควบคุมการผลิตไม่ให้คุณสมบัติคอนกรีตเกิดมีการผันแปรในทุกขั้นตอนของการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องควบคุมส่วนผสมไม่ให้เกิดการเยิ้มของน้ำเกิดขึ้น เพราะการเยิ้มของน้ำในคอนกรีตเป็นปัญหาหลักที่ทำให้คอนกรีตหัวเสาเข็มเจาะเกิดความเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

1. ชัชวาลย์ เศรษบุตร, Concrete Technology , CPAC., 2536
2. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพฯ,เอกสารการสัมมนาเรื่องฐานราก 2000 จัดโดยอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา วสท. หน้า P ถึง 38, 2543
3. Bartholomew, R.F., The Protection of Concrete Pile in Aggressive Ground Conditions: An International Appreciation in Proceeding. Conference on. Recent Piling Developments in the Design and Construction of Piles. Organized by Institution of Civil Engineers, London, pp 131 –141.,1979
4. Fleming, W.K and Sliwinski, Z. J.,The Use and Influent of Bentonite in Bored Piles Construction. Construction Industry Research and Information Association. (CIRIA Report PG 3)., 1977
5. Fleming,W.K., Weltman,A.J., Randolph,M.F., and Elson,W.K.,. Piling Engineer 2nd Edition John Willy & Sons Inc ,1992
6. Gasaluck, W., Luthisungnoen, P., Angsuwotai, P., Muktabhant, C. and Mobkhuntod, P. On the Design of Foundation in Collapsible Khon Kaen Loess. Geo Eng 2000., An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne, Australia., 19-24 November 2000., Pp. Jn CD Rom
7. Reese, L.C, O'Neill, M. W., Drill Shafts:Construction Procedures and Design Method. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Virginia. Incorperation with ADSC, Dallas. Texas. USA.,1988
8. Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. The Integrity and Performance of Bored Piles. Advances in Piling and Ground Treatment for Foundation., Organized by the Engineering of Civil Engineers,London. 1983
9. .Thasnanipan, N., Win, M. A.,Tanseng, P. and Thiruchelvam, N. Concrete for Wet Bored Piles. Proc. of the Geotech - Year 2000., Developments in Geotechnical Engineering. Organized by Asian Institute of Technology., Bangkok. Pp 347-354. November 2000.
10. Valenta, O., (1968). Durability of Concrete. Proc. 5th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, Tokyo, Part III, 193., 1968
11. .Xanthakos, P. P., Slurry Walls as Structural Systems . McGraw – Hill Inc., 1994

น้ำหนักบรรทุกสูงที่สุดเท่าที่เคยทดสอบกับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

THE HIGHEST STATIC LOAD WHICH EVER BEEN TESTED ON PILES IN BANGKOK SUBSOILS

กมล สิงห์โตแก้ว[1], ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์[2] และพรพจน์ ตันเส็ง [3]

[1]ผู้อำนวยการโครงการ, [2] วิศวกรปฐพี

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

[3] อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

บทคัดย่อ: ปัจจุบันได้มีการนำเอาเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยมหรือที่เรียกกันว่าแบร์เร็ตต์ (Barrette) ซึ่งมีขนาดใหญ่ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อต้นกว่า 2,000 ตัน ซึ่งสูงกว่าเสาเข็มเจาะกลมมาใช้ในกรุงเทพฯ แล้ว โดยมีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของแบร์เร็ตต์ที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (VWSG) ในตัวเสาเข็มเพื่อวัดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบจนถึงน้ำหนักสูงสุด 5,290 ตัน และชุดคานเหล็กปฏิกิริยาสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้สูงถึง 6,000 ตัน จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มเจาะกลมที่ก่อสร้างในบริเวณใกล้กับแบร์เร็ตต์ พบว่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะกลมและแบร์เร็ตต์รูปเหลี่ยมไม่มีความแตกต่างกันชัดเจน การที่แบร์เร็ตต์รับน้ำหนักได้สูงกว่าเสากลมเนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่จะรับแรงเสียดทานมากกว่า ส่วนน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงสู่ปลายเข็มของแบร์เร็ตต์ที่มีค่าประมาณ 8% ของน้ำหนักบรรทุกรวมซึ่งน้อยกว่าของเสาเข็มเจาะกลมที่มีค่าประมาณ 17%ของน้ำหนักบรรทุกรวมนั้นเชื่อว่าเกิดจากเครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในการขุดเจาะที่ต่างกัน

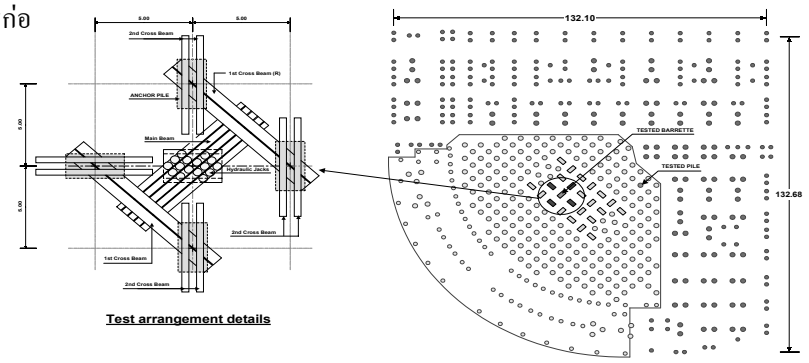
ABSTRACT: Recently, the largest barrettes, which can carry the safe load more than 2,000 tons, have been constructed in Bangkok and one barrette was tested with full instrumentation up to 5,290 tons. A gigantic test frame having maximum capacity of 6,000 tons was constructed from the available test frames. The instrumented load test results of circular shape bored pile and barrette constructed in the same project area show that unit skin friction of bored pile and barrette are in a similar range. However, barrettes have more surface area than circular bored piles thus they can be designed to have more friction shaft area to carry larger load. Difference of load transferred to the toe of the test barrette and pile are about 8% and 17% of the total applied load respectively, it is believed that this caused from using different type of tools and method of excavations.

KEYWORDS: Instrumented pile load test, Base grouting bored pile, Barrette.

For Further Details, Contact *Mr. Kamol Singtokaew, Seafco Co., Ltd, 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangk0k 10510*

1.บทนำ

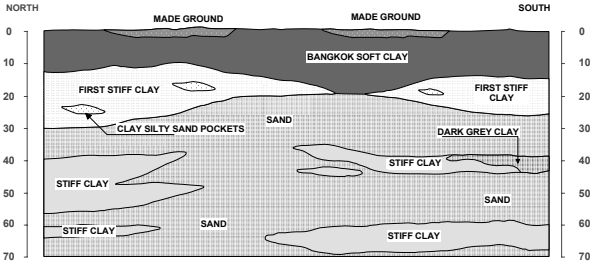
เสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยมได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับเสาเข็มเจาะกลม และกำแพงกันดิน Diaphragm Wall อย่างกว้างขวางเนื่องจากในปัจจุบันอาคารที่ก่อสร้างมีพื้นที่ก่อสร้างฐานรากจำกัดและมีน้ำหนักมากขึ้น ในโครงการหนึ่งบนถนพระราม 9 มีการใช้เสาเข็มเจาะกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 เมตร และ 1.50 เมตร จำนวน 560 ต้น และเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม (Barrette) ขนาด 1.50x3.00 เมตรจำนวน 24 ต้น (รูปที่ 1) โครงสร้างส่วนที่เป็นทาวเวอร์มีน้ำหนักสูงมากจนทำให้ไม่สามารถจัดเรียงเสาเข็มเจาะที่มีหน้าตัดกลมให้ลงตัวได้จึงได้มีการนำ Barrettes มาใช้แทนเสาเข็มแบบกลมในบริเวณแกนอาคาร (Building Core) ปลายเสาเข็มทั้งหมดวางอยู่ที่ระดับ 57.00 เมตร จากพื้นดินโดยปลายเสาเข็มฝังอยู่ในทรายชั้นที่สอง และเนื่องจากความต้องการให้เสาเข็มบางต้นมีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้นอีก จึงกำหนดให้ทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grout) ในเสาเข็มบางต้นที่กำหนดไว้ โครงการนี้ได้มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มใช้งาน (Working Piles) ของทั้งเสาเข็มกลมและเหลี่ยม โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์ Vibrating Wire Strain Gauges เพื่อวัดความเครียดในเสาเข็มและนำมาใช้คำนวณหาหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวและหน่วยแรงต้านที่ปลายของเสาเข็มทั้งสองรูปทรง เนื่องจากเสาเข็มเจาะกลมและ Barrette มีความแตกต่างกันอย่างมากในการก่อสร้าง เช่น ลักษณะเครื่องมือที่ขุดเจาะ, รูปทรง, เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างและคุณสมบัติของเบนโทไนท์ที่ใช้ฯลฯจึงสามารถนำผลการทดสอบนี้มาใช้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะและ Barrette ในเชิงเปรียบเทียบได้



รูปที่ 1 แผนผังแสดงตำแหน่งเสาเข็มและตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

2.ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

ในรูปที่ 2 เป็นชั้นดินโดยทั่วไปของกรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินต่าง ๆ กันคือชั้นดินบนสุดจะเป็นชั้นดินเปลือก (Weathered Crust) หนาประมาณ 2-3 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12 เมตร และค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) ถึงระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินแข็งจนถึงระดับชั้นทรายชั้นแรกที่ระดับความลึกประมาณ 25-30 เมตร ถัดจากชั้นทรายชั้นแรกจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทรายจนถึงระดับชั้นทรายชั้นที่ 2 ที่ระดับความลึกประมาณ 45-60 เมตร ซึ่งฐานรากส่วนใหญ่ของอาคารที่มีน้ำหนักสูงมากมักจะกำหนดให้ปลายเสาเข็มฝังอยู่ในทรายชั้นนี้



รูปที่ 2 ลักษณะชั้นดินทั่วไปของกรุงเทพมหานคร

3. ขั้นตอนการก่อสร้าง

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบกลม และ Barrette จะมีหลักการคล้ายคลึงกันแต่จะแตกต่างกันบ้างในรายละเอียด กล่าวคือเสาเข็มเจาะกลมจะใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวเพื่อป้องกันชั้นดินอ่อนพังทลาย และใช้เป็นตัวบังคับตำแหน่งเข็มด้วย และจะทำการเจาะด้วยสว่าน (Auger) ในชั้นดินเหนียวอ่อน ส่วนที่ลึกลงไปกว่านั้นจะใช้ถังขุดเจาะ (Bucket) ส่วนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม (Barrette) จะทำการก่อสร้างโดยใช้คานบังคับแนว (Guide Wall) เพื่อบังคับตำแหน่งของเครื่องเจาะให้ลงในตำแหน่งที่ต้องการ การเจาะจะใช้เครื่องมือตักดินเรียกว่า Clamp Shell หรือ Grab ตามเอกสารอ้างอิง Thasnanipan et al, [5] และณรงค์ กับคณะ, [7]

การก่อสร้างเสาเข็มทั้งสองชนิดใช้สารละลายเบนโทไนท์ช่วยในการขุดเจาะ ข้อแตกต่างระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มเจาะกลมและ Barrette ก็คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการขุดซึ่งจะมีผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างอย่างมาก ในกรณีที่เสาเข็มทั้งสองชนิดมีความยาวของปลายเข็มเท่ากัน Barrette จะใช้เวลาในการก่อสร้างนานกว่าเสาเข็มเจาะแบบกลมค่อนข้างมาก ซึ่งถ้าหลุมเจาะถูกทิ้งไว้นานเกินไปจะต้องทำการขูด Filter Cake ที่เกาะอยู่ที่ผิวของหลุมเจาะออกก่อนทำการลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีต และต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ที่เก็บจากก้นหลุมเจาะให้เป็นไปตามข้อกำหนดก่อนทำการเทคอนกรีต คุณสมบัติของเบนโทไนท์ที่ถูกบันทึกไว้ขณะทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะกลม และ Barrette ของโครงการนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 เวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้ประมาณ 28 ชั่วโมง ส่วน Barrette ใช้เวลาประมาณ 75 ชั่วโมง (เวลาดังกล่าวรวมเวลาที่ใช้ในการติดตั้ง Instrument ไว้ด้วยแล้ว) หลังการเจาะเสร็จ มีการตรวจสอบสภาพและความเอียงของรูเจาะ ด้วยอุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่า Drilling Monitoring ซึ่งบางครั้งจะเรียกกันติดปากว่า Koden Test โดยจำกัดความเอียงไม่เกิน 1:100

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ที่บันทึกไว้ขณะก่อสร้าง

คุณสมบัติ	Bored Pile		Barrette	
	Before feeding to the borehole	Before concreting (near borehole base)	Before feeding to the trench	Before concreting (near trench base)
Viscosity (sec)	33	36	36	49
Density (g/cc)	1.08	1.10	1.10	1.17
pH value	8	8	8	9
Sand content (%)	0.1	0.8	1.0	1.1

4. การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดแรงเสียดทานผิวและ การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

เสาเข็มเจาะกลม และ Barrette ที่จะใช้ทดสอบได้มีการติดตั้ง Vibrating Wire Strain Gauges (VWSGs) ในขณะทำการก่อสร้างเสาเข็มจำนวน 5 ระดับความลึก เพื่อวัดแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบโดยตำแหน่งที่ติดตั้งจะติดไว้ทุกจุดที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลง การทดสอบได้ใช้เสาเข็มที่ใช้งาน (Working Pile) เป็นเสาเข็มทดสอบและเสาเข็มสมอ ชุดคานเหล็กปฏิกิริยา (Reaction Frame) ที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นชุดคานที่ใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยมีการทดสอบโดยวิธี Static Load Test ในประเทศไทยมาก่อน (ซึ่งอาจจะเป็นการทดสอบที่มีน้ำหนักสูงที่สุดในโลกโครงการหนึ่งก็เป็นได้)



รูปที่ 3 ชุดคานทดสอบขนาด 6,000 ตัน (after Thasnanipan et al, 1999)

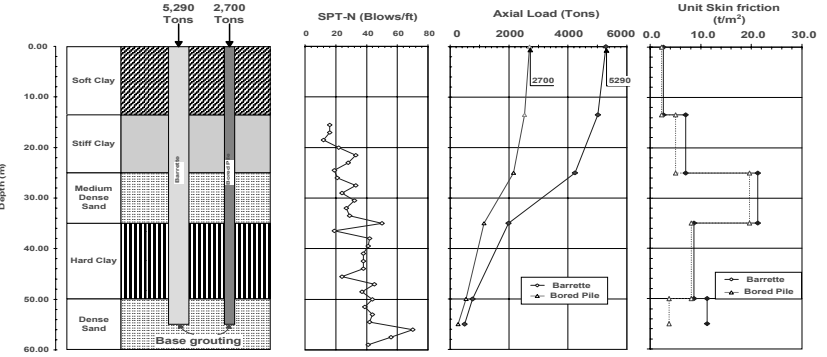
ชุดทดสอบนี้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้สูงถึง 6,000 ตัน ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 การทดสอบได้ใช้แม่แรงขนาด 500 ตันจำนวนทั้งหมด 16 ตัว (8,000 ตัน)

5. กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกับรูปทรงที่ต่างกัน

Hosoi et al [1] ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับแรงเสียดทานที่ผิวของ Barrette กับเสาเข็มเจาะกลม โดยทำการวิเคราะห์แรงดันดินที่ผิวของหลุมเจาะด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) และได้สรุปไว้ว่าแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อผิวแบนของ Barrette ในกรณีที่เป็นสภาวะ Plane Strain จะมากกว่าแรงดันดินที่กระทำต่อผิวโค้งของเสาเข็มเจาะแบบกลม ซึ่งจะทำให้หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเหลี่ยม (Barrette) มากกว่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มกลม แต่สำหรับ Barrette โครงการนี้ มีสัดส่วนด้านยาวต่อด้านแคบไม่แตกต่างกันมากหน่วยแรงเสียดทานจึงมีค่าใกล้เคียงกันมาก Thasnanipan et al, [6] ได้ทำการศึกษาการทดสอบนี้และพบว่าแรงดันดินด้านข้างยังคงเหมือนกับแรงดันดินด้านข้างของเสาเข็มเจาะรูปกลมเนื่องจากผลของปลายด้านแคบหลุมเจาะ (End Effect) และหน่วยแรงในมวลดินจะจัดเรียงตัวเป็น Hoop Action คล้ายกับหน่วยแรงในมวลดินรอบรูเจาะกลม

6. ผลการทดสอบและอภิปรายผลการทดสอบ

แรงเสียดทานและหน่วยแรงเสียดทานซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของเสาเข็มเจาะกลม และ Barrette ที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 และในตารางที่ 2 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกลมและ Barrette แสดงไว้ในรูปที่ 5 และรูปที่ 7 และแรงเสียดทานผิวที่เกิดขึ้นที่จุดเปลี่ยนของชั้นดินของเสาเข็มเจาะและ Barrette ซึ่งวัดโดย VWSGs ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 และรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะก่อสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกันแต่ถ้ามีการก่อสร้างที่ถูกขั้นตอนและควบคุมคุณภาพอย่างดีแล้ว หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวของเสาเข็มเจาะและ Barrette จะไม่มีความแตกต่างกัน และเป็นที่น่าสังเกตว่าแม้จะมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มแต่หน่วยแรงที่ปลายเสาเข็มกลับมีไม่มากคือประมาณ 17% สำหรับเสาเข็มเจาะ และ ประมาณ 8% สำหรับ Barrette ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Zhang et al, [4] ที่พบว่าแรงแบกทานของเสาเข็มเจาะอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในเมือง Fuzhou มีค่าน้อยกว่า 10% ของน้ำหนักทดสอบ ข้อสังเกตอีกประการก็คือ แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะแบบกลมและ Barrette ในชั้นทรายมีค่าสูงกว่าปกติ สาเหตุข้างต้นน่าจะเป็นไปได้ว่าการอัดฉีดน้ำปูนภายในเวลา 12-24 ชั่วโมงหลังเทคอนกรีตเสร็จดินโดยรอบยังไม่รัดเสาเข็มดีทำให้น้ำปูนที่ถูกอัดฉีดด้วยแรงดันไม่สามารถคงตัวอยู่ที่ปลายเสาเข็มแต่จะถูกดันขึ้นที่ข้างผิวเสาเข็มและครูดเอา

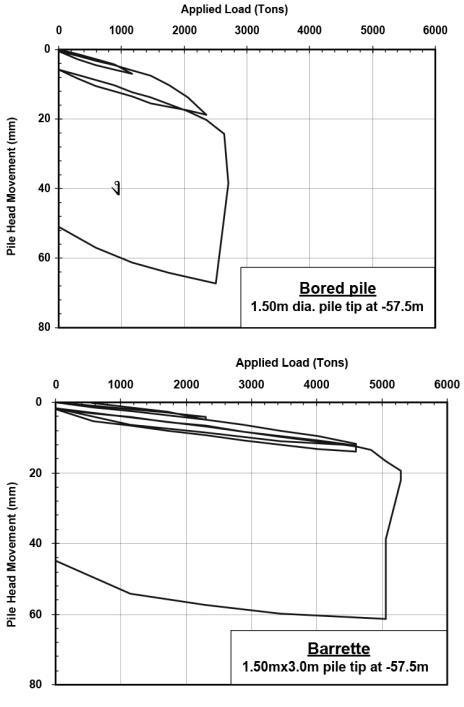


รูปที่ 4 แรงเสียดทานและหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มกลมและ Barrette

Filter Cake ที่เกิดขึ้นที่ผิวผนังรูเจาะในชั้นทรายออกจนหมด ซึ่งข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al, [3] ที่สรุปไว้ว่าน้ำปูนที่ถูกอัดที่ปลายเสาเข็มจะวิ่งกระจายขึ้นข้างเสาเข็มสู่ด้านบนทำให้หน่วยแรงเสียดทานในชั้นทรายเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนที่ค่าแรงแบกทานของ Barrette ต่ำกว่าของเสาเข็มเชื่อว่าเกิดจากการเจาะเสาเข็มกลมใช้วิธีหมุนทำให้สภาพขั้นดินก้นรูเจาะถูกรบกวนน้อยกว่าและเรียบสะอาดกว่าการเจาะแบบกระแทก (Percussion) ของ Barrette ที่ดินถูกรบกวนมากกว่าและก้นรูเจาะไม่เรียบเท่าเสาเข็มกลม

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทาน แลหน่วยแรงที่ปลายเข็มของ เสาเข็มเจาะกลม และ Barrette

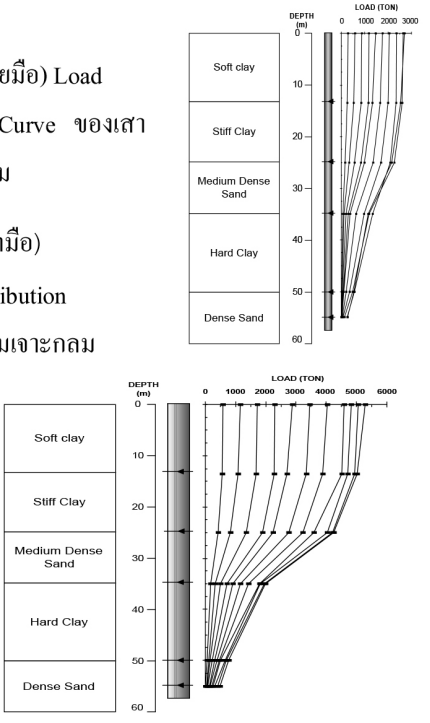
Depth	Soil type	Mobilized skin friction (t/sq. m.)			
		Bored pile		Barrette	
		Design load	Max. mobi.	Design load	Max. mobi.
0.0-13.5	soft clay	0.20	2.63	0.26	2.24
13.5-25.0	Stiff to very stiff clay	5.90	7.01	3.58	8.86
25.0-35.0	Med. dense silty sand	11.46	22.76	13.25	25.28
35.0-50.0	Hard silty clay	3.09	11.11	3.55	9.61
50.0-55.0	hard clay + clayey sand	3.43	14.84	3.19	7.49
Max mobilized end bearing (t/sq. m.)		270		101	



รูปที่ 7 Load-Settlement –Curveของ Barrette

รูปที่ 5 (ซ้ายมือ) Load Settlement Curve ของเสาเข็มเจาะกลม

รูปที่ 6 (ขวามือ) Load Distribution ของเสาเข็มเจาะกลม



รูปที่ 8 Load Distribution ของ Barrette

7.บทสรุป

1. เสาเข็มเจาะรูปสี่เหลี่ยม (Barrette) ขนาด1.50 x 3.00 ลึก 57 เมตร เป็นเสาเข็มที่มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงที่สุดเท่าที่เคยก่อสร้างและทดสอบในประเทศไทย
2. จากผลการทดสอบพบว่าหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มกลมและเหลี่ยมแทบจะไม่แตกต่างกันเลย
3. การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มโดยระบบ Tube-A-Manchettes ภายหลังการเทคอนกรีตเสร็จในระยะไม่นานนัก (12-24 ชั่วโมง) นั้น จะทำให้ค่าแรงเสียดทานในชั้นทรายเพิ่มมากขึ้นจากปกติเป็นอย่างมากด้วย แต่ค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าที่คาดหวังไว้มาก
4. เสาเข็มแบร์เร็ตต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของวิศวกรปฐพี ในการออกแบบฐานรากซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงมาก ๆ ได้ เนื่องจากสามารก่อสร้างให้มีขนาดและรูปร่างได้ใหญ่กว่าเสาเข็มกลมมาก

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความนี้ขอแสดงความขอบคุณ คุณณรงค์ ทัศนนิพันธ์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนในการเขียนบทความนี้ โดยได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้คณะผู้เขียนนำมาใช้ประกอบการเขียนบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Hosoi T, Yagi N and Enoki M. , Consideration to the Skin Friction of Diaphragm Wall Foundation, 3rd International Conference on Deep Foundation Practice Incorporating PILETALK, Singapore.,1994.
2. Thasnanipan, N., Anwar, M. A., Maung, A.W. and Tanseng, P. Performance Comparision of Bored and Excavated Piles in the Layered Soils of Bangkok., Proceeding of the Symposium in Honor of Professor Seng – Lip Lee., Innovative Solutions in Structural and Geotechnical Engineering. Organized by Asian Institute of Technology., Bangkok, Pp 345-353. May 1999
3. Lui, J., Zhu, Z. and Zhang, Y. The Technology and Application of Post Grouting for Slurry Bored Piles. Proc. of 14th Intl. Conf. on Soil Mechanice and Foundation Engineering. Hamburg/6-12 September 1997. Pp.831-834, 1997.
4. Zhang, Y. and Huang,W., Large Bored Piles with Grouted End in Fuzhou., Geo Eng 2000. An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering., Melbourne ,Australia, 19-24 N0vember 2000, Pp in CD Rom

การควบคุมคุณภาพเสาเข็มระบบเจาะแห้งโดยเครื่องเจาะแบบสามขา

QUALITY CONTROL OF DRY PROCESS BORED PILES EXCAVATED BY TRIPOD RIG

ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์[1], นที รัตนชูวงค์ [2] และจรุง หิรัญอ่อน[3]

[1] ผู้อำนวยการโครงการ, [2] ผู้จัดการโครงการ, [3] วิศวกรโยธา

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ: มีการนำเสาเข็มระบบเจาะแห้งชนิดใช้เครื่องเจาะแบบสามขามาใช้ในกรุงเทพฯ ครั้งแรกเมื่อประมาณยี่สิบแปดปีมาแล้ว ในชื่อเรียกทางเทคนิคว่า เสาเข็มเจาะเพรสเชอร์ไพลิ่ง (Pressure Bored Piling) ซึ่งเสาเข็มชนิดนี้ถูกออกแบบวิธีการติดตั้ง (Installation) ในยุคแรกไว้ดีมาก โดยมีราคาไม่แพงจึงเหมาะสมกับโครงสร้างขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ต่อมาในยุคหลังๆ เสาเข็มชนิดนี้ถูกเรียกชื่อสั้นๆว่าเสาเข็มเจาะสามขา และพบว่าผู้ประกอบการมากรายในระยะหลังนี้มีการทำงานแบบลัดขั้นตอนกันมาก โดยละเว้นไม่อัดความดัน จนเกิดผลกระทบต่อความสมบูรณ์ (Integrity) ของตัวเสาเข็ม ดังนั้นผู้ควบคุมงานเสาเข็มเจาะชนิดนี้จึงต้องควบคุมการก่อสร้างในขั้นตอนที่สำคัญไม่ให้เกิดการลัดขั้นตอน คือปลอกเหล็กชั่วคราวต้องถูกตอกให้ลึกเพียงพอต่อการป้องกันดินรอบรูเจาะบีบตัว,การเทคอนกรีตลงไปในรูเจาะโดยตรง (Free Fall Method) ต้องเทผ่านกรวยเพื่อป้องกันการแยกตัวของคอนกรีต และการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวขึ้นมาต้องใช้แรงดัน (Pressure) ช่วยเพื่อกดผิวหน้าคอนกรีตไว้ไม่ให้ขยับตามปลอกเหล็กขึ้นมาได้และทำให้การถอนง่ายขึ้นด้วย ก็จะทำให้ได้เสาเข็มเจาะที่มีความสมบูรณ์โดยไม่ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้นแต่ประการใด

Abstract: Dry process bored pile excavated by tripod rig has been introduced in to Bangkok since 28 years ago in the name of Pressure Bored Piling. Installation method of this piling system has been very well designed, and it's system is reliable and suitable for small to medium scale structures.The name of this piling system has been called as tripod bored pile at later stage. Recently, many records shown that some piling contractors have ignored many necessary techniques during installation such as did not apply pressure during extraction of casing and resulting poor integrity to piles. Therefore, in order to get the good pile integrity without increasing the cost, the inspectors need to know the proper installation techniques and to ensure that the construction is not deviated from the method i.e., temporary casing shall be long enough to protect soft soil squeeze in, segregation of concrete from free fall pouring shall be prevented by pouring through the funnel and pressure shall be applied to assist the extraction and to press the top of concrete not to be lifted by casing during extraction process.

KEYWORDS: Pressure bored piling, Quality assurance, Free fall concrete.

For further details, contact *Mr.Pakpong Sriwannawit, Seafco Co., Ltd. 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangkok 10510,Thailand.*

1. บทนำ

ยุคที่เศรษฐกิจเฟื่องฟูในทศวรรษที่แล้วนั้นมีการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ที่ใช้เสาเข็มฐานรากเป็นเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบเปียกเป็นจำนวนมากจนเสาเข็มชนิดดังกล่าวเกิดการขาดแคลน ทำให้ผู้ควบคุมงานส่วนมากในขณะนั้นให้ความสนใจและศึกษาเกี่ยวกับเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบเจาะเปียกกันมาก มีเพียงส่วนน้อยที่ยังติดตามและสนใจการควบคุมคุณภาพของเสาเข็มขนาดเล็กระบบเจาะแห้งชนิดที่ใช้เครื่องเจาะแบบสามขาอย่างจริงจัง ทั้งๆ ที่ในขณะนั้นก็มีการก่อสร้างอาคารขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่ใช้เสาเข็มชนิดนี้จำนวนมากไม่น้อยไปกว่าจำนวนโครงการที่ใช้เสาเข็มขนาดใหญ่ระบบเปียกเท่าใดนักจนทำให้เสาเข็มระบบนี้เกิดการขาดแคลนในช่วงเวลาดังกล่าวด้วยเช่นกัน เนื่องจากการลงทุนของเสาเข็มชนิดนี้ใช้เงินที่ไม่มากนักและไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีชั้นสูง จึงมีผู้ลงทุนจากหลายหลายอาชีพที่ไม่มีความรู้พื้นฐานใดๆ ทางด้านเสาเข็มและด้านช่างทั่วไปเลยเป็นจำนวนมากเข้ามาลงทุนประกอบการ เมื่อถึงยุคที่เศรษฐกิจถดถอยเช่นปัจจุบัน บริษัทฯ เสาเข็มเจาะแบบสามขาหลายสิบรายเกิดการแข่งขันกันอย่างไร้ขอบเขตมีการรับงานในราคาที่ต่ำกว่าต้นทุนมาก เป็นผลให้เสาเข็มระบบสามขาที่ก่อสร้างโดยผู้ประกอบการบางรายทำการก่อสร้างแบบลัดขั้นตอนเพื่อหวังให้ได้ผลงานมากต้นในแต่ละวันเท่านั้น จนทำให้เสาเข็มบางส่วนเกิดมีสภาพความสมบูรณ์ต่ำ (Poor Integrity) กว่ามาตรฐานเป็นอย่างมากจนน่าเกิดอันตราย บทความนี้จะบรรยายถึงวิธีการควบคุมเสาเข็มระบบเจาะแห้งแบบง่ายๆ แต่ได้คุณภาพเสาเข็มที่ดี โดยที่ไม่ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด

2. เสาเข็มเจาะระบบแห้งแบบใช้เครื่องเจาะชนิดสามขาในประเทศไทย

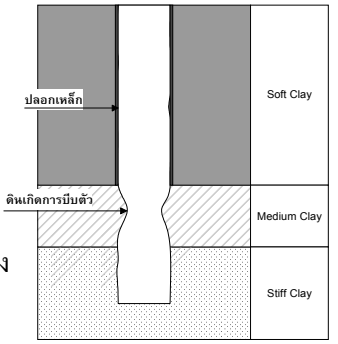
เริ่มมีการนำเสาเข็มเจาะสามขามาใช้ในกรุงเทพฯครั้งแรกเมื่อยี่สิบแปดปีที่แล้วในชื่อว่า เสาเข็มเจาะเพรสเชอร์ไพล์ลิ่ง (Pressure Bored Piling) โดยผู้รับเหมาจากฮ่องกงมาเปิดสาขาในกรุงเทพฯ เมื่อประมาณปี พ.ศ 2515 ใช้ชื่อว่า บริษัทสยามเพรสเชอร์ไพลิ่ง จำกัด (ได้เลิกกิจการไปนานแล้ว) และในปี พ. ศ. 2517 บริษัทฯ ที่ผู้เขียนทำงานอยู่ในปัจจุบันได้เปิดธุรกิจประเภทเดียวกันขึ้นมาเป็นของคนไทยรายแรก และต่อมาจนถึงปัจจุบันได้มีผู้เปิดธุรกิจชนิดนี้ขึ้นมาอีกมากราย ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ในยุคแรกๆ ทำงานตามวิธีการที่คัดลอกแบบจากบริษัทต้นแบบที่มาจากต่างประเทศ คือใช้วิธีจ้างพนักงานประจำแบบจ่ายค่าจ้างตามเวลาที่ทำงานเป็นรายวันหรือรายเดือน ซึ่งต่างกับยุคปัจจุบันนี้ที่ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ใช้วิธีจ้างแรงงานเป็นชุด ชุดละ 4 ถึง 5 คน แบบเหมาค่าจ้างเป็นผลงานรายต้น ซึ่งแรงงานเหมาค่าแรงส่วนใหญ่จะเร่งทำงานให้เร็วเพื่อให้ได้ผลงานมากต้นต่อวันต่อชุด แต่การเร่งงานดังกล่าวจนเกินไปอาจไม่เหมาะกับงานเสาเข็มเจาะที่มีลักษณะความยุ่งยากตามธรรมชาติ ที่ต้องมีการตรวจสอบคุณภาพใกล้ชิดอย่างเป็นขั้นตอน การเร่งงานโดยการเหมาจ่ายตามผลงานดังกล่าวทำให้การจัดระบบประกันคุณภาพ (Quality Assurance) ไม่สามารถจัดทำได้ดีหรืออาจไม่มีการทำเลย ซึ่งอาจทำให้เสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างเสร็จแล้วเกิดมีสภาพความสมบูรณ์ต่ำเกิดขึ้นได้โดยง่าย

3. ขั้นตอนการก่อสร้าง

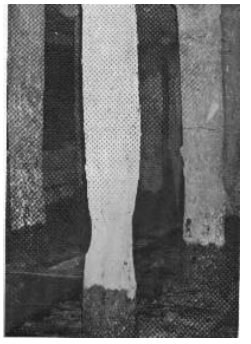
การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแห้งแบบชนิดสามขานี้มีอยู่ห้าขั้นตอนหลัก คือ ก) การตอกปลอกเหล็ก, ข) การเก็บดิน, ค) การลงเหล็กโครงเหล็กเสริม, ง) การเทคอนกรีตและ จ) การถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออก ในแต่ละขั้นตอนหากปล่อยให้ผู้รับเหมาทำกันเองโดยขาดการควบคุมจากผู้ควบคุมงานที่มีประสบการณ์แล้ว มักจะพบว่ามีเสาเข็มจำนวนหนึ่งเกิดคุณภาพต่ำจนอาจรับน้ำหนักไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้จนอาจทำให้โครงสร้างส่วนบนดินเกิดการทรุด

เสียหายในภายหลังได้ ดังนั้นผู้ควบคุมงานจึงจำเป็นต้องกำหนดวิธีควบคุมตามขั้นตอนโดยไม่ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นแต่จะได้เสาเข็มคุณภาพดีขึ้นดังนี้ คือ

3.1 การลงปลอกเหล็กชั่วคราว: ให้ตอกปลอกเหล็กชั่วคราวที่มีผิวด้านในสะอาดและปราศจากเศษปูนเกาะมาต่อกันด้วยเกลียวเป็นท่อนๆ ลงไปให้สามารถกันชั้นดินอ่อน (Soft Clay) และชั้นดินอ่อนเกือบแข็ง (Medium Clay) บีบตัวจนปลายปลอกเหล็กหยั่งถึงระดับบนของชั้นดินแข็ง (Stiff Clay) ปัญหาของขั้นตอนนี้มักจะเกิดขึ้นจากการที่ชุดเจาะพยายามลดเวลาในการลงปลอกเหล็กให้เหลือน้อยที่สุด โดยตอกลึกแค่เลยระดับชั้นดินอ่อนเพียงเล็กน้อย แต่ปลายปลอกเหล็กยังอยู่ในชั้นดินอ่อนที่เกือบจะแข็ง (Medium Clay) ไม่ถึงระดับบนของชั้นดินแข็งจริง ซึ่งรูเจาะขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางไม่กิน 60 ซม.) ในชั้นดินอ่อนที่เกือบจะแข็งนี้แม้ดินในรูเจาะจะไม่พังแต่ก็จะเกิดการบีบตัว (Squeeze) ให้รูที่เจาะไว้เล็กลงในภายหลังได้ในเวลาไม่นานนัก ทำให้ตัวเสาเข็มเกิดการคอด (Neck) ที่ระดับใต้ปลายปลอกเหล็กตาม รูปที่ 1 ก และ 1 ข ชุดทำงานขุดเจาะมักชอบตอกปลายปลอกเหล็กให้อยู่ในชั้นดินอ่อนเกือบแข็งนี้เพราะนอกจากจะลดเวลาในการตอกแล้ว การถอนปลอกเหล็กออกจะทำได้ง่ายและเร็วอีกด้วย ชุดเหมาเจาะเหล่านี้ส่วนใหญ่จะไม่คิดถึงเรื่องรูเจาะบีบตัว เพราะไม่มีความรู้เพียงพอเมื่อเห็นรูเจาะไม่พังขณะเจาะก็คิดว่าใช้ได้ดีแล้ว ดังนั้นการตอกปลอกเหล็กชั่วคราวต้องตอกให้ปลายถึงระดับชั้นดินแข็ง (Stiff Clay) จริงก็จะป้องกันปัญหานี้ได้



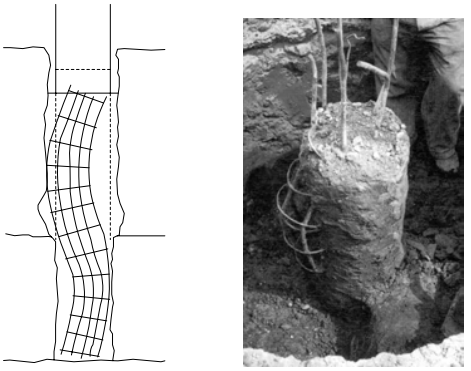
รูปที่ 1 ก รูเจาะบีบตัวเนื่องจากปลายปลอกเหล็กลึกไม่พอ



รูปที่ 1 ข เสาเข็มคอดจากดินบีบตัว (after Thorburn et al, 1977)

3.2 การเก็บดินภายในปลอกเหล็ก: จะต้องคอยสังเกตสีและความแข็งของดินที่ขุดเจาะขึ้นมา เพื่อตรวจดูว่าระดับความลึกเท่าใดที่รูเจาะจะมีเสถียรภาพเองได้โดยไม่บีบตัวเล็กลง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความยาวปลอกเหล็กที่ตอกลงไปแล้ว การวัดต้องใช้เทปวัดระยะถ่วงน้ำหนักหย่อนลงไปวัด ชุดเหมาเจาะมักจะใช้ไม้เป็นท่อนความยาวหนึ่งเมตรทาบสลิงเจาะวัดระยะทบความยาวไปเรื่อยๆ การวัดวิธีนี้มักจะผิดพลาดได้ง่าย โดยจะพบเห็นอยู่บ่อยๆว่าวัดหลุมเจาะได้ลึกกว่าความลึกจริงที่เจาะไว้ นอกจากนั้นต้องหมั่นสังเกตชั้นดินที่เหมาะสมสำหรับปลายเสาเข็ม (Pile Toe หยั่ง เพราะเสาเข็มระบบแห้งชนิดนี้ถ้าปลายเสาเข็มเจาะลึกถึงชั้นทราย (Sand Layer or Clayey/ Silty Sand Layer) ก้นรูเจาะจะไม่สามารถคงสภาพแห้งได้ แต่ปลายเสาเข็มเจาะแห้งจะเหมาะกับชั้นดินชนิดดินแข็ง (Stiff to Hard Sandy /Silty Clay) ซึ่งเป็นชั้นดินที่ทึบน้ำ (Impermeable Soil) ก้นรูเจาะจึงจะแห้งได้ ดังนั้นผู้ควบคุมงานต้องคอยตรวจสอบชั้นดินเป็นระยะๆ และระวังอย่าให้ชุดรับเหมาเจาะที่ขาดความรับผิดชอบใช้กระบอกเจาะดิน (Clay Cutter) ของเสาเข็มขนาดเล็กกว่ามาตรฐานมาใช้เจาะดินที่ระดับใต้ปลายปลอกเหล็กเพื่อลดปริมาณคอนกรีตที่เทอันเนื่องจากรับงานมาราคาต่ำมาก จึงควรป้องกันโดยไม่อนุญาตให้นำกระบอกเก็บดินของเสาเข็มขนาดเล็กกว่าขนาดมาตรฐานที่ใช้เจาะเข้ามาไว้ในหน่วยงาน

3.3. โครงเหล็กเสริมเสาเข็ม: ควรกำหนดให้เสริมยาวตลอดต้นและต้องผูกให้แน่นหนาเพื่อป้องกันการโก่งงอเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตที่ทรุดตัวลง (Slumping of Concrete) ตามรูปที่ 2 และต้องเผื่อระยะให้คอนกรีตหุ้มโครงเหล็กไว้ 7.5 ซม. นอกจากนั้นแล้วก่อนถึงเวลาทำการเทคอนกรีตไม่นานนัก ควรต้องทำการขยับโครงเหล็กขึ้นลงเล็กน้อย หากไม่สามารถขยับได้โดยง่าย แสดงว่ารูเจาะระดับใต้ปลอกเหล็กเกิดการบีบตัวเล็กลง ต้องแก้ไขรูเจาะใหม่ โดยตอกปลอกเหล็กให้ลึกขึ้นและต้องตรวจสอบให้มั่นใจว่า มีการใส่โครงเหล็กครบไม่ได้ใส่ไว้แต่เฉพาะส่วนบน จึงควรนับโครงเหล็กที่ผูกไว้ล่วงหน้าทุกวัน ให้มั่นใจว่ามีการใส่โครงเหล็กลงไปยาวตลอดทั้งต้น

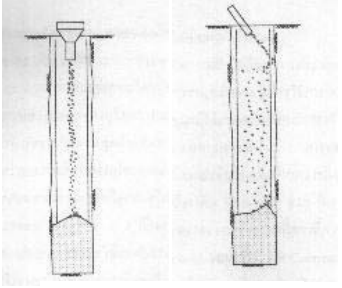


รูปที่ 2 โครงเหล็กงอเนื่องจากคอนกรีตทรุดตัวทำให้เหล็กโผล่

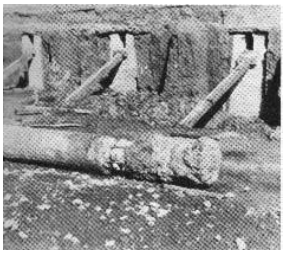
3.4 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้และวิธีการเทคอนกรีตโดยตรงลงไปในรูเจาะ

3.4.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ใช้นอกจากออกแบบให้มีกำลังอัดตามต้องการแล้ว ยังต้องพิจารณาออกแบบให้เป็นคอนกรีต ที่มีลักษณะสามารถอัดแน่นด้วยน้ำหนักตัวเองได้ดี (Self Compaction under Self Weight) และมีการเกาะตัวกันดี (Cohesive Concrete), ไม่เกิดการแยกตัวหรือเกิดการเยิ้ม (Resistance to Segregation or Bleeding) ในขณะเท, มีความสามารถในการเทที่ดี (Good Workability Concrete) และมีความคงทนสูง (High Durability Concrete) ค่าการยุบตัว (Concrete Slump) ควรกำหนดไว้ระหว่างประมาณ 10.5 ถึง 15.5 ซม. กรณีที่ใช้คอนกรีตผสมเองโดยโม่ขนาดเล็กต้องควบคุมไม่ให้เกิดการผสมปูนซีเมนต์แต่น้อยแต่ใส่หินและทรายมาก หรือใช้ปูนซีเมนต์ผิดประเภท ควรป้องกันโดยตรวจถุงปูนที่ใช้แล้วทุกวัน เพื่อป้องกันการนับซ้ำอีกในวันหลัง ถุงปูนที่ใช้แล้วไม่ควรให้เก็บไว้ในหน่วยงานเพราะอาจเผลอเรอนับซ้ำในวันหลังอีก

3.4.2 การเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะระบบแห้งนั้น ADSC, [1] ได้เคยวิจัยและสรุปว่าสามารถเทคอนกรีตโดยตรงจากปากรูลงไปในรูเจาะได้ แต่ให้เทผ่านกรวยขนาดสั้นที่ปากรูเจาะเพื่อให้คอนกรีตตกกระแทกก้นรูอย่างอิสระปราศจากการกระแทกถูกโครงเหล็กหรือผิวผนังรูเจาะ ปัญหาที่มักจะพบเห็นคือชุดทำงานขี้เกียจยกกรวยเทคอนกรีตมาใช้หรืออาจไม่ได้เตรียมไว้เลยทำให้คอนกรีตที่เทลงไปไม่ตกกระแทกก้นหลุมโดยตรง แต่ตกกระแทกกับโครงเหล็กลงไปทำให้คอนกรีตอาจเกิดการแยกตัวได้ (รูปที่ 3) และในกรณีที่รุนแรงอาจกระแทกผนังดิน



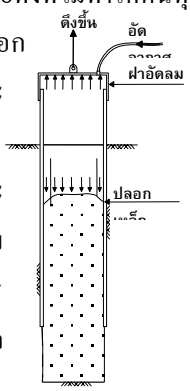
รูปที่ 3 การเทคอนกรีต
ซ้ายมือ วิธีเทที่ถูก
ขวามือ วิธีเทที่ผิด

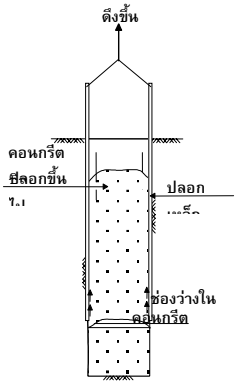


รูปที่ 4 คอนกรีตปลายเสาเข็มแยกตัวเนื่องจากมีน้ำซึมสะสมที่ก้นรูเจาะมาก (after Thorburn et al, 1977)

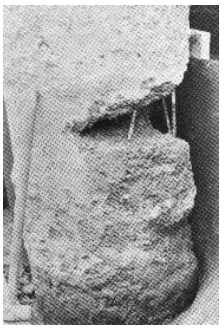
รูเจาะพังลงผสมกับคอนกรีตได้เช่นกัน ดังนั้นผู้ควบคุมงานควรกำหนดให้เทคอนกรีตผ่านกรวยที่ปากรูเจาะทุกครั้ง เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวข้างต้นซึ่งขั้นตอนดังกล่าวไม่ทำให้ต้นทุนการทำเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด มาตรฐาน ADSC, [1] อนุญาตให้เทคอนกรีตระบบแห้งแบบ Free Fall ได้ หากปริมาณน้ำซึมที่ก้นรูเจาะสูงไม่เกิน 5 ซม. และ Thorburn and Thorburn, [2] กล่าวว่าคอนกรีตที่เทลงไปจะเกิดการแยกตัว หากมีน้ำซึมสะสมที่ก้นหลุมมากเกินไป ตามรูปที่ 4

3.5 การถอนปลอกเหล็ก: หลังจากเทคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออกทีละท่อน เมื่อถอดออกมาแต่ละท่อนแล้ว ต้องล้างเศษปูนที่ติดภายในปลอกเหล็กทันที เพื่อให้มั่นใจได้ว่าไม่มีเศษปูนแข็งตัวติดอยู่ในปลอกเหล็กขณะทำต้นต่อไป การที่มีเศษปูนติดภายในปลอกเหล็กจะทำให้ความฝืดระหว่างผนังปลอกเหล็กกับคอนกรีตสดที่เทลงไปมีมาก เสี่ยงต่อคอนกรีตขยับตัวติดขึ้นมาขณะกำลังถอนปลอกเหล็ก วิธีถอนที่ดีและมีประสิทธิภาพต่อการป้องกันคอนกรีตติดขึ้นมาดีที่สุดคือการใช้ความดัน (Pressure) จากเครื่องอัดลมช่วยในการถอน ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เองเป็นที่มาของชื่อเพรสเซอร์ไพลิ่ง (Pressure Piling) ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1 ความดันจะช่วยดันปลอกเหล็กให้ถอนง่ายขึ้น และความดันจะกดลงที่ผิวหน้าคอนกรีตไม่ให้ขยับติดปลอกเหล็กขึ้นมาด้วย (รูปที่5) ควรถอนแบบนี้ประมาณสองถึงสามปลอกจนเห็นว่าแรงฝืดระหว่างปลอกเหล็กกับคอนกรีตและระหว่างปลอกเหล็กกับดินเหลือน้อยแล้ว จึงทำการถอนโดยตรงอย่างเดียวต่อไป ปัญหาที่พบส่วนมากเกิดจากชุดเหมาทำงานทำการถอนปลอกเหล็กโดยตรงไม่ใช้ความดันช่วยทั้งที่ไม่ทำให้ต้นทุนเพิ่ม จึงทำให้คอนกรีตที่ปลายปลอกเหล็กอาจขยับติดปลอกขึ้นมาจนทำให้ดินอ่อนใต้ปลอกเหล็กไหลทะลักเข้ามา และคอนกรีตที่ขยับติดขึ้นมาร่วงหล่นลงมาผสมกับดิน (รูปที่ 6 และรูปที่ 7) จนทำให้เสาเข็มขาดความมั่นคง ดังนั้นผู้ควบคุมงานควรกำหนดให้ถอนปลอกเหล็กช่วงแรกโดยใช้แรงดันช่วยด้วย ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพงานดีขึ้นมาก





รูปที่ 5 ถอนโดยใช้ Pressure (ซ้าย)
รูปที่ 6 ถอนโดยไม่ใช้ Pressure (ขวา)

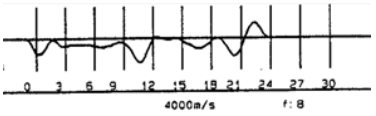


รูปที่ 7 ดินแทรกในคอนกรีต (after Thorburn et al, 1977)

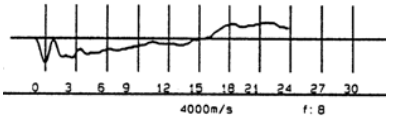
4. การเปรียบเทียบความสมบูรณ์ ของเสาเข็มจากผลการทดสอบโดย โซนิกอิเทก'กรีที เทสต์

Thorburn and Thorburn [2] ได้รวบรวมปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นไว้อย่างน่าศึกษาผู้สนใจจะหาอ่านได้จากเอกสารอ้างอิง{2} ในกรุงเทพฯ การตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะแห้งระบบสามขา ที่มีความลึกไม่มากโดยวิธีโซนิกอินเทก'กรีที เทสต์ (Sonic Integrity Test) นั้น ถือเป็นเรื่องปกติ เมื่อทำการตรวจสอบโดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้เรื่องการก่อสร้างเสาเข็มระบบนี้และชั้นดินด้วยแล้วจะสามารถเห็นและสรุปความบกพร่องหรือความสมบูรณ์ได้สอดคล้องกับสภาพจริงของเสาเข็มได้ รูปที่ 8 ก-8 ค เป็นการตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มในหน่วยงานที่เจาะโดยชุดทำงานแบบเหมาค่าแรงรายต้น เสาเข็มเหล่านี้ทราบในภายหลังว่ามีการตอกปลอกเหล็กถึงแค่ระดับดินแข็งปานกลาง (Medium Clay) ที่ความลึกประมาณ 12 –13 เมตร, เทคอนกรีตไม่ผ่านกรวยและถอนปลอกเหล็กโดยตรง

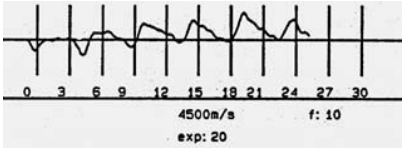
ไม่ใช้แรงดัน (Pressure) ช่วย ได้พบว่ามีปัญหาหลายต้นในหลายรูปแบบที่สามารถเห็นได้ชัดเจนจากคลื่นสัญญาณ รูปที่ 8 ก - 8 ค ส่วนรูปที่ 8 ง เป็นการตรวจจากหน่วยงานที่สองที่มีการควบคุมให้ตอกปลอกเหล็กลึก 15 เมตรถึงดินแข็ง, เทคอนกรีตผ่านกรวยและถอนปลอกเหล็กโดยใช้แรงดัน (Pressure) จากเครื่องอัดลม (Air Compressor) ช่วย ซึ่งการควบคุมดังกล่าวไม่ทำให้ต้นทุนค่าก่อสร้างและงานเพิ่มขึ้น พบว่าความสมบูรณ์ของตัวเสาเข็มที่ดูจากคลื่นสัญญาณตรวจสอบจะดีกว่าคลื่นสัญญาณที่ได้จากหน่วยงานแรกมาก



รูปที่ 8 ก เสาเข็มก่อสร้างลัดขั้นตอนโดยใส่ปลอกเหล็กสั้นไปเกิดการคอดที่ปลายปลอกเหล็กชั่วคราว



รูปที่ 8 ข คอนกรีตคุณภาพต่ำเนื่องจากเทลงไปโดยตรงไม่ผ่านกรวยจนเกิดการแยกตัว



รูปที่ 8 ค การถอนปลอกเหล็กโดยตรงไม่ใช้แรงดันช่วยกดจนคอนกรีตขยับตามขึ้นมาและเสาเข็มขาด



รูปที่ 8 ง เสาเข็มเจาะระบบสามขาที่ก่อสร้างอย่างถูกวิธีจะมีความสมบูรณ์ดีมาก

5.บทสรุป

เสาเข็มเจาะระบบแห้งแบบใช้เครื่องเจาะชนิดสามขาเป็นระบบที่ดีและประหยัดเหมาะกับการก่อสร้างขนาดเล็กถึงขนาดกลาง แต่ต้องมีการควบคุมคุณภาพการติดตั้งในแต่ละขั้นตอนที่สำคัญอย่างถูกต้องจึงจะสามารถป้องกันปัญหาเรื่องสภาพความสมบูรณ์ต่ำ(Poor Integrity)ได้ ผู้ควบคุมงานจะต้องควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อป้องกันการก่อสร้างชนิดทำเสร็จเร็วมากเกินไปเพื่อให้ได้ผลงานมากต้นที่สุดในแต่ละวันเท่านั้น เพราะอาจจะไม่มีการเอาใจใส่ในคุณภาพเท่าที่ควรจนทำให้งานเสียหายได้ ในการก่อสร้างผู้ควบคุมงานต้องติดตามเรื่องความยาวปลอกเหล็ก, การเทคอนกรีตให้ผ่านกรวยและการถอนปลอกเหล็กโดยควรใช้ความดันช่วยการถอนปลอกเหล็กเพื่อความดันจะกดหน้าคอนกรีตไม่ให้ขยับติดปลอกขึ้นมาจึงจะได้คอนกรีตเสาเข็มมีความต่อเนื่องและแข็งแรงตามที่ได้ออกแบบไว้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณ คุณณรงค์ ทัศนนิพันธ์ กรรมการผู้จัดการบริษัท ซีฟโก้ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและให้คำแนะนำในการเขียนบทความนี้จนเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. ADSC: The International Association of Foundation Drilling, The Effect of Free Fall Concrete in Drilled Shafts A Report to The Federal Highway Administration, 1994.
2. Thorburn, S. and Thorburn, J.Q., Review of Problems Associated with the Construction of Cast–In–Place Concrete Piles., Construction Industry Research and Information Association. (CIRIA) Report PG 2, 1977.

สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพ
Performance of Bentonite Bored Piles Constructed in Bangkok Subsoil

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด
61/141 ถนนพระราม 9 ห้วยขวาง กรุงเทพ 10320
โทร 6439561─72, 2472290-4, โทรสาร 2462177
Home page: www.seafco.co.th
E-mail: seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ

เสาเข็มระบบเจาะเปียกได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยมามากกว่า 20 ปีแล้ว มีผู้ประกอบการท้องถิ่นและมาจากต่างประเทศรวมกันกว่า 10 ราย เสาเข็มชนิดนี้สามารถก่อสร้างให้มีขนาดใหญ่และลึกได้มากไม่มีข้อจำกัดไม่เหมือนเสาเข็มชนิดหล่อสำเร็จแล้วตอกลงในดิน และสามารถออกแบบให้เสาเข็มแต่ละต้นรับน้ำหนักได้สูงถึง 2,000 ตัน แม้นเสาเข็มระบบนี้จะมีข้อดีหลายประการแต่หากผู้เกี่ยวข้องมีความรู้ความชำนาญไม่เพียงพอและไม่เข้าใจขั้นตอนการก่อสร้างและไม่ควบคุมคุณภาพที่เพียงพอแล้ว เสาเข็มชนิดนี้อาจมีสมรรถนะการรับน้ำหนักไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอย่างรุนแรงได้ ในต่างประเทศเช่น ประเทศอังกฤษมีการกำหนดมาตรฐานและข้อกำหนดสำหรับปฏิบัติ เช่น BS, CP8004 (for foundation) จัดทำโดย British standard, Institution of Civil Engineers (ICE) และโดย Federal of piling specialists (FPS) ส่วนในประเทศอเมริกาจะมี American Concrete Institute (ACI), Deep Foundation Institute (DFI) และ American Association of the State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จัดทำมาตรฐานและข้อกำหนดที่คล้ายกันออกมา เช่น ACI 336.1.94 ส่วนในประเทศไทยขณะนี้ยังไม่มีการรวบรวมข้อกำหนดในการทำเสาเข็มเจาะให้เป็นมารตฐานเดียวกันอย่างเป็นทางการ จึงน่าจะมีมีการร่วมมือระหว่างภาครัฐ, สถาบันทางวิชาการและผู้เชี่ยวชาญในสาขานี้ ทำการออกข้อกำหนดและมาตรฐานขึ้นมาเพื่อใช้ในประเทศ บทความนี้บรรยายถึงสมรรถนะของเสาเข็มที่ก่อสร้างอย่างไม่ถูกวิธีและไม่ได้มาตรฐานไว้ด้วย

Abstract

Piles bored under slurry or wet process bored piles have become popular and been used in Thailand over 20 years already. There are more than 10 piling contractors locally and from an overseas. This type of pile is versatile and can be constructed in various sizes and to a great depth unlike pre-cast driven piles. It can be designed to carry the safe load up to 2,000 tons per pile. Although this bored pile type has many advantages, the performance of pile highly depends on the construction experience and knowledge of the piling contractors. Sometimes, poor performance of piles, which cannot carry the designed load can lead to severe damages to, the superstructure supported. In this regard, to control the construction quality necessitates a standard specification for this pile type. In overseas countries like the UK, standards and codes of practice such as BS, CP 8004 (for foundation) have been developed by the British Standards Institution and by the Institution of Civil Engineers (ICE) and the Federation of Piling Specialists (FPS). In the USA, ACI, the Deep Foundation Institute (DFI) and AASHTO have developed the similar standards and specifications such as ACI 336.1,94. At present in Thailand there is no unified piling specification to follow and construct the piles to the same standard covering both integrity and load carrying capacity. It is recommended that a national piling specification needs to be jointly developed by the authorities, engineering institutions and professionals. Performances of poorly constructed piles are also discussed in this paper.

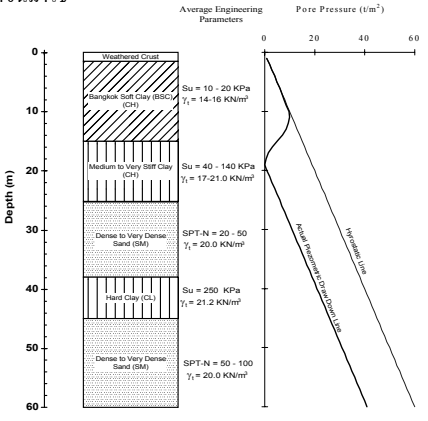
1. บทนำ

เสาเข็มเจาะหล่อในที่ (Cast In-Situ Bored Piles) หมายถึงเสาเข็มที่ผลิตขึ้นโดยมีหลักการง่ายๆ ที่ Tomlinson (1994) กล่าวไว้คือทำการขุดเจาะดินให้ได้ขนาดความกว้าง, ความลึกตามที่ออกแบบไว้ แล้วทำการเทคอนกรีตลงไปในรูที่เจาะไว้ล่วงหน้าให้เต็ม หลักการดังกล่าวมาข้างต้นค่อนข้างจะดูง่าย แต่การปฏิบัติในสนามมีความยุ่งยากด้วยขั้นตอนที่ต้องทำตามลำดับ หากทำงานลัดขั้นตอนหรือชำนาญไม่เพียงพอ อาจจะทำให้เสาเข็มมีความสมบูรณ์ (Integrity) ไม่เพียงพอและการรับน้ำหนัก (Load Carrying Capacity) ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ บทความนี้จะกล่าวถึงการก่อสร้างและวิธีควบคุมที่สำคัญที่ไม่สามารถตัดออกได้และหากก่อ

สร้างลัดขั้นตอนแล้วจะเกิดความเสียหายต่อสมรรถนะด้านความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ผลิตเสร็จแล้ว

2. เสาเข็มระบบเจาะเปียกและชั้นดินกรุงเทพ

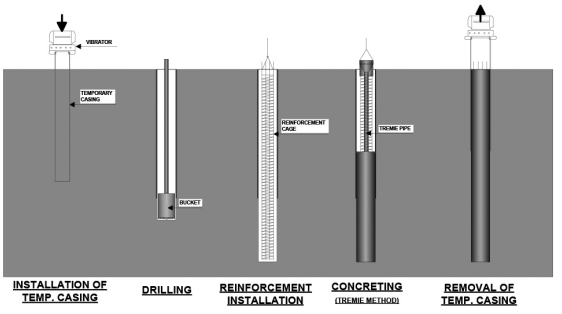
เสาเข็มระบบเจาะเปียกในกรุงเทพได้นำมาใช้กันมากกว่า 20 ปีแล้ว ขนาดเสาเข็มที่ใช้กันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 80 ซม. ถึง 150 ซม. ปลายเสาเข็มลึกประมาณ 60 เมตรซึ่งเป็นความลึกปกติที่ออกแบบกันอย่างแพร่หลาย ที่ราบลุ่มกรุงเทพฯโดยทั่วไปประกอบด้วยดินทรายที่ถูกน้ำพัดพามาตกตะกอนเมื่อยุคที่ 4 ของประวัติศาสตร์โลก เป็นตะกอนดินและตะกอนทรายสลับกันไปมาเป็นชั้นๆ จนถึงความลึกอย่างน้อย 550 เมตรจึงจะพบชั้นหิน รูปที่ 1 แสดงชั้นดินกรุงเทพฯโดยสังเขปถึงความลึกประมาณ 60 เมตร ดินชั้นบนสุด 2-3 เมตรแรกจะเป็นดินแตกระแหง(Weathered Crust) คลุมชั้นดินอ่อนไว้ และต่ำจากนั้นลงมาจะเป็นชั้นดินอ่อนกรุงเทพฯ ถึงระดับประมาณ 12 เมตรและค่อยๆเปลี่ยนสภาพเป็นดินอ่อนปานกลาง (Medium Clay) ถึงระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตรและต่อด้วยชั้นดินแข็งส่วนชั้นทรายชั้นแรกมีความหนาประมาณ 5-10 เมตร จะพบที่ความลึกประมาณ 25 ถึง 30 เมตร ต่ำจากชั้นทรายชั้นแรกลงไปจะเป็นชั้นดินแข็งและชั้นทรายแน่นสลับกันไปมา แรงดันน้ำใต้ดิน (Actual Pore Pressure) ในชั้นดินอ่อนมีสภาพเป็น Hydrostatic Pressure และค่อยๆ เปลี่ยนเป็น Piezometric Drawn Down ที่ใกล้ระดับล่างของชั้นดินอ่อน (รูปที่ 1) จากผลของ Piezometric Drawn Down ทำให้ Effective Overburden Pressure ในชั้นทรายชั้นแรกและในชั้นถัดๆไปเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 20 ตันต่อตารางเมตร แรงดันน้ำที่ลดลงในชั้นทราย (Depressurization of Sand Layers) เกิดขึ้นเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้



รูปที่ 1 รูปตัดแสดงชั้นดินกรุงเทพ และ Piezometric drawdown

3. วิธีการก่อสร้าง

โดยทั่วไปเสาเข็มระบบเจาะเปียกจะใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ช่วยป้องกันไม่ให้หลุมเจาะพังทลาย การเจาะจะใช้เครื่องเจาะระบบ Rotary ติดสว่าน (Auger) และถังขุดเจาะ (Bucket) ในชั้นดินอ่อนชั้นแรกจะใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวป้องกันการพังทลาย ส่วนชั้นที่ลึกลงไปต่ำกว่าระดับปลอกเหล็กจะใช้แรงดันของสารละลายเบ็นโทไนท์ด้านผนังรูเจาะไม่ให้พังทลายหรือบีบตัว เมื่อขุดเจาะแล้วเสร็จต้องทำความสะอาดหลุมเจาะโดยการใช้ Cleaning Bucket หรือใช้วิธีทำความสะอาดสารละลายเบ็นโทไนท์แบบ Recycle แล้วจึงลงเหล็กเสริม แล้วทำการเทคอนกรีตผ่านท่อเทใต้น้ำ (Tremie Pipe) รูปที่ 2 เป็นขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขป การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกลึก 60 เมตรจะใช้เวลาประมาณ 10-20 ชั่วโมงต่อต้น โดยเวลาดังกล่าวยังไม่รวมเวลาที่อาจเสียไปเนื่องจากปัญหาการจราจร, เครื่องจักรชำรุด หรือจากเหตุอื่นๆ ที่ไม่คาดคิดไว้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียก

4. สารละลายเบ็นโทไนท์ (Bentonite Slurry)

เสาเข็มระบบเจาะเปียกโดยใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ช่วยในการขุดเจาะได้รับการพิสูจน์ว่าได้ผลดีมาแล้วเป็นเวลานาน มีเพียงส่วนน้อยที่เกิดปัญหาและมีคุณภาพต่ำ Hutchinson et al (1974)ได้สรุปไว้ว่าสารละลายเบ็นโทไนท์มีหน้าที่ (Functions) หลายประการคือ (ก) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผนังรูเจาะพังโดยการสร้างแรงดันด้านไว้ (ข) คงอยู่ในหลุมเจาะจนกว่างานก่อสร้างจะเสร็จโดยไม่ไหลซึมหายเข้าไปในชั้นดิน (ค) สามารถลอยแขวนตะกอนดินจากการขุดเจาะไม่ให้ตกทับถมที่ก้นรูเจาะ (ง) สามารถถูกแทนที่โดยคอนกรีตที่เทผ่านท่อเทได้หมดโดยง่าย ซึ่งจะทำให้ได้แรงยึดหน่วงที่ดีระหว่างคอนกรีตผิวเสาเข็มกับผนังรูเจาะ (จ) สามารถแยกเศษดินทรายที่ลอยแขวนออกอยู่ได้ด้วยการร่อนผ่านตะแกรงทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก (ฉ) สามารถปั๊มสูบได้โดยง่าย จะเห็นว่าคุณสมบัติข้อ (ก) ถึง (ค) ต้องการสารละลายที่หนักและเหนียว (Thick slurries) ขณะที่คุณสมบัติข้อ (ง) ถึง ข้อ(จ) ต้องใช้สารละลายที่เบาและไม่เหนียว (Fluid slurries) ดูตารางที่ 1 Reese et al (1985) รายงานว่าสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ดีเลิศดังกล่าวไม่มี แต่สารละลายเบ็นโทไนท์สามารถทำหน้าที่ทุกขั้นตอนอย่างได้ผลนั้นมีความเป็นไปได้ด้วยการควบคุมที่ดี (An Ideal Slurry, therefore, is impossible. However, an effective slurry is possible with control.)

ตารางที่ 1 Slurry specifications

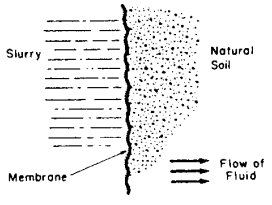
Function of Suspension	Viscosity	Shear Strength	Parameter Density	Fluid Loss	pH
Form filter cake and stabilize bore by hydrostatic pressure application	Moderate to High	Moderate to High	High	Moderate to Low	
Reduce cavitation caused by tool disturbance	High	High	---	Moderate	Low
Minimize loss of fluid in previous strata	High	High	---	---	Low
Minimize loss of fluid in excavation spoil	Low	Low	---	---	---
Prevent accumulation of dense particles at base of excavation prior to concreting	High	High	High	---	---
Ensure free flow of concrete from tremie and easy displacement of bentonite from excavation and reinforcement	Low	Low	Low	---	Low
Allow easy pumping of bentonite fluid	Low	Low	Low	---	---
Prevent sedimentation in pipes and tanks	Moderate	High	High	---	---

4.1. คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์และการตรวจสอบ

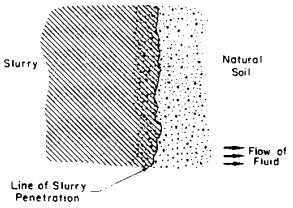
สารละลายเบ็นโทไนท์จากข้อกำหนดหลายประเทศได้แสดงไว้ใน ตารางที่2 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ ผู้ออกแบบจึงเลือกจากมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งในตารางที่ 2 มาใช้ ซึ่งบางมาตรฐานก็ไม่เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ไม่ว่าจะใช้ มาตรฐานใดใน ตารางที่ 2 ก็ต้องทำการผสมและควบคุมคุณสมบัติให้ถูกต้องในทุกขั้นตอน กล่าวคือจะต้องตรวจสอบ Density, March Viscosity, pH Value, Sand Content และ Fluid Loss การผสมสารละลายเบ็นโทไนท์ โดยทั่วไปถ้าใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง 3.5.-6.0% จะได้ค่า Density ระหว่าง1.02-1.04 g/cm^3 สารละลายซึ่งผสมขึ้นครั้งแรกนี้ เมื่อนำไปใช้และนำกลับมาทำความสะอาดเพื่อนำไปใช้ใหม่ ค่า Density จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่สูงกว่า 1.20 g/cm^3 จะต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติใหม่ หรือทิ้งสารละลายชุดนี้ไป

4.2. การจับตัวเป็นก้อนของสารละลายเบนโทไนท์ที่ผนังรูเจาะ

ขณะที่สารละลายเบนโทไนท์สร้างแรงดันด้านไม่ให้รูเจาะพังอยู่นั้นจะมีบางส่วนของสารละลายเบนโทไนท์แทรกซึมเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายในชั้นดินทรายและเหลือเนื้อเบ็นโทไนท์จากสารละลายจับตัวกันเป็นก้อน (Filter Cake) ที่ผนังรูเจาะ การก่อตัวและความหนาของ Filter Cake รูปที่ 3 และ รูปที่ 4 จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาเมื่อปริมาณน้ำหายเข้าไปในดินมากขึ้น Filter Cake ก็จะหนามากขึ้นด้วย หากไม่สามารถขจัดออกได้ในขั้นตอนการเทคอนกรีต ก็จะทำให้ค่าแรงฝืดระหว่างผิวเสาเข็มและผนังรูเจาะลดลง Surface Filtration จะเกิดที่ผิวดินก่อนและแทรกซึมต่อเนื่องเข้าไปอุดช่องว่างในชั้นดินที่ลึกเข้าไปหนา



รูปที่ 3 Surface Filtration (Reese et al, 1985)



รูปที่ 4 Deep Filtration (Reese et al, 1985)

หลายมิลลิเมตรหรืออาจถึงหลายเมตรเรียกว่า Deep Filtration หลังจากเสร็จสิ้นการเจาะแล้วสารละลายในรูเจาะต้องได้รับการทำความสะอาดเพื่อขจัด Filter Cake ที่ผนังรูเจาะและทดสอบคุณสมบัติของสารละลายที่เก็บจากก้นหลุมก่อนเทคอนกรีต Wates & Knight (1975) สรุปการจากงานวิจัยว่า หากปล่อยให้สารละลายเบ็นโทไนท์อยู่นิ่งๆ โดยไม่ถูกรบกวน (Non Agitation) เป็นเวลานาน Filter Cake จะก่อตัวที่ผนังรูเจาะหนา และมาตรฐาน ACI336.1.94 แนะนำว่าไม่ควรปล่อยให้สารละลายในรูเจาะอยู่นิ่ง ๆ โดยไม่มีการกวน (Non Agitation) นานเกินกว่า 4 ชั่วโมง หากเวลาระหว่างการขุดเจาะแล้วเสร็จจนถึงเวลาเริ่มเทคอนกรีตนานเกิน 24 ชั่วโมง ต้องทำการขุดคว้านรูเจาะใหม่เพื่อให้ Filter Cake หลุดออก แล้วทำความสะอาดสารละลายและทดสอบสารละลายที่ก้นหลุมใหม่อีกครั้งก่อนทำการเทคอนกรีตจึงจะได้แรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มกับผิวรูเจาะที่ดี

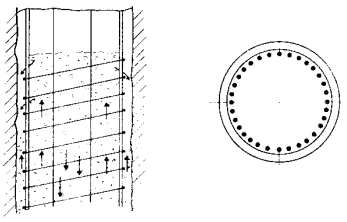
5. เหล็กเสริมเสาเข็ม

ปริมาณเหล็กเสริมในเสาเข็มขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรากกล่าวคือหากรับแรงกดอย่างเดียว เหล็กเสริมยืนจะใช้ประมาณ 0.5% ของหน้าตัดเสาเข็ม หากต้องรับโมเมนท์ดัด หรือแรงดันด้านข้าง ปริมาณเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับการคำนวณ อย่างไรก็ดีปริมาณเหล็กเสริมยืนไม่ควรมีปริมาณเกิน 1% ของหน้าตัดเสาเข็มเพราะหากปริมาณมากเกินไป เมื่อเทคอนกรีตได้น้ำผ่านท่อเทคอนกรีตอาจไหลผ่านเหล็กเสริมยืนออกไปไม่ได้ ทำให้เหล็กเสริมไม่มีคอนกรีตหุ้ม (รูปที่ 5)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ที่รวบรวมมาจากแหล่งต่าง ๆ

Authors	FPS (1975, 1977)	Hutchingson et al. (1975)	FDOT (1987, 1988)	Reese and O' Neil (1988)	ICE (1988)	ACI (1989)	*AASHTO (1992)	*Majano & O' Neil (1993)	*ICE & FPS (1996)
Slurry Type	Bentonite	Calcium Bentonite	Bentonite or Attapulgite	Bentonite or Attapulgite	Bentonite	Bentonite or Polymer	Bentonite or Attapulgite	Bentonite	Bentonite
Density (gm/cc)	<1.10	1.024 to 1.218	1.03 to 1.20	1.03 to 1.20	<1.10	<1.36 (bearing pile) <1.12 (firction pile) <1.02 (Polymer)	1.03 to 1.10 1.03 to 1.20	1.02 to 1.07 1.02 to 1.13	<1.10 <1.15
pH	9.5 to 12	<11.7	8 to 12	8 to 11	9.5 to 12	8 to 12	8 to 11 8 to 11	8 to 10 8 to 10	9.5 to 10.8 9.5 to 11.7
Sand Content	<6% (by weight)	<35% (by weight)	<4% (by volume)	-	-	<4% (bearing pile) <25% (friction pile) <1% (Polymer)	<4% <4% (by volume)	<4 % <10%	<2% <2%
Marsh Funnel Viscosity (sec/Qt)	30 to 90	-	28 to 40	28 to 45	30 to 90	26 to 50	28 to 45 28 to 45	32 to 60 32 to 60	30 to 70 < 90
Plastic Viscosity (cP)	<20	<20	<20	-	<20	-	-	6 to 8.5 6 to 10.0	-
Yield Point (Pa)	-	-	-	-	-	-	-	2 to 6.0 2 to 6.5	-
10 min. Gel Strength (Pa)	4 to 40	3.6 to 20	1.9 to 10	-	4 to 40	-	-	-	4 to 40 4 to 40
Differential Head (m)	>1	-	-	-	-	1.5	-	-	-
Fluid Loss (30 minute test)	-	-	-	-	-	-	-	-	< 40 <60
**Maximum Contact Time (hr.)	-	-	-	-	-	-	-	4	-

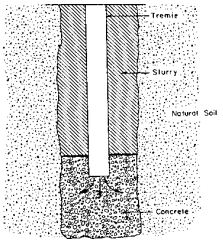
Notes : * Upper line for as supplied to pile and lower line for sample from pile prior to placing concrete
** Without agitation and sidewall cleaning



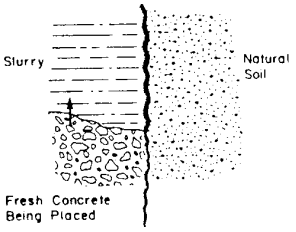
รูปที่ 5 เหล็กเสริมที่มีปริมาณมากเกินไป
(Flemming et al, 1977)

6. คอนกรีตในงานเสาเข็มเจาะ

การรับน้ำหนักของเสาเข็มน้ำหนักจะถ่ายลงโดยตรงที่หัวเสาเข็มก่อนแล้วจึงถ่ายต่อไปสู่ดินในรูปของแรงเสียดทานที่กระทำต่อผิวของเสาเข็ม และแรงที่เหลือจากแรงเสียดทานจะถ่ายไปที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นคุณภาพคอนกรีตตัวเสาเข็มต้องดี และรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย คอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกเป็นการเทผ่านท่อเท (Tremie Pipe) ไม่สามารถจะจี้ให้ไหลหรือทำให้แน่นโดยเครื่องจี้ได้ คอนกรีตสด (Fresh Concrete) จะไหลออกจากปลายท่อเทแทนที่สารละลายเบ็นโทไนท์โดย Gravity Action เท่านั้นและคอนกรีตจะไหลแทนที่สารละลายเบ็นโทไนท์ได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับผลต่าง Density ของคอนกรีตกับสารละลายเบ็นโทไนท์ซึ่งมีอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 1.80 ถึง 2.01 การไหลและความสามารถแทนที่สารละลายเบ็นโทไนท์ของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับ Flowable และ Workability ของคอนกรีตสด ดังนั้นการเลือกส่วนผสม (Mixed Design) นอกเหนือจาก Strength แล้ว ยังต้องพิจารณาเรื่อง Workability และระยะเวลาหน่วงการแข็งตัว (Retardation Time) ด้วยสำหรับคอนกรีตที่เทแล้วไหลแทนที่สารละลายเบ็นโทไนท์ได้สมบูรณ์นั้น ต้องออกแบบส่วนผสมให้มีคุณสมบัติหลักดังนี้คือ เป็น Flowable Concrete และมีสภาพเป็น Plastic Concrete โดยสม่ำเสมอ โดยมี Initial Shear Strength ของคอนกรีตไม่สูงเกินไปเพื่อป้องกันการไหลไม่ทั่วถึง และคอนกรีตต้องเป็นชนิด Self Compaction Concrete,คอนกรีตต้องยึดเกาะกันดี (Cohesive Concrete) ไม่แยกตัว (Segregation) ในระหว่างการเท และไม่มีน้ำส่วนเกินเยิ้ม (Bleeding) ออกจากคอนกรีต เพราะการเกิด Bleeding ทำให้เกิดการแยกตัว (Disintregate) และเกิดโพรง (Void), ระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มเหนียวหนืดหรือเริ่มก่อตัว (Stiffen or Set) ต้องมีเวลานานพอเหมาะกับรปริมาณคอนกรีตที่เทและคอนกรีตต้องคงสภาพ Workability ให้เทได้ตลอดเวลาจนกว่าการเทจะเสร็จสิ้น จากคุณสมบัติข้างต้นจะทำให้คอนกรีตแทนที่สารละลายฯได้โดยสมบูรณ์ Xanthakos (1994) ได้ศึกษาและรายงานว่าคอนกรีตที่ยังเหลวและมี Workability ดีเมื่อเทผ่านท่อเทอย่างถูกวิธีระดับของคอนกรีตในหลุมเจาะที่สูงเพิ่มขึ้นจะครูดเอาเบ็นโทไนท์ที่ก่อตัวเป็นก้อน (Filter Cake) ที่ผนังรูเจาะและที่ผิวเหล็กเสริมออกได้สะอาด (รูปที่ 6ก และ 6ข) อันจะทำให้ค่าความยึดหน่วง (Bond) ระหว่างคอนกรีตกับผนังรูเจาะและระหว่างเหล็กกับคอนกรีตดี มวลหยาบควรเลือกใช้เป็น Round Shape หลีกเลี่ยงการใช้ Flakie Shape เพราะ Flakie Shape จะทำให้ Workability ของคอนกรีตต่ำ นอกจากนั้นควรเพิ่มสาร Admixture ประเภท Plasticizers เพื่อเพิ่ม Workability ตารางที่3 เป็นข้อกำหนดของคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะในกรุงเทพมหานครและใช้ได้ผลดี



รูปที่ 6ก การเทคอนกรีตผ่านท่อ Tremie (Reese et al, 1985)



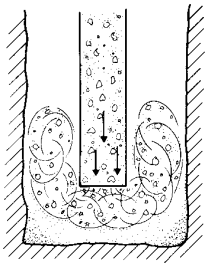
รูปที่ 6ข เทคอนกรีต Tremie อย่างถูกวิธีจะสามารถครูด filter cake ออกได้ (Reese et al, 1985)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะ

Cylinder compressive strength at 28 days	210-280 ksc.
Cement content	Not less than 375 kg/cu.m.
Slump	17.5-22.5 cm.
Retardation time	More than 6 Hrs.
Max. size aggregate	Less than 20 mm.
Water cement ratio	Less than 0.60

7. การทำความสะอาดก้นหลุมและทดสอบสารละลายฯ

การเจาะดินจะมีเศษดินและตะกอนตกสะสมที่ก้นหลุมและสารละลายจะข้นเหนียวไม่เหมาะที่คอนกรีตจะแทนที่ได้หมด จึงต้องทำความสะอาดก้นหลุมอาจใช้ Cleaning Bucket หรือระบบ Recycle (Air Lift) เพื่อแยกตะกอนดินทรายออกจากสารละลายและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่ก้นหลุมขึ้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ขั้นตอนนี้สำคัญเพราะหากก้นหลุมไม่สะอาดหรือสารละลายเหนียวหนักเกินไป คอนกรีตจะไล่แทนที่สารละลายได้ไม่หมด (รูปที่ 7) ทำให้แรงแบกทาน



รูปที่ 7 ก้นหลุมตะกอนหนาคอนกรีตแทนที่ไม่หมด (Flemming et al, 1977)

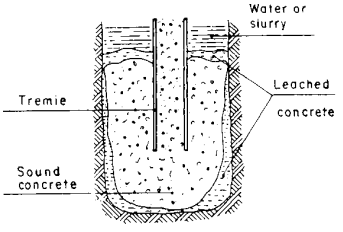
ที่ปลายเสาแข็งสูงหรือยอมให้เกิด Soft toe ก็จริงแต่ความสะอาดเป็นขั้นตอนสำคัญไม่สามารถลัดขั้นตอนได้ แต่เป็นที่น่าเสียดายและน่าอันตรายที่พบว่ายังมีผู้ประกอบการหลายรายทั้งจากท้องถิ่นและจากต่างประเทศก่อสร้างลัดขั้นตอนโดยละเว้นไม่ปฏิบัติในขั้นตอนนี้ ทำให้เสาเข็มที่ก่อสร้างแล้วมีสมรรถนะในการรับน้ำหนักต่ำกว่าปกติ

8. การควบคุมการเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผ่านท่อเท

การเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผ่านท่อเท (Tremie Concrete) เป็นขั้นตอนที่สำคัญสูงสุดเพราะเป็นการหล่อผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งาน (End Product) หากควบคุมการเทคอนกรีตไม่ดีและผิดขั้นตอนจะทำให้ความสมบูรณ์ (Integrity) ของเสาเข็มเสียหายและสมรรถนะในการรับน้ำหนักลดลง ปัญหาต่างๆ ในการเทคอนกรีตใต้น้ำสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

8.1 เทคอนกรีตรถแรก (First Batch) ทะลุตัวกันน้ำ (Plug) ทำให้คอนกรีตผสมกับสารละลายโดยตรง

8.2 วางปลายท่อห่างจากก้นหลุมมากเกินไป ทำให้คอนกรีตก้นหลุมผสมกับสารละลายเบ็นโทไนท์ (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 ปลายท่อห่างก้นหลุมมากเกินไป (Reese et al, 1985)

8.3 รอยต่อท่อเทรั่ว ทำให้ไหลเข้าสะสมในท่อเท อาจทำให้คอนกรีตในท่อแยกตัว

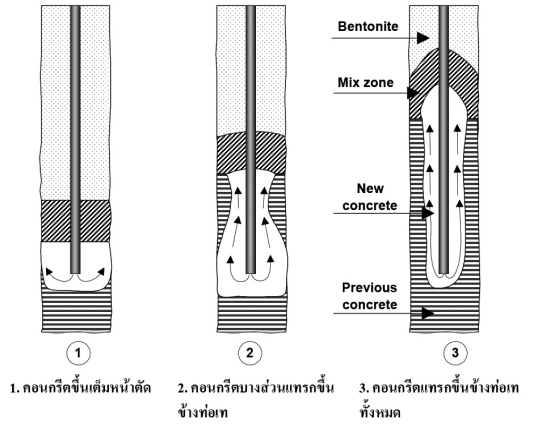
8.4 ไม่มีการทำความสะอาดสารละลายในหลุมเจาะแล้วไม่มีการเก็บตัวอย่างสารละลายที่ก้นหลุมมทดสอบก่อนเทคอนกรีตทำให้ไม่สามารถทราบสถาวะของหลุมเจาะอันอาจทำให้เกิดปัญหาติดตามมาเช่นมีตะกอนกันหลุมมาก, ปริมาณทรายสูง, Filter Cake หนา ฯลฯ ทำให้เสาเข็มด้อยคุณภาพ สมรรถนะในการรับน้ำหนักได้ต่ำ

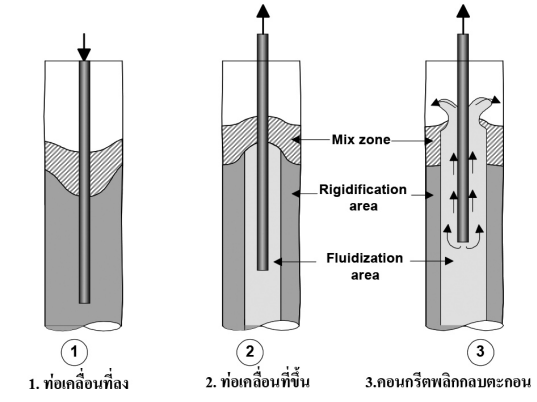
8.5 ระหว่างการเทคอนกรีตฝังปลายท่อในคอนกรีตลึกมากเกินไป ทำให้คอนกรีตที่ไหลออกจากปลายท่อไม่สามารถดันคอนกรีตชุดเก่าขึ้นเติมหน้าตัดรูเจาะ ทำให้คอนกรีตชุดหลังแทรกตัวขึ้นรอบๆ ท่อเทเท่านั้นทำให้ครูด filter cake ไม่ออกและกลบทับสิ่งสกปรกหน้าผิวคอนกรีต (รูปที่9)

8.6 ชักปลายท่อเทพ้นผิวหน้าคอนกรีตทำให้เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง

8.7 ทำการชักท่อเทขึ้นๆ ลงๆ (Jarring) ทำให้สารละลายแทรกลงข้างท่อหรือคอนกรีตพลิกกลับ (รูปที่ 10)

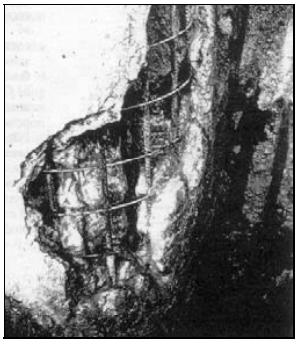
8.8 ตะกอนก้นหลุมมากและผสมกับคอนกรีตทีเทชุดแรกและไล่ตะกอนขึ้นไม่หมด ทำให้กำลังแบกทานปลายเสาเข็มลดลง (รูปที่ 7 และรูปที่ 8)





รูปที่ 10 การชักท่อเทคอนกรีตขึ้น ๆ ลง ๆ เป็นการเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผิดวิธี

8.9 ตะกอนก้นหลุมมาก ผสมกับคอนกรีตที่เทชุดแรกและถูกดันขึ้นมาข้างบนบางส่วนอาจติดค้างโครงเหล็ก (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 โพรงเกิดจากตะกอนดินติดค้างบนโครงเหล็ก

8.10 คอนกรีต Workability ไม่ดี อาจมาจากส่วนผสมผิด, รูปร่างหินแบนมาก, ทำให้เทแล้วไม่ลื่นไหลหรือไหลไม่เต็มหน้าตัดเสาเข็ม ทำให้สารละลายแทรกตัว, คอนกรีตที่มีน้ำส่วนเกินเยิ้มออกมามากทำให้คอนกรีต[illegible]



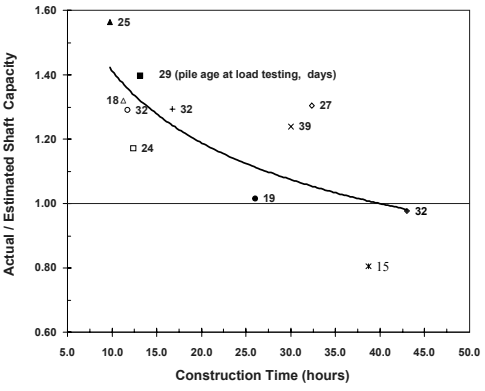
รูปที่ 12 คอนกรีตที่เกิดการแยกตัว

8.11 คอนกรีตมี Slump ต่ำไป ทำให้ Flowability ไม่ดี

8.12 มีระยะเวลาหน่วงการแข็งตัวน้อยไปคอนกรีตเกิดกระด้าง (Stiff) หรือแข็งตัว (Initial Set) ก่อนเทคอนกรีตเสร็จ ทำให้เสาเข็มเสียหาย

9. ผลกระทบอันเนื่องจากเวลาก่อสร้าง

เป็นที่ยอมรับกันว่าหากเวลาในการก่อสร้างเสาเข็มแต่ละต้นสั้นลงมาเท่าใดก็จะได้สมรรถนะของเสาเข็มดีขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในการก่อสร้างต้องเตรียมการให้สามารถก่อสร้างได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว หากมีสาเหตุสุดวิสัยทำให้การก่อสร้างเกิน 24 ชั่วโมง ACI 336.1 94 แนะนำว่าต้องทำการคว้านรูเจาะใหม่และเปลี่ยนถ่ายสารละลายก่อนทำการเทคอนกรีตซึ่งสอดคล้องกับข้อแนะนำของ Fleming et al (1977) ที่เสนอแนะว่าให้ทำการเทคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกให้แล้วเสร็จภายใน 24 ชั่วโมงหลังการขุดเจาะแล้วเสร็จ ข้อเสนอแนะข้างต้นนี้มีเหตุผลเพราะในขณะทำการขุดเจาะสารละลายเบ็นโทไนท์จะถูกรบกวน (Agitated) ตลอดเวลา ทำให้ Filter Cake ก่อตัวช้าและน้อย หลังการขุดเจาะหรือ Recycle แล้วเสร็จ Filter Cake จะเริ่มก่อตัวมากเนื่องจากสารละลายจะอยู่นิ่ง ๆ



รูปที่ 13 Effect of construction time on shaft capacity of bored piles. (Thasnanipan et al, 1998)

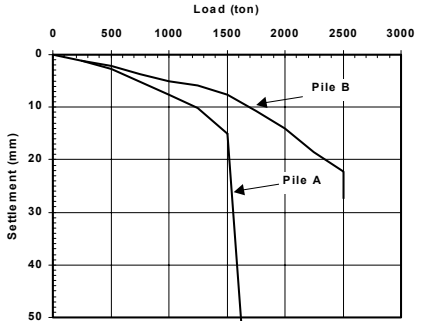
ในรูปที่13 เป็นงานวิจัยที่ผู้เขียนและคณะ (Thasnanipan et al, 1998) ได้ทำการศึกษาจากผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 11 ต้นที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงในตัวเข็ม (Fully Instrumented Piles) ในชั้นดินกรุงเทพฯ พบว่าสมรรถนะการรับแรงเสียดทานผิว (Shaft Friction Capacity) ของเสาเข็มระบบเจาะเปียกจะค่อยๆลดลงเมื่อใช้เวลาที่ก่อสร้างเพิ่มยาวขึ้น

10. เสาเข็มที่มีสมรรถนะต่ำ

เสาเข็มที่มีสมรรถนะต่ำแยกเป็น 2 ประเภทคือ (ก) รับน้ำหนักได้ต่ำและ (ข) สภาพตัวเสาเข็มไม่สมบูรณ์ ซึ่งกรณีหลังนี้อาจรับน้ำหนักได้ต่ำด้วย

10.1. เสาเข็มที่รับน้ำหนักได้ต่ำ (Low Carrying Load Capacity)

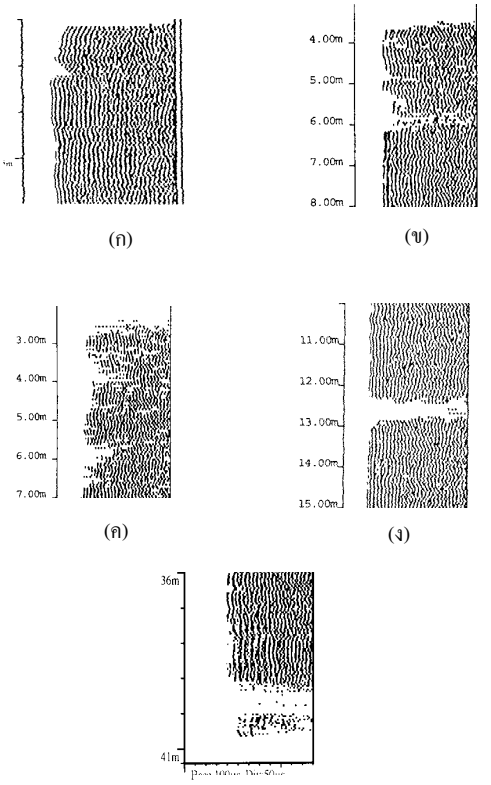
ส่วนใหญ่เกิดจากไม่ทำการทดสอบสารละลายก้นหลุมก่อนเทคอนกรีต, ก้นหลุมไม่สะอาด, ไม่ทำความสะอาดสารละลาย และปล่อยสารละลายอยู่นิ่งๆ นานเกินไปจน Filter Cake ก่อตัวหนาที่ผนังรูเจาะ ในโครงการหนึ่ง ผู้ประกอบการเสาเข็มรายแรก ได้ก่อสร้างเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. ลึก 60.00 ม. (Pile A) เมื่อทำการทดสอบรับน้ำหนักสูงสุดได้เพียง 1,500 ตัน และมีค่าทรุดตัว 50 มม. ซึ่งกำลังรับน้ำหนักที่ทดสอบได้ต่ำมากเมื่อเทียบกับการคำนวณจากข้อมูลผลการสำรวจดิน ต่อมาผู้ประกอบการรายที่สอง ได้รับมอบหมายให้เข้าทำเสาเข็มแทนผู้ประกอบการรายแรก จึงทำเข็มทดสอบกลุ่มใหม่ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 ม. แต่ลึกเพียง 55 ม. พร้อมอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย ทดสอบจนน้ำหนักบรรทุกถึง 2500 ตัน ค่าทรุดตัวเพียง 28 มิลลิเมตร (Pile B) ตามรูปที่14 ซึ่งต่อมาทราบว่า Pile A ไม่ได้ทำความสะอาดก้นหลุม, ไม่ทำความสะอาดสารละลาย และปล่อยให้สารละลายอยู่นิ่งๆ กว่า 20 ชั่วโมงและไม่มีข้อมูลสารละลายที่ก้นหลุมก่อนการเทคอนกรีต



รูปที่ 14 Load settlement curve ของ pile A และ pile B

10.2. สภาพเสาเข็มไม่สมบูรณ์ (Poor Integrity Piles)

ส่วนใหญ่จะเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ คือ ไม่ทำความสะอาดก้นหลุม, ไม่ทำความสะอาดสารละลาย, ส่วนผสมคอนกรีตไม่ดี, เทคอนกรีตใต้น้ำผิดวิธี คอนกรีตรถแรกเทท่ะลุ ซึ่งความไม่สมบูรณ์นี้จะตรวจพบได้จากการทดสอบด้วย Sonic Logging Test ตามที่ภัคพงศ์ และ คณะ (2542) ได้ทำการวิจัยไว้ ดังตัวอย่างรูปที่15(ก) ถึงรูปที่ 15(จ)



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูป (ก) พบก้อนดินขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ที่บริเวณหัวเสาเข็ม

รูป (ข) พบคอนกรีตเป็นปูนทรายบริเวณหัวเสาเข็ม เนื่องจากคอนกรีตเกิดการเยิ้ม (bleeding)

รูป (ค) พบคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ มีสารละลายเบ็นโทไนท์ปนที่บริเวณหัวเสาเข็ม

รูป (ง) พบตะกอนดินเป็นบริเวณกว้างในเนื้อคอนกรีตที่ระดับ 12.5 ถึง 13 เมตร

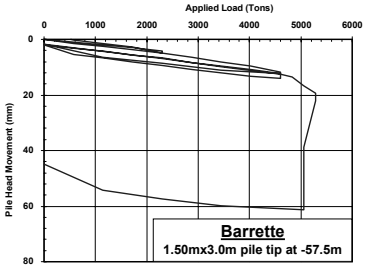
รูป (จ) พบคอนกรีตที่ปลายเสาเข็มแยกตัวและผสมกับสารละลาย

รูปที่ 15 ความไม่สมบูรณ์ของเสาเข็มจาก Sonic logging test (ภัคพงศ์ และคณะ 2542)

11. เสาเข็มที่มีสมรรถนะสูง (Pile with High Performance)

เสาเข็มเจาะแบบเปียกไม่ว่าจะเจาะเป็นรูปทรงกลมหรือ รูปทรงเหลี่ยม (Barrette) ถ้าทำการก่อสร้างตามขั้นตอนอย่างถูกวิธีแล้ว จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างเช่น เสาเข็ม

เจาะรูปเหลี่ยมขนาด 1.50x3.00เมตร เจาะลึก 57 เมตรในชั้นดินกรุงเทพ รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 2,000ตัน ใช้เวลาก่อสร้างนาน 75 ชั่วโมงแต่มีการทำความสะอาดหลุมเจาะและทดสอบสารละลายฯที่ก้นหลุมก่อนการเทคอนกรีตอย่างเป็นขั้นตอน สามารถรับน้ำหนักทดสอบได้สูงสุดถึง 5,290 ตัน (Thasnanipan et al 1999) รูปที่16



รูปที่ 16 ผลทดสอบการรับน้ำหนักของ barrette

12. บทสรุป (Conclusions)

การเจาะและหล่อคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกไม่สามารถควบคุมคุณภาพได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากเป็นการทำงานภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ สมรรถนะของเสาเข็มชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับความรู้เรื่องวิศวกรรมปฐพี, ความรู้เรื่องคุณสมบัติของเบนโทไนท์, เรื่องคอนกรีตเทคโนโลยี และความชำนาญงานของผู้รับเหมาอย่างแท้จริง และเสาเข็มระบบนี้เป็นระบบที่ดีสำหรับโครงสร้างสมัยใหม่ซึ่งอาจจะยังไม่มีระบบใดมาแทนที่ได้โดยง่าย ปัจจุบันมีผู้ประกอบการมากรายและมีมาตรฐานการผลิตเสาเข็มชนิดนี้แตกต่างกันหลากหลายระดับ เพื่อยกระดับการผลิตของผู้ประกอบการในประเทศไทยให้มีมาตรฐานเดียวกันเพื่อทำให้เสาเข็มมีคุณภาพและสมรรถนะในการรับน้ำหนักได้สูงทัดเทียมกันนั้น องค์กรของรัฐ, สถาบันทางวิชาการ และผู้ชำนาญการควรจะร่วมมือกันร่างข้อกำหนดและมาตรฐานเพื่อใช้เป็นมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยและ ให้ทัดเทียมกับนานาประเทศ

13. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ร่วมงานบริษัท ซีฟโก้ จำกัด ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการ พิมพ์ และจัดเรียงหน้าสำหรับบทความนี้

14. เอกสารอ้างอิง

1. AASHO (1992), Standard and specification for highway bridges.
2. ACI (1994), Standard specification for end bearing drilled piers, (ACI 336.1)
3. ADSC (1995) Standard and specification for the foundation drilling industry. (Incorporating ACI 336.1 94)
4. ADSC and DFI (1989), Drill shaft inspector's manual.
5. British Standard Institution, BS8004: Code of practice for foundation, BSI London.
6. Flemming, W. G. K. and Sliwinski, Z. J. (1977), The use and influence of bentonite in bored pile construction, CIRIA report PG3.
7. Hutchinson, M. T. , Daw, G. P., Shotton, P.G. and James, A. N. (1975), The properties of bentonite slurries used in diaphragm walling and their control., Diaphragm Walls and Anchorages, ICE, London, pp.33-39.
8. Reese, L. C. and Tucker, K. L. (1985), Bentonite slurry in constructing drilled piers, Drilled piers and caisson II, ASCE convention., Denver, Colorado, USA.
9. Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. (1974), Practical consideration affecting the performance of diaphragm walls, Proceedings of the conference on diaphragm wall and anchorage, ICE, London.
10. Thasnanipan N., Baskaran G. & Anwar, M. A (1998), Effect of construction time and bentonite viscosity on shaft capacity of bored piles, 3rd Intl. Geotechnical seminar on deep foundations on bored and auger piles, Ghent, Belgium, Balkema, pp. 171-177.
11. Thasnanipan N., Anwar M.A., Muang, A.W. & Tansengs, P. (1999), Performance comparison of bored and excavated piles in the layered soils of Bangkok., Symposium on Innovative solutions in structural and geotechnical engineering, In honor of professor Seng Lip Lee, AIT, Bangkok., Thailand, pp. 345-353.
12. The Institution of Civil Engineers, ICE (1996), Specification for piling and Embedded Retaining wall (1996) Thomas Telford. London.
13. Tomlinson, M. J. (1994), Pile design and construction practice (4th edition), E & FN Spon.
14. Wates, J. A. and Knight. K. (1975), The effect of bentonite on the skin friction in cast in place piles and diaphragm walls, Proc. of 6th regional conf. For Africa on soil mechanics and foundation engineering, Dorhan, South Africa, pp. 183 –188.
15. Xanthakos, P. P. (1994), Slurry wall as structural systems 2nd edition, McGraw-Hill, Inc.
16. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2524), การตรวจสอบคุณสมบัติในสนามของสารละลายเบ็นโทไนท์ ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่, เอกสารวิชาการเล่มที่ 1, วสท., หน้า 63 ถึง 70
17. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2540), ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพ ในปัจจุบัน, การสัมนาทางวิชาการเรื่องฐานราก 40, จัดโดย ว.ส.ท., ณ. โรงแรมเซ็นทรัลพลาซ่า,ลาดพร้าว, หน้า 1-26
18. ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, จรุง หิรัญอ่อน และ สมบูรณ์ พิมสาร (2542), การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะลึกมากก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพ โดยวิธี Sonic Logging และการแปลคลื่นสัญญาณ, การประชุมใหญ่ทางวิชาการ 2542, จัดโดย วสท.

อันตรายและมาตรการความปลอดภัยในงานเสาเข็มเจาะ

(Hazards & Safety In Bored Piling Works)

สิทธิพล สุรอังกูร, สุเมธ ประเวศวารัตน์และตุลา นพพันธ์

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

61/141 ถนนพระราม 9 ห้วยขวาง กรุงเทพ 10320

โทร 6439561–72, 2472290-4, โทรสาร 2462177

Home page: www.seafco.co.th

E-mail: **seafco@seafco.co.th**

บทคัดย่อ

วิธีและขั้นตอนการทำงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่าง ๆ ได้หลายประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของระบบเข็มเจาะและเครื่องจักรที่ใช้ ในบทความจะกล่าวถึงอันตรายและอุบัติเหตุที่พบมากในงานเสาเข็มเจาะและสาเหตุ โดยแบ่งออกตามขั้นตอนในการก่อสร้าง ในตอนท้ายจะกล่าวถึงมาตรการความปลอดภัยในงานเสาเข็มเจาะ และตัวอย่างมาตรการความปลอดภัยในงานดังกล่าว ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในงานได้จริง เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน

Abstract

The methods and sequences of large bored piling constructions can cause several kinds of accidents, depending on the type of pile and the operated equipment. In this article rises up the example accidents, which often break out, and describes their causes follow the sequence of works. In the end the safety plan is discussed and the example of the safety plan for bored piling work is also given. This safety plan can be applied and implemented for bored piling works to provide a safe working environment and prevent the accidents.

1. บทนำ (Introduction)

ในงานก่อสร้างทุกประเภท มักมีอันตรายแอบแฝงไปพร้อมกับความก้าวหน้าของงานเสมอ หากทำงานโดยไม่ระมัดระวังและ ไม่มีการกำหนดมาตรการความปลอดภัยที่เหมาะสม อุบัติเหตุอาจอุบัติขึ้นและก่อความเสียหายทั้งต่อทรัพย์สินและต่อชีวิตได้ โดยเฉพาะงานก่อสร้างที่มีการใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ เช่นงานเสาเข็มเจาะ อันตรายที่แอบแฝงอยู่จะมีมากขึ้น ดังนั้น ผู้เกี่ยวข้องกับงานชนิดนี้จึงต้องได้รับการอบรมและกำหนดมาตรการความปลอดภัยให้ใช้ในการทำงานอย่างเข้มงวดและบังคับใช้อย่างสม่ำเสมอ

2. อันตรายที่เกิดขึ้น แยกตามขั้นตอนของการทำงาน (Specific Hazards in Bored Pilings)

2.1. ระหว่างขนย้ายเครื่องมือจากโรงงานไปหน่วยงาน หรือขนย้ายกลับโรงงาน

ในขั้นตอนนี้อุบัติเหตุที่พบมากจะเกิดขึ้นระหว่างการนำเครื่องจักรขึ้นหรือลงจากรถขนส่ง (Trailer) ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่พบว่าเกิดจากการที่เครื่องจักรมีสภาพไม่สมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น ในขณะที่รถ Crane จะขึ้น Trailer หากระบบเบรกไม่ดี อาจทำให้รถ Crane ลื่นไหลข้ามลงไปอีกฝั่งของ Trailer กระแทกกับพื้นถนนซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเครื่องจักรและถนนได้ และในอีกกรณีอาจเกิดจากการขาดการควบคุมดูแลที่ดี อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ ยกตัวอย่างเช่น การลงจาก Trailer ของรถ Crane โดยปกติจะต้องมีการหมุนเวี่ยงห้องควบคุมขณะลงรถซึ่งถ้ามิได้นำเอา Counter Weight ออก ขณะลงจาก Trailer จะทำให้รถCraneไหลลงอย่างรวดเร็ว และตัวห้องควบคุมของ Crane ก็อาจหมุนเวี่ยงอย่างแรง และควบคุมไม่ได้เนื่องจากถูกถ่วงด้วย Counter Weight โดยส่วนโคนของ Boom อาจฟาดกับสิ่งของหรืออาคารใกล้เคียงได้

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นได้ว่านอกจากจะทำความเสียหายต่อทรัพย์สินแล้ว อาจนำไปสู่การบาดเจ็บถึงชีวิตได้หากมีคนอยู่ในเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถCraneนั้น นอกจากนี้อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในระหว่างการขนย้ายเครื่องมือ อาจมาจากการที่ยึดรั้งเครื่องมือที่ไม่แน่นหนา ทำให้ร่วงหล่นระหว่างการขนย้ายได้

2.2. ระหว่างการประกอบติดตั้งรื้อถอนและซ่อมแซมเครื่องจักร

ในขั้นตอนการประกอบติดตั้ง รื้อถอน และซ่อมแซมเครื่องจักรถือเป็นขั้นตอนที่จะต้องทำด้วยความระมัดระวัง และกระทำโดยบุคลากรผู้มีประสบการณ์ เนื่องจากหากการประกอบติดตั้งเครื่องจักรไม่สมบูรณ์อาจนำมาซึ่งอุบัติเหตุร้ายแรงได้ นอกจากนี้หากการประกอบติดตั้งเครื่องจักรต้องเกี่ยวข้องหรือใกล้ชิดกับชิ้นส่วน

ของเครื่องจักรที่กำลังเคลื่อนที่ หากมีข้อผิดพลาดจากการทำงานที่ไม่ระมัดระวัง หรือสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น มีฝนตกทำให้ลื่นไถลขณะทำงาน อาจทำให้ผู้ที่กำลังทำการประกอบติดตั้งรื้อถอนและซ่อมแซมเครื่องจักร บาดเจ็บถึงขั้นพิการได้

ตัวอย่างของอุบัติเหตุในขั้นตอนนี้ได้แก่

- การติดตั้งสลักของ Boom ของ Crane ไม่ดีอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุขณะยกของหนักได้
- การติดตั้ง Sling ของ Crane หากผู้ติดตั้งไม่ระมัดระวัง อาจถูก Sling หนีบเอาได้
- การรื้อถอนที่ไม่ถูกต้องเช่น การใช้ไฟตัดสลักของ Boom ขณะรื้อถอนจะเป็นการลดความแข็งแรงของเหล็กที่เป็นส่วนประกอบของบูม ซึ่งจะนำไปสู่อุบัติเหตุร้ายแรงได้

2.3. ระหว่างการทำงาน

ในระหว่างการทำงานเสาเข็มเจาะ อุบัติเหตุสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย ซึ่งเริ่มตั้งแต่การวางแผนงานและระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง

ในขั้นตอนการวางแผนงาน หากการวางแผนงานที่ไม่ดีทำให้เกิดอุปสรรค งานล่าช้า และในบางกรณีทำให้ค่าใช้จ่ายเกินงบประมาณที่ตั้งไว้ นำไปสู่การเร่งงาน และทำให้ความระมัดระวังลดถอยลง ซึ่งเป็นผลให้เกิดอุบัติเหตุเพิ่มขึ้นได้บ่อยครั้ง ในต่างประเทศได้มีการศึกษา และพบว่าในโครงการที่กำลังประสบปัญหางานล่าช้าและใช้จ่ายเกินงบประมาณจะมีอัตราการเกิดอุบัติเหตุที่สูงขึ้น [4]

อุบัติเหตุส่วนใหญ่ที่พบในระหว่างขั้นตอนการทำงานเกิดจากการละเลยและไม่ใส่ใจในการทำงาน ความไม่สมบูรณ์ของเครื่องจักรและสภาพแวดล้อมในการทำงาน ซึ่งมักจะนำไปสู่อุบัติเหตุต่างๆได้ในหลายขั้นตอนของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ ดังนี้

2.3.1 ในระหว่างการลงปลอกเหล็ก

ส่วนใหญ่ปลอกเหล็กกันดิงพังสำหรับเสาเข็มเจาะใหญ่จะมีความยาวไม่ต่ำกว่า 10 เมตร สิ่งที่ต้องปฏิบัติก่อนการยกปลอกเหล็กลงติดตั้งในหลุม คือ จะต้องทำความสะอาดดินที่ติดอยู่ตามผิวนอกของปลอกเหล็กออกก่อน หากมีเศษดินหินติดอยู่ เมื่อปลอกเหล็กถูกยกและเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Vibro Hammer) เศษดินหินที่ติดอยู่จะหลุดร่วงลงมาจากระดับสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุกับคนหรือทรัพย์สินที่อยู่ใกล้เคียง

2.3.2 ในระหว่างการขุดเจาะ

อุบัติเหตุส่วนใหญ่ที่พบ คือการที่ไม่มีการตรวจสอบลวดสลิงของก้านเจาะอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ในระหว่างการขุดเจาะลวดสลิงที่เก่าและชำรุด อาจขาดและเป็นผลทำให้เครื่องจักรเสียหาย และหากลวดสลิงขาดในขณะที่มีแรงดึงสูงอาจทำให้ปลายลวดสลิงที่ขาดฟาดโดนทรัพย์สินและคนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้

2.3.3 ในระหว่างขั้นตอนการลงเหล็กเสริมของเสาเข็ม

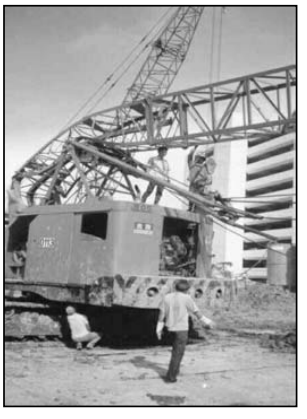
เป็นขั้นตอนที่อาจเกิดอุบัติเหตุได้มาก เนื่องจากโครงเหล็กเสริมมีขนาดใหญ่และมีความยาวมากกว่า 10 เมตรขึ้นไป อุบัติเหตุที่พบบ่อยได้แก่ การมีเศษสิ่งวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นเศษไม้หน้าสาม ท่อนเหล็ก หรือตัวจับเหล็ก (U-grip) ซึ่งอาจค้างอยู่ในโครงเหล็กเสริม ในระหว่างยกโครงเหล็กตั้งขึ้น สิ่งเหล่านี้อาจจะหลุดและตกลงมาใส่ผู้ปฏิบัติงานหรือทรัพย์สินหรืออาคารใกล้เคียง ซึ่งสามารถทำให้เกิดอันตรายได้เป็นอย่างมาก

2.3.4 ในขั้นตอนการเทคอนกรีต

ในขั้นตอนนี้ ในบางกรณีจะต้องมีการชักท่อ Trimmie ซึ่งใช้ในการเทปูนขึ้นลงบ้าง เพื่อให้ปูนที่อยู่ในท่อไหลลงอย่างสะดวก ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดแรงสั่นสะเทือนกับ Crane ถ้าหากตัวเครื่องจักรไม่สมบูรณ์อาจมีชิ้นส่วนที่ติดตั้งไว้ไม่แน่นหนาหลุดร่วงลงมา จึงต้องมีการตรวจสอบชิ้นส่วนของ Crane อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่ติดอยู่ที่ Boom ของCrane เนื่องจากจะเป็นส่วนที่อยู่สูงในขณะทำงานหากอุปกรณ์ร่วงหล่นจากจุดนี้จะทำให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้

2.3.5 ในการยกสิ่งของระหว่างทำงาน

อุบัติเหตุส่วนใหญ่ที่พบ คือ ลวดสลิงขาด การที่ไม่มีการตรวจสอบ Sling ลวดสลิงที่ขาดฟาดกลับอย่างแรงจนทำให้Boom ของ Crane พับไปด้านหลัง



รูปที่ 1 Sling ที่ขาดฟาดกลับอย่างแรงจนทำให้Boom ของ Crane พับไปด้านหลัง

ตรวจสอบลวดสลิงอย่างสม่ำเสมอ และะเมื่อยกน้ำหนักมากๆ อาจทำให้ ลวดสลิงขาดได้ และลวดสลิงที่ขาดจะฟาดกลับทำให้เกิดความเสียหายต่อทั้งเครื่องจักร และสิ่งที่อยู่ใกล้เคียง ***ดังรูปที่ 1*** จะเห็นว่า ลวดสลิงที่ขาดนั้นฟาดกลับอย่างแรงจนทำให้ Boom ของ Crane พับไปด้านหลัง

2.4. ระหว่างเคลื่อนย้ายเครื่องจักรไปมาในการทำงานที่หน้างาน

อุบัติเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่พร้อมสำหรับการทำงาน และการขาดความเอาใจใส่ของผู้ปฏิบัติงาน สิ่งที่พบบ่อยได้แก่ Crane หรือรถตักดินล้มคว่ำระหว่างการเคลื่อนที่ เนื่องจากรถ Crane ขับเคลื่อนออกนอกแผ่นเหล็กรองรับโดยสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากแสงสว่างไม่เพียงพอและแผ่นเหล็กที่ปูสกปรกทำให้คนขับมองไม่เห็นขอบเขตของแผ่นเหล็ก

นอกจากนั้นหลุมเจาะหลังจากการเทคอนกรีตเสร็จแล้ว หากไม่มีการถมกลับที่ดีก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เครื่องจักรคว่ำได้ถึงแม้จะปูแผ่นเหล็กดีแล้วก็ตาม ***ดังรูปที่ 2 และ 3***



รูปที่ 2 ดินใต้แผ่นเหล็กไม่สามารถรับน้ำหนัก Crane ได้ ทำให้ Crane พลิกคว่ำ



รูปที่ 3 สภาพของห้องควบคุม Crane ที่เสียหาย

นอกจากอุบัติเหตุอย่างที่กล่าวมาแล้วในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะนั้น ยังมีสาเหตุสำคัญอีก สามประการ ที่สามารถทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ซึ่งได้แก่

1. การใช้เครื่องมือผิดประเภท
2. การทำงานในสิ่งแวดล้อมที่ไม่ เหมาะสม
3. การทำงานโดยขาดความรู้ และมีความประมาท ***ดังรูปที่ 4*** จะเห็นว่าคนงานที่ลงไปในหลุมเจาะโดยไม่มีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายอย่างเพียงพอ ซึ่งนับว่า อันตรายมาก



รูปที่ 4 คนงานที่ลงไปในหลุมเจาะโดยไม่มีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายอย่างเพียงพอ ซึ่งนับว่า อันตรายมาก

อุบัติเหตุต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น อาจสรุปได้ว่าเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้เป็นส่วนใหญ่

1. เครื่องเจาะ,รถ Crane ล้มคว่ำ
2. อุปกรณ์บางส่วนของแขนรถ Crane ตกหล่นลงมา
3. การหล่นลงมาของโครงเหล็ก หรือวัสดุอื่นๆ ในขณะที่ Crane กำลังยกของ
4. การสูญเสียกำลังของรถ Crane ระหว่างยกของ ทำให้ของหล่น
5. สาย Hydraulic รั่ว ทำให้สูญเสียกำลัง
6. การผูกยึดของไม่ดีพอในขณะยกของ
7. การสัมผัสกับกระแสไฟฟ้าจาก
   - -สายไฟฟ้าแรงสูง
   - -การสัมผัสกับชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้า
8. การกระทบกระเทือนต่อสาธารณูปโภค ซึ่งอยู่ใต้ดิน (สายไฟฟ้า, สายโทรศัพท์, ท่อประปา)
9. ความเสียหายของชิ้นส่วนของเครื่องจักร
10. ไม่มีการป้องกันชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เคลื่อนไหวได้
11. ไม่มีการป้องกันการสัมผัสกับส่วนที่มีความร้อนของชิ้นส่วนเครื่องจักร
12. ความไม่มีเสถียรภาพของชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือสิ่งของที่ยก

13. การสะบัดของลวดสลิง
14. ก๊าซ หรือของเหลวที่มีความดันสูง
15. เสียงที่มีความดังมาก
16. การสั่นสะเทือน
17. ช่องทางจราจรที่ลื่นและไม่ปลอดภัยสำหรับยานพาหนะ
18. คนตกลงจาก Platform หรือบันได
19. การมีระยะห่างปลอดภัยจากเครื่องจักรที่กำลังเคลื่อนที่ ที่ไม่เพียงพอ
20. สภาพแวดล้อมของการทำงานที่ไม่เหมาะสม
    ก) ดินฟ้าอากาศ (ฝนตก, พายุ, ความร้อน)
    ข) สภาพพื้นที่ทำงาน (สกปรก, โคลน)

3. มาตรการความปลอดภัย (Safety Plan)

ดังจะเห็นได้ชัดว่าอันตรายต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะเป็นอันตรายที่เมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะเป็นอันตรายที่ค่อนข้างร้ายแรง ซึ่งก่อความเสียหายต่อทั้งทรัพย์สิน และอาจถึงชีวิตได้ บุคลากรและผู้เกี่ยวข้องกับงานชนิดนี้จึงต้องได้รับการอบรมดูแล อย่างเพียงพอ ทางองค์กรจะต้องกำหนดมาตรการความปลอดภัยในการทำงานและจะต้องกระจายความรู้ดังกล่าวลงไปสู่ผู้ปฏิบัติงานระดับล่าง จนกระทั่งถึงคนงานให้ปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด

ในการจะทำให้มาตรการความปลอดภัยให้ได้ผลนั้น สิ่งสำคัญคือจะต้องมีการตรวจสอบผลของการบังคับใช้มาตรการเป็นระยะๆ ซึ่งมาตรการดังกล่าวอาจมีรายละเอียดแตกต่างไปในแต่ละองค์กร แต่จุดประสงค์หลักคือเพื่อให้มีสภาพการทำงานที่ปลอดภัย

3.1 ตัวอย่างมาตรการความปลอดภัยในงานเสาเข็มเจาะ [3]

3.1.1 ทั่วไป

3.1.1.1. พึงระลึกเสมอว่า 88% ของอุบัติเหตุสามารถป้องกันได้

3.1.1.2. พึงระลึกเสมอว่า ข้อผิดพลาดเล็กน้อย อาจนำไปสู่ความหายนะได้

3.1.1.3. พึงระลึกเสมอว่า ทำงานโดยคำนึงถึงความปลอดภัยอยู่เสมอ

3.1.2 ความปลอดภัยในสิ่งแวดล้อมของการทำงาน

3.1.2.1. ข้อคำนึงถึงในเรื่องความปลอดภัย

1. ความรู้ความสามารถ

ก.อันตรายเกิดได้จากทุกงาน

ข. ระบบรักษาความปลอดภัยมีในทุก อาชีพ

ค. ห้ามเดาขั้นตอนการทำงาน

ง. ห้ามละเลยอันตราย

จ. ความรู้ความเข้าใจในขั้นตอนการปฏิบัติงานเป็นสิ่งที่เป็นหน้าที่ของทุกคนโดยส่วนรวม

- บริษัท - ให้คำแนะนำ, ฝึกฝน และ อบรม
- ส่วนตัว- ทำความเข้าใจและนำไปใช้

2. นิสัยในการทำงาน

ก. อย่าคิดว่าความปลอดภัยจะขึ้นเกิดเอง

ข. ทำงานอย่างมีสติอยู่เสมอ

3. ส่วนตัวของคุณ

ก. ในการทำงาน – ทุกคนต้องระวัง

ข. ต้องมีสติ ตื่นตัว และรอบคอบเสมอ

ค. ไม่ใช้ยาเสพติด หรือเสพสิ่งมึนเมา ระหว่างทำงาน

3.1.2.2. ความปลอดภัยต้องทำเป็นกลุ่ม

3.1.2.3. ทำการแก้ไขโดยทันที หากสังเกตพบสิ่งที่จะนำไปสู่ความไม่ปลอดภัย

3.1.2.4. ไม่ควรคาดว่าอันตรายที่เกิดเป็นสิ่งเล็กน้อย

3.1.3 เริ่มต้นของวัน

3.1.3.1 เริ่มต้นการทำงานด้วยความรอบคอบและระมัดระวัง

3.1.3.2 ผู้ควบคุมงานควรมีรายการตรวจสอบเรื่องความปลอดภัย

1. ตรวจสอบเครื่องมือ – อุปกรณ์
2. ตรวจสอบเครื่องจักร และพื้นที่ทำงาน

ก. ความสะอาด

ข. มีสิ่งคลุมกันความสกปรก

ค. สภาพของเครื่องจักร (ทุกส่วนต้องอยู่ในสภาพที่ดี)

ง. พื้นที่ทำงานแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักเครื่องจักรได้

3.1.3.3. ส่วนผู้ปฏิบัติงานต้องใส่อุปกรณ์ความปลอดภัยเฉพาะตัว ***(ดังรูปที่ 5)***

ก. หมวกแข็ง

ข. ถุงมือ

ค. ป้องกันตา, หู

ง. รองเท้า

จ. เสื้อผ้า



รูปที่ 5 ผู้ปฏิบัติงานต้องใส่ อุปกรณ์ความปลอดภัยเฉพาะตัว

3.1.4 สถานที่ทำงาน

3.1.4.1. การเริ่มต้นในพื้นที่ทำงานใหม่

1. ตรวจสอบความปลอดภัย
   ก. ตรวจสอบสิ่งที่อาจทำให้เกิดอันตรายในสถานที่ทำงาน
      - หากมีสายไฟฟ้าที่พาดผ่าน ควรมีการป้องกัน ***(ดังรูปที่ 6)***



รูปที่ 6 หากมีการทำงานใกล้สายไฟฟ้า ควรมีสัญลักษณ์ที่สังเกตเห็นได้ง่ายเป็นสายไฟฟ้าแรงสูง จะต้องทำการหุ้มฉนวนด้วย

      - สาธารณูปโภคใต้ดิน
      - การจราจร ถ้ามีผลต่อการทำงาน ควรคำนึงถึงความปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานกลางถนน จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ***(ดังรูปที่ 7&8)***
      - พนักงานควรรู้ว่าคนอื่น (เพื่อนร่วมงาน) อยู่ไหน

   ข. เผยแพร่ข้อมูลข้างต้นให้ทราบทั่วกัน

2. สถานที่ทำงาน
   ก. สถานที่ทำงาน จะต้องเป็นระเบียบ
      - ควรจัดให้มีป้ายเตือน และสถิติอุบัติเหตุ ***(ดังรูปที่ 9)***
      - ที่ติดตั้งอุปกรณ์ฉุกเฉิน ควรที่ป้ายแสดงอย่างชัดเจน ***(ดังรูปที่ 10)***



รูปที่ 7 การทำงานกลางถนนจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ



รูปที่ 8 การทำงานกลางถนนจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ



รูปที่ 9 ควรจัดให้มีป้ายเตือน และสถิติอุบัติเหตุในที่ทำงาน



รูปที่10 ที่ติดตั้งอุปกรณ์ฉุกเฉิน ควรมีป้ายแสดงอย่างชัดเจน

3.1.5 การทำงานกับเครื่องจักร

3.1.5.1 ดูสภาพของดิน แน่ใจว่าจะสามารถรับน้ำหนักของเครื่องจักรได้

3.1.5.2 งานจะเริ่มได้ ก็ต่อเมื่อได้รับคำสั่งจากหัวหน้างาน

3.1.5.3 ผู้ปฏิบัติงานต้องออกห่างจากเครื่องจักรในระยะที่ปลอดภัย

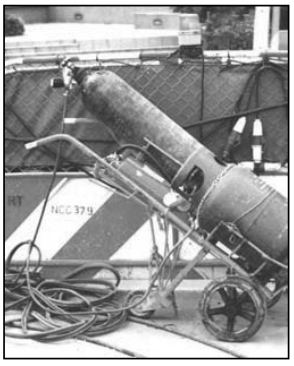
3.1.5.4 ต้องมีการควบคุมเครื่องจักรตลอดเวลา

3.1.5.5 การเคลื่อนเครื่องจักรต้องทำอย่างช้า ๆ และควบ คุมได้

3.1.5.6 ไม่มีการเคลื่อนผ่านเหนือคน

3.1.5.7 ผู้ที่ทำงานอยู่ใกล้เครื่องจักรต้องมีสติ และตื่นตัวตลอดเวลา

3.1.5.8การเชื่อมหรือตัดโลหะด้วยแก๊สจะต้องมีถังดับเพลิงเตรียมพร้อมทุกครั้ง ***(ดังรูปที่ 11)***



รูปที่11 ชุดถังลม และถังแก๊ส จะต้องมีถังดับเพลิงพร้อมใช้งานทุกชุด

3.1.6 เครื่องมือชุดเจาะ

3.1.6.1 ผู้คุมเครื่องต้องอยู่ในตำแหน่งควบคุม และพร้อมในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน

3.1.6.2 การเจาะโดยใช้หัวเจาะแบบสว่าน (Augers)

1. คนงานต้องใส่ถุงมือ และใช้อุปกรณ์ความปลอดภัยเฉพาะตัวอื่นๆ ที่จำเป็น
2. ในการเปลี่ยนฟัน Auger ต้องใช้เครื่องมือให้ถูกต้อง

3.1.6.3. การเจาะโดยใช้หัวเจาะแบบถัง (Buckets)

1. ห้ามหมุนหัวเจาะเพื่อเอาดินออก
2. อย่าอยู่ใกล้บริเวณที่หัวเจาะถ่ายดินออก

3.1.6.4. การเปลี่ยนเครื่องมือ

1. อย่าแหย่นิ้วไปในรูสลักของก้านเจาะ
2. เอามือออกห่างเวลาก้านเจาะยืดออก
3. ใส่อุปกรณ์ป้องกันสลักเลื่อนหลุด สำหรับสลักทุกตัว

3.1.7 สารละลายที่ใช้เจาะ และ การเทคอนกรีต

3.1.7.1. สารละลายที่ใช้เจาะ

1. อย่าให้หกตกหล่นบริเวณปากหลุมเจาะและปากหลุมต้องสะอาดอยู่เสมอ ***(ดังรูปที่ 12)***
2. ระวังลื่น



รูปที่ 12 อย่าให้สารละลายที่ใช้เจาะหกตกหล่นปากหลุมเจาะควรดูแลให้สะอาดอยู่เสมอ

3.1.7.2. การเทคอนกรีต

1. ใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ในการเทคอนกรีต
2. ต้องใส่ถุงมือขณะทำงาน
3. ตรวจอุปกรณ์ที่ใช้ก่อนการเทคอนกรีตทุกครั้ง อุปกรณ์ต่างๆ ต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์

3.1.8 การยก

3.1.8.1 ต้องแน่ใจว่าลวดสลิงที่ใช้ยกแข็งแรงพอ และอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ***(ดังรูปที่ 9)***

3.1.8.2 การยกหัวเจาะต้องยกจากด้านไกลจากตัวรถ Crane เสมอ

3.1.8.3 ก่อนการยกสิ่งของต้องแน่ใจว่าสิ่งของนั้นได้ถูกยึดอย่างมั่นคง

3.1.8.4 ใช้เชือกโยงกับสิ่งที่ถูกยก เพื่อช่วยในการบังคับทิศทางขณะยก ***(ดังรูปที่ 14)***

3.1.8.5 ขณะยกต้องมีการให้สัญญาณกับผู้ที่อยู่ในบริเวณ

3.1.8.6 ผู้ให้สัญญาณในการยกต้องเป็นผู้ที่มีประสบการณ์

3.1.8.7 ห้ามเคลื่อนย้ายของข้ามหัวคน

3.1.8.8 การยกต้องใช้อุปกรณ์ที่ถูกต้อง



รูปที่ 13 การยกต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์ ที่ใช้ยกแข็งแรงพอ



รูปที่ 14 ใช้เชือกโยงกับสิ่งที่ถูกยก เพื่อช่วยในการบังคับทิศทางขณะยก

3.1.9. การลงในหลุมเจาะ

3.1.9.1 หลีกเลี่ยงการลงในหลุมเจาะในขณะที่หลุมยังเปิดอยู่

3.1.9.2 ถ้าจำเป็นควรตรวจสอบหลุมเจาะก่อนลง

1. ตรวจสอบก๊าซพิษ
2. ใช้เครื่องเป่าอากาศ(Air Blower) เพื่อระบายอากาศในหลุม ***(ดังรูปที่ 15)***
3. ป้องกันหลุมเจาะพังโดยใช้ Casing
4. ทำความสะอาดบริเวณปากหลุมเจาะ
5. ห้ามใช้ปั๊มไฟฟ้าขณะมีคนในหลุมเจาะ



รูปที่ 15 การใช้เครื่องเป่าอากาศ(Air Blower)

3.1.9.3. การลงในหลุมเจาะควรมี

1. หมวกแข็ง, ถุงมือ และที่ป้องกันตา
2. การหย่อนคนลงในหลุมเจาะต้องควบคุมโดยผู้ที่มีประสบการณ์ ***(ดังรูปที่ 16 &17)***
3. ผู้ที่ลงในหลุมเจาะต้องใช้เข็มขัดนิรภัย



รูปที่ 16 การหย่อนคนจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง และควบคุมโดยผู้มีประสบการณ์



รูปที่ 17 การหย่อนคนจะต้องทำด้วยความระมัดระวังและควบคุมโดยผู้มีประสบการณ์

4. ต้องมีการติดต่อกันตลอดเวลาระหว่างผู้ที่อยู่ในหลุมเจาะกับผู้ที่อยู่ด้านบน
5. การหย่อนสิ่งของหรืออุปกรณ์ให้กับผู้ที่อยู่ในหลุมเจาะต้องทำอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษ

3.1.10 การป้องกันอันตรายจากหลุมเจาะ ที่เปิดอยู่

3.1.10.1 ห้ามปล่อยทิ้งหลุมเจาะไว้ โดยไม่มีการป้องกัน

3.1.10.2 ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม

3.1.10.3 การป้องกันอาจทำได้หลายวิธี

1. ใช้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่รับน้ำหนักได้มากๆ ปิดคลุมหลุมเจาะ
2. ติดตั้งราวกันตกที่มีความสูงเพียงพอรอบปากหลุมเจาะ
3. หากจำเป็น ต้องมีคนคอยเฝ้าอยู่หน้าหลุม

3.1.10.4 วิธีการเลือกการป้องกันหลุมเจาะต้องคำนึงถึงสภาพหน้างานเป็นสำคัญ

3.1.10.5 ในเวลากลางคืนจะต้องมีการป้องกันหลุมเจาะทุกหลุม

4. <u>บทสรุป</u> (Conclusion)

ความปลอดภัยในการทำงานในงานเสาเข็มเจาะเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงตลอดเวลา เพราะอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีอัตราความรุนแรง และสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินมากกว่าการก่อสร้างประเภทอื่นๆ ซึ่งหากองค์กรสามารถนำเอามาตรการความปลอดภัยมาใช้จนสัมฤทธิ์ผลแล้ว จะเป็นประโยชน์ทั้งในด้านค่าใช้จ่าย และยังเป็นการสร้างชื่อเสียงให้กับองค์กรนั้นๆ ในด้านการทำงานโดยปราศจากอุบัติเหตุ

พึงระลึกเสมอว่าอุบัติเหตุเป็นสิ่งที่ป้องกันได้ โดยอาศัยความร่วมมือจากทุกฝ่ายและ ความปลอดภัยต้องมาก่อนสิ่งอื่น

5. <u>กิตติกรรมประกาศ</u> (Acknowledgement)

คณะผู้เขียนขอบคุณ คุณณรงค์ ทัศนนิพันธ์ ที่ให้การสนับสนุนและให้ความรู้ต่อผู้เขียนเสมอมา ทั้งยังช่วยขัดเกลาบทความนี้จนสำเร็จ ขอขอบคุณ คุณเผด็จ รุจิขจรเดช, คุณภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์ และคุณกมล สิงห์โตแก้ว ที่ให้ข้อมูลในการเขียน

6. <u>เอกสารอ้างอิง</u> (References)

1. ศ.ดร.อรุณ ชัยเสรี [1993] “อันตรายจากการก่อสร้างและวิธีป้องกัน, พิมพ์ครั้งที่ 2”, วสท.
2. K. Waninger [1991] “Hazards and Safety in Piling and Drilling” 4th International DFI Conference 1991, Balkema, Rotterdam: Page 29-30.
3. “Safety in Foundation Drilling” Prepared by ADSC: Association of Drilled Shaft Contractors.
4. Yv´an A. Rodr´iguez & Edward J. Jaselskis and Jeffrey S. Russell [1996] “Relationship between project performance and accidents”. *IMPLEMENTATION OF SAFETY AND HEALTH ON CONSTRUCTION SITES*: PROCEEDING OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE OF CIB WORKING COMMISSION W99/LISBON/POTUGAL/4-7 SEPTEMBER 1996: Page 251-257.

ประสบการณ์การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม

EXPERIENCE IN CONSTRUCTION OF BARRETTE

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

กมล สิงห์โตแก้ว
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

พรพจน์ ตันเส็ง
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

NARONG THASNANIPAN
SEAFCO CO., LTD.

KAMOL SINGTOWKAEW
SEAFCO CO. LTD.

PORNPOT TANSENG
SEAFCO CO., LTD.

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอาคารในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะมีความสูงเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นมีอยู่จำกัด ทำให้น้ำหนักที่ถ่ายลงเสาของอาคารสูงมากจนไม่มีพื้นที่ที่จะจัดเสาเข็มกลมขนาดปกติที่ใช้กันอยู่ลงได้ หรือในกรณีที่ความสูงของพื้นที่ก่อสร้างถูกจำกัดไม่เพียงพอที่จะนำเครื่องมือเจาะเสาเข็มเข้าไปทำงานได้ เสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม (Barrette) จึงได้ถูกนำมาใช้แทนเสาเข็มเจาะแบบกลม (Round Shape Bored Pile) ซึ่งปัจจุบันได้มีการก่อสร้าง Barrette ขนาดใหญ่สำหรับงานอาคารสูง และได้มีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Capacity) ถึง 5,290 ตัน ในบางกรณีที่เสาเข็มเดี่ยวต้องรับแรงดัดและแรงกระทำด้านข้างจากเสาโดยตรงจำเป็นที่จะต้องใช้เสาเข็มที่มีสติฟเนส (Stiffness) สูงมาก ซึ่งหากใช้เสาเข็มเจาะแบบกลมจะต้องใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 เมตรจึงเปลี่ยนไปใช้ Barrette รูปกากบาท (Cruciform Barrette) เป็นเสาเข็มรับน้ำหนักแทน

ABSTRACT

Increased building heights have ended up with gigantic column loads, which, sometime makes difficulty to arrange circular bored piles. Limited headroom conditions under existing bridges or power lines also inhibit the use of drilling rigs required for bored piles. Barrette piles become a suitable choice under these conditions. Recently a barrette has been tested up to 5,290 tons. Cruciform barrette can be used to resist of all type of moment and horizontal load efficiently.

บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันความต้องการใช้พื้นที่มีจำนวนมากขึ้นแต่พื้นที่มีอยู่จำกัด ทางหนึ่งที่จะแก้ปัญหานี้ก็คือสร้างอาคารให้มีจำนวนชั้นมากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอย โดยปกติแล้วน้ำหนักอาคารสูงจะถูกถ่ายลงชั้นดินโดยใช้เสาเข็มเจาะรูปทรงกลมขนาดใหญ่ที่มีความลึกมาก ในบางกรณีอาคารมีความสูงมาก และมีพื้นที่จำกัด ความต้องการกำลังรับน้ำหนักต่อต้นของเสาเข็มจึงสูงขึ้นจนไม่สามารถใช้เสาเข็มเจาะได้ จึงมีการเปลี่ยนรูปทรงของเสาเข็มให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าและกำลังรับน้ำหนักต่อต้นมากกว่าอีกด้วย

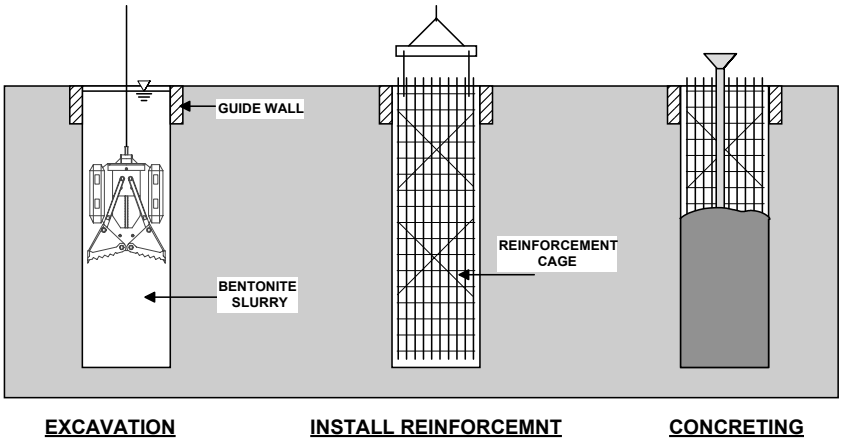
ในยุโรปและอเมริกา ได้มีการใช้เสาเข็มเจาะสี่เหลี่ยมเป็นฐานรากของโครงสร้างอาคารมานานแล้ว โดยมีชื่อเรียกต่าง ๆ กันไป เช่น Barrette (ฝรั่งเศษ), Strip Pile (อังกฤษ), Load Bearing Element (อเมริกา), Trench Pier (ประเทศในยุโรปอื่น ๆ) ฯลฯ สำหรับในประเทศไทยเรามักจะเรียกทับศัพท์ไปเลยว่า Barrette การนำ Barrette เข้ามาใช้ในประเทศไทยเริ่มขึ้นเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2528 ในโครงการ International Trade Center ที่ถนนเยาวราช จากนั้นก็ได้มีก็ได้มีการใช้ Barrette มาเป็นฐานรากเพื่อใช้ในการรับน้ำหนักของโครงสร้างอีกหลายโครงการ ตัวอย่างเช่นใช้เป็นฐานรากของอาคารที่มีน้ำหนักสูงมาก, ฐานรากของทางด่วนที่ถูกจำกัดด้วยความสูงของสายไฟฟ้าแรงสูง, ใช้เป็นฐานรากของถนนยกระดับในกรณีที่ไม่สามารถนำเครื่องมือเจาะเสาเข็มเข้าไปทำงานได้ หรือใช้เป็นฐานรากของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งมีโมเมนต์ดัดและแรงกระทำด้านข้างสูงมากแต่ถูกจำกัดด้วยพื้นที่ที่จะวางฐานราก ถึงกระนั้นก็ตาม Barrette ก็ยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลายในหมู่วิศวกรและผู้รับเหมาก่อสร้างทั่วไป บทความนี้จึงนำเสนอประสบการณ์ในการก่อสร้าง Barrette และตัวอย่างโครงการที่ใช้ Barrette เพื่อให้วิศวกรมีทางเลือกมากขึ้นในการออกแบบทางวิศวกรรมฐานราก

การก่อสร้าง Barrette

ปกติแล้วการก่อสร้างเสาเข็ม Barrette จะใช้เครื่องมือประเภทเดียวกับงานก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall และมีขั้นตอนคล้ายการก่อสร้าง Diaphragm Wall เพียงแต่กำแพงนำร่อง (Guide Wall) จะมีลักษณะเหมือนกับหน้าตัดเสาเข็มที่กำลังจะทำการก่อสร้าง ดูรูปที่ 2 ในการก่อสร้าง Barrette นี้จะไม่มีการใช้ปลอกเหล็ก (Casing) แต่จะใช้แรงดันของสารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) เพื่อต้านแรงดันดินด้านข้างของหลุมเจาะแทน และระดับของสารละลายเบนโทไนท์จะต้องไม่ต่ำจนเกินไป เพราะจะทำให้ผนังของหลุมเจาะพังทลายได้ (เอกสารอ้างอิง [1]) คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 1 ส่วนขั้นตอนในการก่อสร้างได้แสดงไว้ในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดของสารละลายเบนโทไนท์สำหรับการก่อสร้าง Barrette

Density	1.02-1.15 g/ml
Viscosity (Marsh Cone Test)	30-50 sec
PH	8-11.5
Sand Content	< 4%
Filtrate Loss	< 40 ml



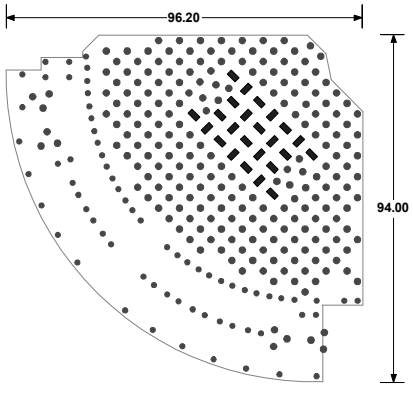
รูปที่ 1 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม (Barrette)

ประสบการณ์ในการใช้ Barrette เป็นฐานราก

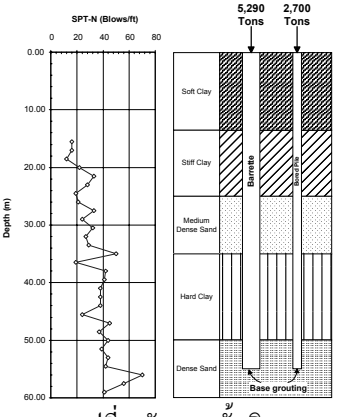
ในการนำ Barrette มาใช้เป็นฐานรากนั้นเนื่องจากสาเหตุหลัก ๆ 2 ประการคือ ต้องการเสาเข็มที่มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น หรือ ต้องการน้ำหนักบรรทุกสูงแต่เครื่องจักรเจาะเสาเข็มไม่สามารถเข้าไปทำงานได้ ดังตัวอย่างโครงการต่าง ๆ ที่ใช้ Barrette เป็นฐานราก

<u>การใช้งาน Barrette เป็นฐานรากของอาคารสูง</u>

ก) โครงการอาคาร 50 ชั้น โครงการนี้เป็นโครงการอาคารสูงที่มีเสาส่งของสถานีโทรทัศน์อยู่ด้านบนของอาคารทำให้น้ำหนักของอาคารส่วนนี้มีปริมาณสูงมากจนไม่มารถใช้เสาเข็มเจาะได้ (รูปที่ 2) จึงได้มีการใช้ Barrette ขนาด 1.5x3.0 เมตรลึก 60 เมตรและมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็ม (Base Grouting) ดูรูปที่ 3 มารับน้ำหนักของอาคารส่วนนี้ สำหรับส่วนของอาคารที่ไม่สูงมากนักจะใช้เสาเข็มเจาะมารับน้ำหนักของตัวอาคาร จำนวน Barrette ที่ใช้มีทั้งหมด 24 ต้นโดยที่ได้มีการทดสอบทั้งเสาเข็มเจาะและ Barrette สำหรับ Barrette ได้ทำการทดสอบจนถึง 5,290 ตันมีการทรุดตัวของหัวเสาเข็มเท่ากับ 61.24 มิลลิเมตร มีผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5



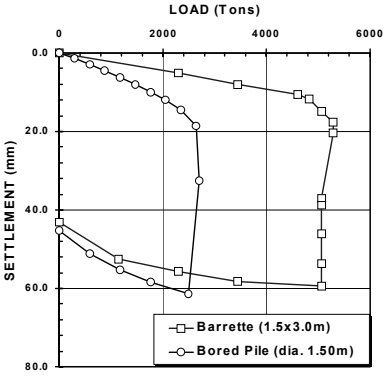
รูปที่ 2 แผนผังแสดงตำแหน่งเสาเข็ม



รูปที่ 3 ลักษณะชั้นดิน

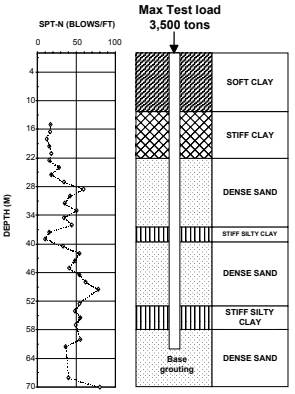


รูปที่ 4 ชุดทดสอบ Barrette รับน้ำหนักทดสอบได้สูงถึง 6,000 ตัน

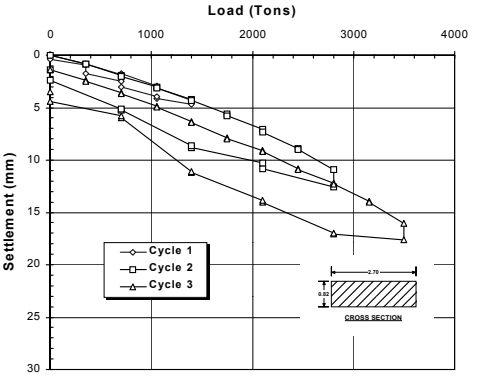


รูปที่ 5 ผลการทดสอบ Static Load Test ของ Barrette และเข็มเจาะที่โครงการเดียวกัน

ข) โครงการ Jewelry Trade Center โครงการนี้ใช้ Barrette ขนาด 0.82x2.70 เมตร โดยมีปลายฝังอยู่ในชั้นทรายที่ความลึก 61.80 เมตรโดยมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย Barrette การทดสอบ Barrette ด้วยวิธี Static Load Test ผลปรากฏว่าที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด 3500 ตันมีการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม 17 มิลลิเมตร สำหรับลักษณะชั้นดินและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวแสดงอยู่ในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 (เอกสารอ้างอิง [2])



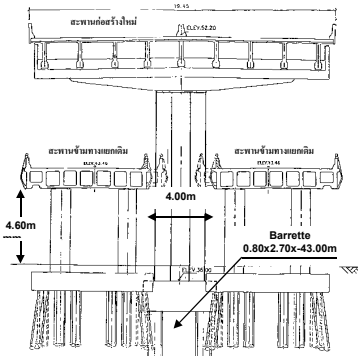
รูปที่ 6 ลักษณะชั้นดิน



รูปที่ 7 ผลการทดสอบ Static Load Test

<u>การใช้ Barrette เป็นฐานรากสำหรับงานสาธารณูปโภค</u>

ก) โครงการทางยกระดับถนนบรมราชชนนี โครงการนี้ต้องมีการก่อสร้างฐานรากของทางยกระดับใต้สะพานข้ามทางแยกเดิม เนื่องจากความสูงของสะพานข้ามทางแยกไม่สูงพอที่เครื่องจักรสำหรับขุดเข็มเจาะเข้าไปทำงานได้ ดังแสดงในรูป 8 แต่เครื่องมือสำหรับทำเสาเข็ม Barrette สามารถเข้าไปทำงานได้ เพียงแต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 9 สำหรับเหล็กเสริมใช้เป็นท่อนสั้น ๆ มาต่อกันที่ปากหลุมเจาะ โดยมีขนาดหน้าตัด 0.8x2.70 เมตร และมีปลายเข็มอยู่ที่ระดับ -43.00 เมตร โดย Barrette ได้ออกแบบให้มีกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยเท่ากับ 968 ตัน และใช้ Barrette 2 -3 ต้นต่อหนึ่งฐานราก



รูปที่ 8 รูปตัดของสะพานยกระดับ



รูปที่ 9 การขุดเจาะ Barrette ภายใต้ความสูงจำกัด

ข) โครงการก่อสร้างทางด่วนยกระดับ บางปะอิน-ปากเกร็ด ช่วงข้ามคลองประปา ซึ่งพื้นที่ก่อสร้างถูกจำกัดโดยระดับของสายไฟฟ้าแรงสูงทำให้ไม่สามารถนำเครื่องจักรเข้าไปขุดเจาะเสาเข็มได้รูปที่ 11 จึงได้เปลี่ยนมาใช้ เสาเข็ม Barrette ขนาด 1.0x2.70 เมตรและลึก 49.0 เมตร การขุดเจาะ Barrette จะกระทำใกล้กับตลิ่งคลองมาก มีการเกรงกันว่าจะในขณะขุดเจาะแรงดังของ สารละลายเบนโทไนท์จะดันตลิ่งให้พังทลายลงไปในคลอง จึงมีการสร้างหลุมเจาะทดสอบขนาด 0.8x2.70 เมตร ลึก 14 เมตรขึ้นมาและได้ทิ้งไว้ 2 วันหลังจาก 2 วันแล้วไม่พบการพังทลายของหลุมเจาะแต่อย่างใด หลังจากก่อสร้างเสร็จแล้วได้มีการทดสอบเสาเข็มแบบ Dynamic Load Test พบว่ากำลังรับน้ำหนักของเข็มเท่ากับ 2,055 ตัน

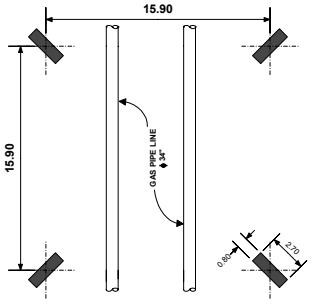


รูปที่ 10 ขณะทำการขุดเจาะ Barrette ริมคลองประปา

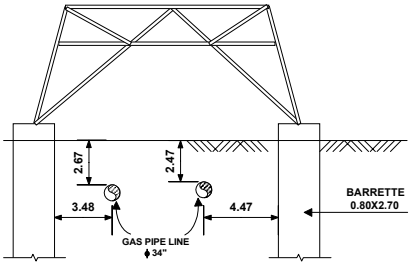


รูปที่ 11 เครื่องมือกำลังทำงานใต้สายไฟฟ้าแรงสูง

ค) โครงการนี้เป็นโครงการก่อสร้างเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงที่จังหวัดระยอง เนื่องจากต้องรับแรงด้านข้างสูงมากจึงจำเป็นต้องใช้ฐานรากเสาเข็มกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ แต่เนื่องจากพื้นที่ก่อสร้างถูกจำกัดโดยท่อส่งก๊าซ (รูปที่ 12 และ 13) ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ฐานรากขนาดใหญ่ได้ จึงจำเป็นต้องใช้เสาเข็มเดี่ยวขนาดใหญ่มาถ่ายแรงที่กระทำลงสู่ดิน แต่ถ้าใช้เสาเข็มต้องใช้เสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 2 เมตรและต้องเสริมเหล็กเป็นปริมาณมากมายซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเทคอนกรีตใต้น้ำ ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนมาใช้ Barrette ต้นเดียวขนาด 0.8x2.70 เมตร ลึกประมาณ 20 เมตรเป็นฐานรากแทน



รูปที่ 12 ผังแสดงตำแหน่งของ Barrette

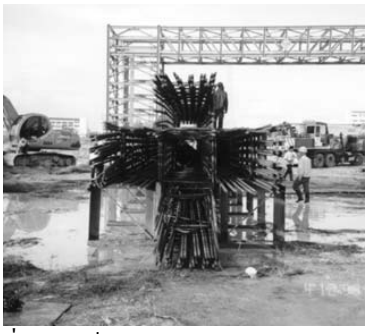


รูปที่ 13 รูปตัดแสดงตำแหน่งของท่อส่งก๊าซ

และในโครงการนี้ยังมีบางส่วนของเป็นเสาส่งแบบต้นเดี่ยว (Monopole) ซึ่งมีโมเมนต์ดัดประมาณ 2,584 ตัน-เมตร และแรงกระทำด้านข้าง 63 ตัน อีกทั้งยังมีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะสร้างฐานรากที่มีเสาเข็มกลุ่มได้ จำเป็นที่จะต้องใช้เสาเข็มเดี่ยวมารับน้ำหนัก เสาเข็มที่นำมาใช้นี้ต้องมีสติฟเนสสูงเพียงพอ ดังนั้นจึงได้ใช้ Barrette ขนาด 1.0x2.70 เมตรมาไขว้กันเป็นรูปกากบาท (Cruciform Barrette) ลึกประมาณ 20 เมตร (รูปที่ 14 และ 15) มารับเสาส่งไฟฟ้าต้นนี้ ซึ่ง Cruciform Barrette ขนาดดังกล่าวจะมีสติฟเนสสูงกว่าเสาเข็มเจาะแบบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตรอย่างมาก



รูปที่ 14 Barrette รูปกากบาท (Cruciform Barrette)



รูปที่ 15 เหล็กเสริมของ Cruciform Barrette

บทสรุป

การใช้เสาเข็มเจาะสี่เหลี่ยมเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับวิศวกรในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเนื่องจากไม่ถูกจำกัดด้วยขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม ซึ่งสามารถออกแบบให้มีขนาดเท่าใดก็ได้ อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้จะมีเพียงชุดเดียวเท่านั้นแต่เนื่องจาก Barrette จะต้องรับน้ำหนักต่อต้นสูงมาก ดังนั้นในการก่อสร้างจะต้องใช้ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในการก่อสร้าง และมีการควบคุมคุณภาพอย่างดีทุกขั้นตอน

เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ ในปัจจุบัน, การสัมนาเรื่อง “ฐานราก 40”, จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ, หน้าที่ 1-25, 2540

2. N. Thasnanipan , A. W. Munag and P. Tanseng, Barrettes Found in Bangkok Subsoils, Construction and Performance, 13th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei Taiwan, 573-578, 1998.

การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ

POLYMER IN WET PROCESS BORED PILES CONSTRUCTION IN BANGKOK SUBSOIL

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และ พรพจน์ ตันเส็ง

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

บทคัดย่อ: การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก (Wet Process Bored Pile) โดยใช้เบนโทไนท์เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพถือเป็นเรื่องปกติในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมไม่มาก แต่ในปัจจุบันกรุงเทพมีขนาดใหญ่มากและมีการตระหนักถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมกันมากขึ้น การใช้เบนโทไนท์นั้นอาจจะทำให้ผู้ประกอบการประสบปัญหาเรื่องความสะอาดของพื้นที่ก่อสร้างและปัญหาเกี่ยวกับฝุ่นละออง ซึ่งการควบคุมหรือแก้ไขปัญหาดังกล่าวอาจก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาโพลีเมอร์มาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก ซึ่งสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม บทความนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของโพลีเมอร์ และการนำเอาโพลีเมอร์มาใช้ในการก่อสร้างฐานรากทางยกระดับของสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งได้มีการก่อสร้างเสาเข็มที่ติดตั้ง VWSGไว้ซึ่งพบว่าสัดส่วนของแรงเสียดทานผิวต่อน้ำหนักบรรทุกทดสอบค่อนข้างสูง

ABSTRACT: Bentonite was widely used for stabilizing the bored hole of wet process bored piles in Bangkok over 20 years because at that time environmental problem is not a serious concern. But now Bangkok becomes a big city and environmental problem also becomes a major concern. Using bentonite may cause a problem on cleanliness of the site. To solve this problem may cause a lot costly. Therefore polymer is another choice of drilling fluid for bored pile construction which could reduces environmental problem. This paper will present mechanism of polymer to stabilize bore holes and report about bored pile construction using polymer slurry. It also presents the test results from VWSG readings of the piles constructed with polymer slurry showing high skin friction ratio.

KEYWORDS: Bored Pile, Polymer Slurry, and Bentonite Slurry

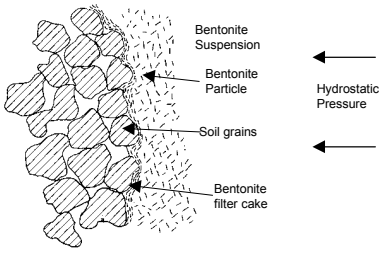
For further details, contact: *SEAFCO Co., Ltd., 26/10 Rarm Intra 109 Road, Bangchan, Klong Sam Was, Bangkok 10510,* ***Homepage:*** *www.seafco.co.th,* ***Email:*** *seafco@seafco.co.th*

1. บทนำ

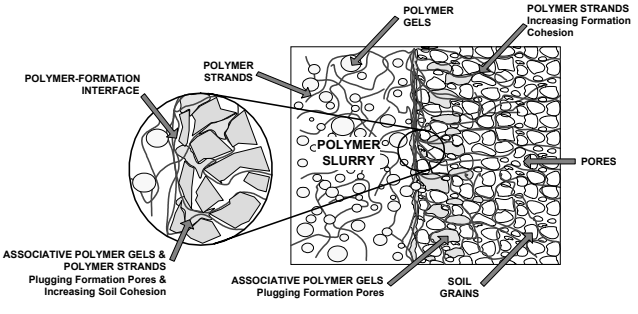
ตั้งแต่เริ่มมีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบเปียกในประเทศไทยเมื่อกว่า 20 ปีมาแล้วนั้นได้นิยมใช้เบนโทไนท์ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ เพราะในอดีตที่ผ่านมาปัญหาเรื่องการขนย้ายดินที่ปนเปื้อนเบนโทไนท์และเบนโทไนท์ที่ใช้ไม่ได้แล้วไปทิ้งไม่ประสบปัญหามากนักเนื่องจากยังมีพื้นที่ว่างเปล่ามากอยู่ แต่ในปัจจุบันบ้านเมืองได้ขยายตัวอย่างรวดเร็วอีกทั้งการก่อสร้างที่ต้องทำการขุดลอกหรือเจาะดินออกมีเป็นจำนวนมากทำให้พื้นที่ซึ่งจะนำดินและเบนโทไนท์ไปทิ้งได้มีปริมาณน้อยลง และมีการเกรงว่าจะทำให้สภาพพื้นและสิ่งแวดล้อมเสียไป ซึ่งในเรื่องสิ่งแวดล้อมนี้ทางประเทศตะวันตกถือเป็นเรื่องที่สำคัญ ดังนั้นจึงเริ่มมีการนำเอาโพลีเมอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมเข็มเจาะ สำหรับประเทศไทยแล้วโพลีเมอร์ยังถือว่าเป็นของใหม่อยู่และยังไม่ได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมของโพลีเมอร์และพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะที่ใช้โพลีเมอร์กันมากนัก ตัวอย่างจากการศึกษาของต่างประเทศ [2] พบว่าโพลีเมอร์ให้กำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มเจาะที่ใช้เบนโทไนท์ ปัจจุบันนี้ในประเทศไทยยังมีข้อมูลด้านนี้ไม่เพียงพอที่จะนำมาสรุป แต่จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าแรงเสียดทานมีแนวโน้มสูงมากขึ้นกว่าปกติ [1] ดังนั้นพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างด้วยโพลีเมอร์ในประเทศไทยจึงเป็นเรื่องที่ควรศึกษาเป็นอย่างยิ่งเพราะจะทำให้สามารถนำผลจากการศึกษามาใช้ในการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มเจาะในประเทศไทยต่อไปในอนาคตได้อย่างประหยัด

2. กลไกการทำงานของโพลีเมอร์

หน้าที่หลักที่เหมือนกันของเบนโทไนท์และโพลีเมอร์คือการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะในขณะทำการขุดเจาะซึ่งเบนโทไนท์จะใช้กระบวนการที่เรียกว่า Filtration รูปที่ 1 เป็นกลไกในการรักษาเสถียรภาพโดยอนุภาคของเบนโทไนท์จะแทรกเข้าไปอุดช่องว่างในเม็ดดินที่ผิวผนังร่องขุด ในการใช้เบนโทไนท์ในการขุดเจาะนี้หากทำการก่อสร้างไม่ถูกวิธีและไม่มีการควบคุมอย่างดีแล้วอาจจะเกิด Filter Cake ตกค้างอยู่ซึ่งอาจทำให้แรงเสียดทานผิวของเสาเข็มลดลง [3] แต่สำหรับโพลีเมอร์แล้วจะไม่เกิดกระบวนการ Filtration ขึ้นโพลีเมอร์จะใช้เส้นใย (Strand) และเจล (Gel) ในสารละลายโพลีเมอร์ในการอุดช่องว่างในเม็ดดินและเพิ่มการยึดเกาะของดิน (รูปที่ 2)



รูปที่ 1 กระบวนการ Filter Cake Formation ของสารละลายเบนโทไนท์การรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

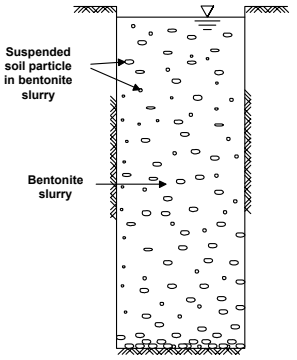


รูปที่ 2 หลักการของสารละลายโพลีเมอร์ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

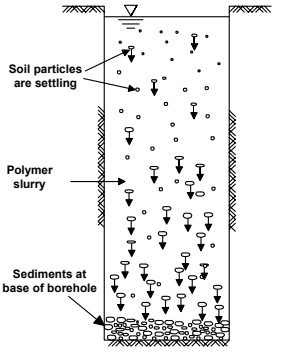
โดยโพลีเมอร์เจล (Polymer gel) จะทำหน้าที่อุดช่องว่างในเม็ดดิน ส่วนเส้นใยโพลีเมอร์ (Polymer strands) จะเป็นตัวเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน โพลีเมอร์ซึ่งเป็น High Viscosity Gel Fluid ที่เข้าไปแทรกระหว่างช่อง

ว่างในเม็ดดินกลายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ เคลือบอยู่สำหรับดินที่ไม่มีการยึดเหนี่ยว (ทราย หรือ กรวด) กระบวนการ Electrochemical ในสารละลายโพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นกาวชั่วคราวที่ยึดจับเม็ดดินไว้ในขณะขุดเจาะดิน ซึ่งโซนบางๆ ของ gel-permeated, cohesion-enhanced soil รอบรอบผนังของหลุมเจาะจะเรียกว่า Gel Membrane ซึ่ง Gel Membrane จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่สามารถถ่ายแรงดันของของเหลวไปยังผนังของร่องขุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีความแตกต่างกับการขุดเจาะที่ใช้เบนโทไนท์ซึ่งเกิด Filtration ที่ผนังของร่องขุด

สำหรับกระบวนการกำจัดตะกอนของสารละลายโพลีเมอร์จะแตกต่างกับสารละลายเบนโทไนท์โดยสิ้นเชิง โดยเบนโทไนท์จะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า Thixotropy ซึ่งเมื่อทิ้งสารละลายเบนโทไนท์ไว้นิ่ง ๆ เบนโทไนท์จะก่อตัวเป็นวุ้น (gel) ทำให้ตะกอนที่เกิดจากการขุดเจาะแขวนลอยอยู่ในสารละลายเบนโทไนท์รูปที่ 3 ตะกอนแขวนลอยเหล่านี้จะถูกกำจัดออกโดยการดูดสารละลายเบนโทไนท์ขึ้นมาทำความสะอาดด้วย Desander และ Desilter แต่สำหรับสารละลาย Polymer ไม่มีการก่อตัวเป็นวุ้น (gel) แต่เส้นใยของโพลีเมอร์จะจับตัวกับอนุภาคดินในสารละลายทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลงสู่ก้นหลุมด้วยแรงโน้มถ่วงรูปที่ 4 ซึ่งถ้าปล่อยสารละลายไว้นิ่ง ๆ เป็นระยะเวลาหนึ่งตะกอนขนาดใหญ่จะตกลงสู่ก้นหลุมจนหมดซึ่งจะตรวจสอบได้ด้วยการวัดความลึกของหลุมเจาะกับเวลาถ้าความลึกของหลุมเจาะคงที่หมายความว่าตะกอนขนาดใหญ่ตกลงสู่ก้นหลุมหมดแล้ว จากนั้นจึงใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Cleaning Bucket เก็บตะกอนเหล่านั้นขึ้นจากก้นหลุม กระบวนการตกตะกอนของสารละลายโพลีเมอร์นี้จะทำให้ความหนืด (Viscosity) ของสารละลายโพลีเมอร์ลดลงเนื่องสูญเสียเส้นใยโพลีเมอร์ในการจับกับอนุภาคเม็ดดิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่าความหนืดของสารละลายโพลีเมอร์อยู่เสมอถ้าความหนืดลดลงนั่นหมายความว่าปริมาณโพลีเมอร์ในสารละลายลดลงจำเป็นจะต้องเติมโพลีเมอร์ลงในหลุมเจาะ ซึ่งปกติแล้วจะใช้โพลีเมอร์เข้มข้นชนิดเหลวเทลงในหลุมเจาะและกวนด้วยการเคลื่อนที่ก้านเจาะขึ้น ๆ ลง ๆ ซึ่งจะทำให้ Viscosity เพิ่มขึ้น ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่จะทำให้สูญเสียปริมาณโพลีเมอร์ในสารละลายก็คือการที่โพลีเมอร์แทรกซึมหายเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะเกิดเมื่อทำการขุดเจาะในชั้นดินชนิดที่มีเม็ดใหญ่ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ส่วนผสมที่มีเม็ดละเอียดเข้าไปผสมเพื่อช่วยในการอุดช่องว่างของเม็ดดิน ซึ่งโดยปกติจะใช้เบนโทไนท์ซึ่งมีอนุภาคละเอียดผสมกับสารละลายโพลีเมอร์ในการใช้งาน



รูปที่ 3 ตะกอนจากการขุดเจาะแขวนลอยอยู่ในสารละลายเบนโทไนท์ต้องนำมาแยกด้วย Desander และ Desilter



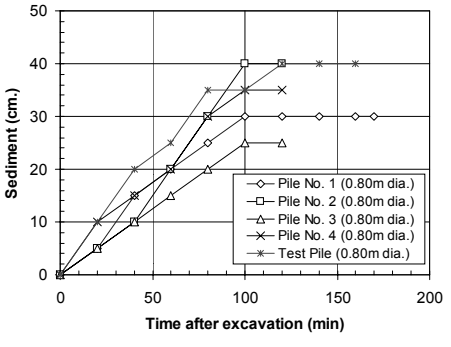
รูปที่ 4 ตะกอนจากการขุดเจาะรวมตัวกับโพลีเมอร์และตกตะกอนลงสู่ก้นหลุมเจาะต้องเก็บขึ้นมาด้วย Cleaning Bucket

ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งก็คือโพลีเมอร์จะไม่มีการทำปฏิกริยากับคอนกรีตเหมือนเบนโทไนท์ ทำให้เกิดตะกอนปนเปื้อนที่หน้าสัมผัสระหว่างคอนกรีตและสารละลายน้อยทำให้สามารถวัดระดับการเทคอนกรีตได้แน่นอนขึ้นจึงลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผื่อคอนกรีตไว้มากเกินไปได้ ความแตกต่างอีกประการหนึ่งก็คือขนาดของพื้นที่และจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ ในการใช้ระบบเบนโทไนท์จะต้องมีการใช้พื้นที่สำหรับกองเก็บเบนโทไนท์ชนิดผงเป็นพื้นที่มากกว่าการเก็บโพลีเมอร์เนื่องจากสัดส่วนในการใช้งานระหว่างโพลีเมอร์ต่อเบนโทไนท์จะอยู่ระหว่าง 1:50 ถึง 1:200 โดยน้ำหนัก [2]

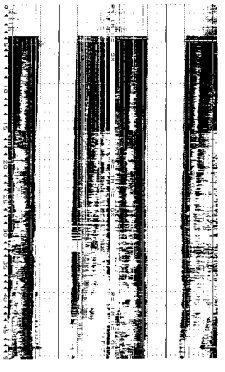
4. การก่อสร้างเสาเข็ม Pilot Pile โดยใช้โพลีเมอร์

4.1 เสาเข็มทดสอบโครงการก่อสร้างทางยกระดับรับสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา

สะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาที่ก่อสร้างขึ้นใหม่ในพื้นที่กรุงเทพมหานครในระยะหลังๆ นี้ มักจะทำการก่อสร้างทางยกระดับมารับการจราจรโดยตรงจากตัวสะพาน ทางยกระดับเหล่านี้จะใช้เสาเข็มระบบเจาะเปียกรองรับฐานราก โครงการตัวอย่างที่นำมาเสนอนี้มีการทดสอบเสาเข็มนำร่อง (Pilot Pile) ทั้งสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา โดยก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 800 มม. และมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการถ่ายแรงที่ผิวเสาเข็มที่เรียกว่า Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) ไว้ถึง 6 ระดับ เสาเข็มฝั่งพระนครมีปลายเข็มอยู่ในชั้นทรายแน่นปานกลางถึงแน่นมากที่ระดับความลึก 49.00 เมตร ส่วนฝั่งธนบุรีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายแน่นมากที่ระดับความลึก 50.19 เมตร ในการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบและเสาเข็มสมอทั้งสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยานี้ ได้ใช้สารละลายโพลีเมอร์ผสมกับเบนโทไนท์อีกเล็กน้อยเป็นตัวรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ หลังจากการเจาะเสร็จแล้วได้ปล่อยให้ตะกอนที่ลอยแขวนอยู่ตกลงสู่ก้นหลุมให้หมดก่อนจึงใช้ Cleaning Bucket เก็บตะกอนก้นหลุมขึ้นมาให้หมดหลังก่อนที่จะใส่โครงเหล็กเสริมลงไปในรูเจาะ จากข้อมูลการจดบันทึกเวลาในการปล่อยตะกอนให้ตกสู่ก้นหลุม พบว่าหากปล่อยให้สารละลายโพลีเมอร์อยู่นิ่งๆ ตะกอนจะตกลงหมดภายในเวลา 2 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 5 และได้ตรวจสอบสภาพหลุมเจาะโดยวิธี Drilling Monitoring ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 พบว่าผิวหลุมเจาะเรียบไม่มีการพังทลายและเห็นผิวผนังได้ชัดเจนเนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ค่อนข้างใสไม่เป็นเมือกวุ้นเช่นเบนโทไนท์ซึ่งจะเห็นผิวหลุมเจาะไม่ชัดเจน

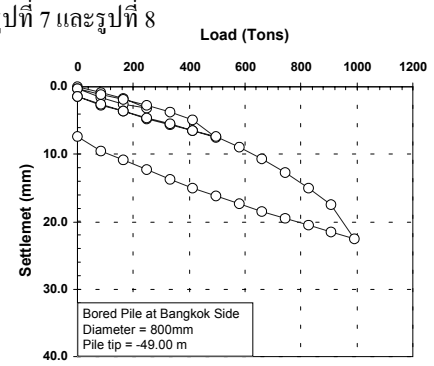


รูปที่ 5 ความสูงของตะกอนที่ตกลงก้นหลุมตามระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากขุดเจาะเสร็จ

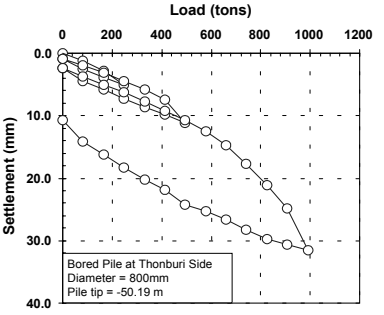


รูปที่ 6 ผลการตรวจสอบสภาพหลุมเจาะด้วยเครื่องมือ Drilling Monitoring

หลังจากก่อสร้างเสร็จแล้วได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกโดยใช้วิธี Static Load Test ทั้งสองฝั่งแม่น้ำ กราฟของการทรุดตัวของหัวเสาเข็มเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ณ. ตำแหน่งฝั่งพระนครและฝั่งธนบุรีดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8

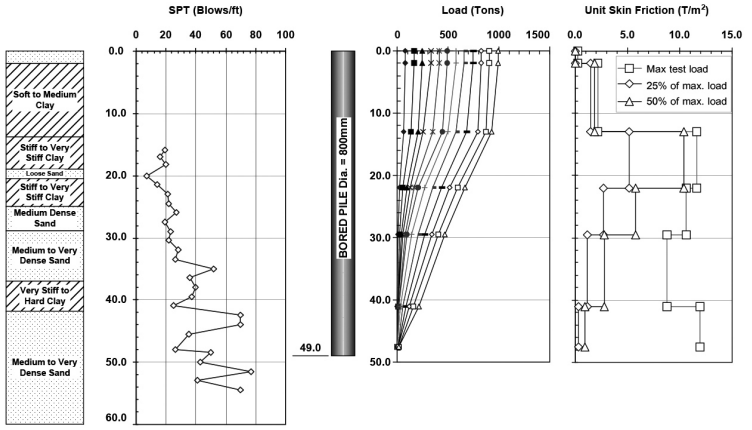


รูปที่ 7 Load-Settlement curve ของเสาเข็มทดสอบฝั่งพระนคร

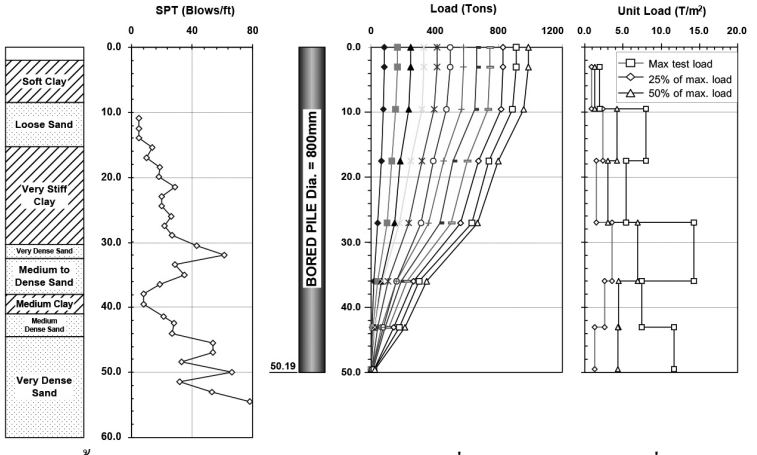


รูปที่ 8 Load-Settlement curve ของเสาเข็มทดสอบฝั่งธนบุรี

ส่วนรูปตัดชั้นดิน, การถ่ายแรงที่ผิวเสาเข็มในระดับความลึกต่างๆ และหน่วยแรงที่เกิดที่ผิวเสาเข็มทดสอบต้นฝั่งพระนครและต้นฝั่งธนบุรีได้แสดงไว้ในรปที่ 9 และรปที่ 10 ตามลำดับ และสรปไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 9 รูปตัดชั้นดิน, การถ่ายแรงในเสาเข็ม, หน่วยแรงที่ผิวเสาเข็ม Pilot Pile ฝั่งพระนคร



รูปที่ 10 รูปตัดชั้นดิน, การถ่ายแรงในเสาเข็ม, หน่วยแรงที่ผิวเสาเข็ม Pilot Pile ฝั่งธนบุรี

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์

เสาเข็มเจาะ	น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (ตัน)	แรงเสียดทานที่ผิว (ตัน)	แรงถ่ายลงสู่ปลายเข็ม (ตัน)	แรงเสียดทานผิวต่อน้ำหนักบรรทุกทดสอบ (%)
ฝั่งพระนคร 800mm. x 49.0m	990	971	19	98.1
ฝั่งธนบุรี 800mm. x 50.19m	990	967	23	97.7

4.2 ผลกระทบของโพลีเมอร์ต่อสิ่งแวดล้อม

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะในโครงการข้างต้นนี้เป็นการก่อสร้างกลางถนนที่มีการจราจรหนาแน่นจึงต้องมีความระมัดระวังในเรื่องของความสะอาดมาก สำหรับหน่วยงานที่ใช้โพลีเมอร์จะมีความสะอาดมากกว่าเบนโทไนท์ นั่นคือดินที่ขุดขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นก้อนไม่กลายเป็นน้ำโคลนทำให้สามารถขนย้ายได้สะดวกไม่ไหลนองมาบนพื้นถนนออกนอกเขตก่อสร้าง ดินที่ขุดขึ้นมาแล้วเมื่อนำไปทิ้งในที่ซึ่งกำหนดไว้จะมีผลกระทบต่อพื้นที่ทิ้งดินน้อยมาก และสารละลายที่ใช้ไม่ได้แล้วจะนำไปทิ้งพร้อมกับดินที่ขุดขึ้นมาได้เลยเนื่องจากโพลีเมอร์นั้นไม่เป็นพิษ (non-toxic) และสามารถย่อยสลายได้ (degradable) ซึ่งต่างกับเบนโทไนท์ที่ต้องนำไปทิ้งในที่เฉพาะเพื่อป้องกันความสกปรกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

5. สรุป

โพลีเมอร์เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในประเทศไทย ซึ่งโพลีเมอร์จะไม่ก่อให้เกิด Filter Cake ที่ผนังรูเจาะทำให้ได้สัดส่วนแรงเสียดทานที่ผิวต่อน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสูง ข้อดีที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ โพลีเมอร์จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเบนโทไนท์ แต่การนำโพลีเมอร์มาใช้ต้องทำการศึกษาสภาพชั้นดินแต่ละแห่งและชนิดของโพลีเมอร์ให้ดีก่อนการนำมาใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ Mr. Aung Win Muang และพนักงานบริษัท ซีฟโก้ ทุกท่านที่ช่วยจัดเตรียมข้อมูลและจัดเตรียมบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. วันชัย เทพรักษ์, สันติภาพ ศิริยงค์, สุรเชษฐ์ ตันวงศ์วาล และ สุธี คำแฝด (2541), การใช้โพลิเมอร์ในการทำเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพ, ภาควิชาวิศกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. A. A. Ata and M. W. O'Neill (1988), Side-wall stability and side-shear resistance in bored piles constructed with high-molecular-weight polymer slurry, Pro. Of the 3rd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium.
3. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และทัชชพงษ์ ประเวศวรารัตน์ (2542). สมรรถนะของเสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบนโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพฯ. การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2542ม โดย ว.ส.ท. หน้าที่ 9-16

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะและปัญหา

Bored Piling Construction and Their Associated Problems

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์[1]

บทคัดย่อ

เสาเข็มเจาะเริ่มเข้ามามีบทบาทในการก่อสร้างครั้งแรกเป็นเวลากว่า 30 ปีมาแล้ว ซึ่งในระยะ 30 กว่าปีมานี้ มีผู้ประกอบการเสาเข็มเจาะนำวิธีการเจาะหลากหลายชนิดเข้ามาใช้ แต่วิธีการเจาะหลายแบบไม่เหมาะสมกับสภาพชั้นดินกรุงเทพฯ จึงไม่ได้รับความนิยมและเลิกใช้ไป จนเหลืออยู่แต่การเจาะแบบสว่านหมุน เจาะแบบสามขาและเจาะแบบขุด บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะทั้งสามแบบและปัญหาที่ควรระมัดระวังในการทำงาน

Abstract

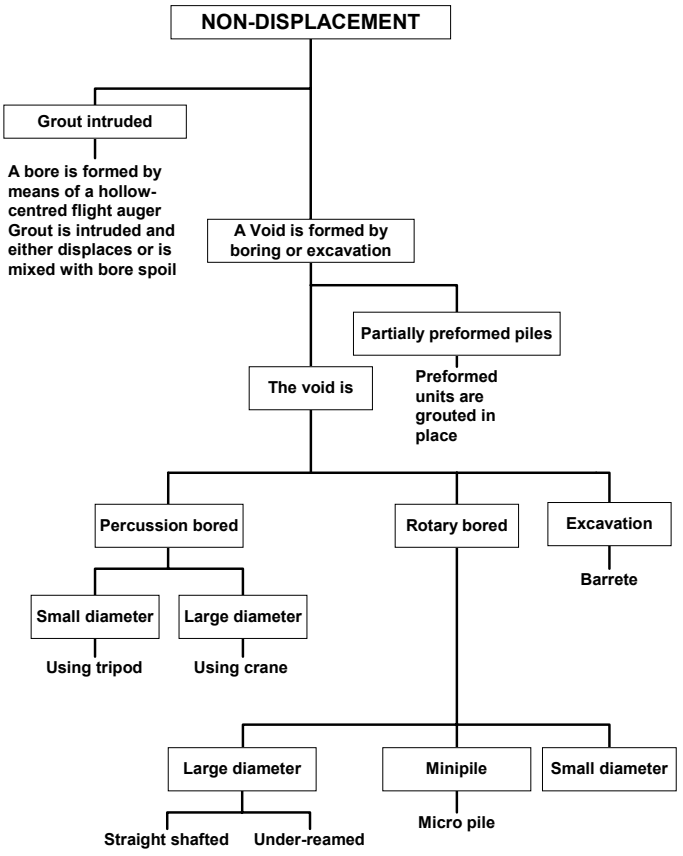
Bored piles have been introduced in to Thailand over 30 year ago. Within 3 decades, various bored piles construction methods have been introduced. Among then however many construction methods are impractical for Bangkok subsoils condition and hence they were finally out from the market. Three popular types have remained in the construction market namely, rotary type, tripod type and excavation type. This paper discusses on the guide lines in construction and associated problems of the popular bored piles types in Thailand.

[1]กรรมการผู้จัดการ

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด 26 / 10 ถนนรามอินทรา 109 แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510

1. บทนำ

เสาเข็มเจาะที่ใช้กันในประเทศต่างๆ ในโลกมีหลายแบบ ซึ่งสามารถแยกเป็นหมวดหมู่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดย Tomlinson (1994) ได้ให้คำจำกัดความสั้นๆ แต่ครอบคลุมถึงเสาเข็มเจาะทุกชนิด ว่า เสาเข็มเจาะคือเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยการขุดเจาะดินให้เป็นรู และเทคอนกรีตลงไปในรูเจาะให้เต็ม



รูปที่ 1 เสาเข็มเจาะแบบต่างๆ after Weltman et al. (1977)

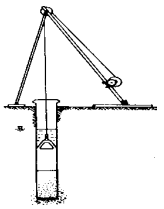
วิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมและได้รับความนิยมใช้ในประเทศไทย มีเพียงไม่กี่แบบเท่านั้นคือ

1. *การเจาะแบบใช้การทิ้งกระแทก (Percussion Type)* โดยเครื่องเจาะแบบสามขา: การขุดเจาะดินกระทำโดยใช้กระบอกเหล็กทรงกลมทิ้งกระแทกให้ดินติดขึ้นมากับกระบอกเหล็กจนดินถูกเจาะเป็นรูปทรงกลม ส่วนใหญ่การเจาะแบบนี้เป็นการเจาะระบบแห้ง (Dry Process) การเจาะแบบเปียก

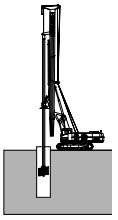
โดยใช้เครื่องเจาะสามขา อาจกระทำได้โดยการดัดแปลงเครื่องเจาะให้เป็นการเจาะทิ้งกระแทกแบบระบบน้ำหมุนเวียนโดยตรง (Direct Circulation Method) แต่ควบคุมคุณภาพยาก จึงนิยมก่อสร้างเฉพาะเจาะแบบแห้งเท่านั้น ตามรูปที่ 2

2. *การเจาะแบบใช้การหมุน (Rotary Type)* การขุดเจาะดินกระทำโดยใช้เครื่องเจาะแบบสว่านหมุนเจาะดินเป็นรูปทรงกลม การขุดเจาะสามารถทำได้ทั้งเจาะแบบแห้ง (Dry Process) และเจาะแบบเปียก (Wet Process) ภายใต้สารละลายฯ การเจาะแบบแห้งใช้เครื่องชนิด Rotary Drilling Rig ตามรูปที่ 3 ส่วนการเจาะแบบเปียกสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องแบบ Rotary Drilling Rig และแบบ Reverse Circulation Rig ซึ่งแบบหลังนี้ไม่ได้รับความนิยมในปัจจุบันจึงไม่มีผู้นำมาใช้

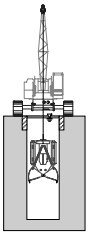
3. *การเจาะแบบใช้การขุด (Excavation Type)* การขุดดินกระทำโดยใช้หัวเจาะแบบก้ามปู (Grab) ที่ใช้ในการก่อสร้างกำแพงกันดินชนิด Diaphragm Wall มาเจาะดินให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม การเจาะเป็นแบบเจาะเปียกภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ เสาเข็มเจาะรูปเหลี่ยมนี้เรียกว่า Barrette เครื่องมือเจาะตามรูปที่ 4



รูปที่ 2 แบบสามขา



รูปที่ 3 แบบสว่านหมุน



รูปที่ 4 แบบขุด

2. ประเภทของเสาเข็มเจาะที่นิยมใช้ในประเทศไทย

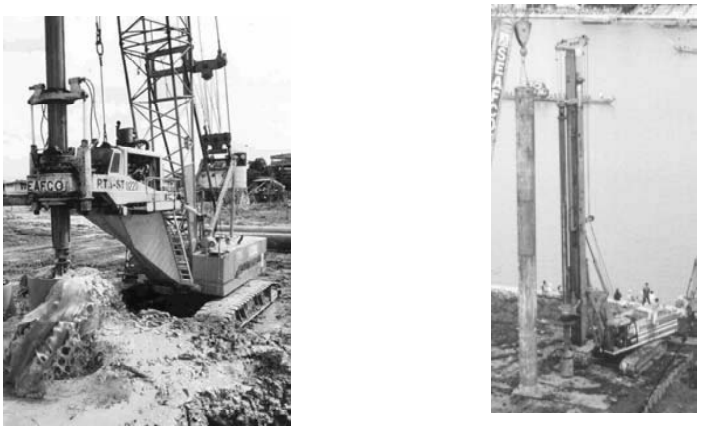
2.1 เสาเข็มเจาะแบบสามขา (Tripod bored pile)

เสาเข็มระบบเจาะแบบสามขาเหมาะกับเสาเข็มขนาดเล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 60 เซนติเมตร และเหมาะสำหรับการเจาะระบบแห้งในชั้นดินเหนียว (Clay soil) เสาเข็มระบบนี้เริ่มถูกนำเข้ามาใช้ในกรุงเทพฯ เป็นครั้งแรกเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2515 โดยผู้ประกอบการจากฮ่องกง ในขณะนั้นจะเรียกระบบเสาเข็มนี้ว่าเสาเข็มเจาะเพรชเชอร์ไพล์ (Pressure bored pile) ซึ่งเรียกตามวิธีการก่อสร้างที่ขณะถอนปลอกเหล็กกันดินชั่วคราวออกจะใช้ลมช่วยดันปลอกเหล็กที่ปิดฝาไว้ให้ถอนตัวขึ้นได้ง่ายและช่วยกดผิวหน้าคอนกรีตที่เทไว้ในหลุมเจาะไม่ให้ตามปลอกเหล็กขึ้นมา ต่อมาในปัจจุบันผู้ประกอบการเสาเข็มเจาะสามขาส่วนใหญ่มักละเว้นการอัดลมช่วยดันปลอกเหล็กขณะถอน ทำให้

คอนกรีตที่เทไว้อาจติดปลอกเหล็กที่ถอนขึ้นมาทำให้เสาเข็มเสียหายได้ เสาเข็มเจาะแบบสามขานี้เครื่องมือมีขนาดเล็กและเบา จึงเหมาะกับการทำงานในสถานที่แคบๆหรือแม้แต่ทำงานในอาคาร

2.2. **เสาเข็มแบบเจาะโดยใช้สว่านหมุน** (Rotary bored piles using auger and bucket)

เสาเข็มเจาะโดยใช้สว่านหมุนถูกนำเข้ามาใช้ครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2520 และได้รับความนิยมต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน เสาเข็มที่ใช้การเจาะโดยสว่านหมุนนี้สามารถเจาะได้ในสภาพธรณีวิทยาเกือบทุกประเภท และเจาะได้ตั้งแต่ขนาดเล็ก 400 มม. ถึงใหญ่กว่า 2000 มม. และเจาะได้ทั้งระบบแห้งและระบบเปียก เครื่องมือเสาเข็มเจาะแบบสว่านหมุนตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องมือเสาเข็มเจาะแบบสว่านหมุน

2.3. **เสาเข็มเจาะโดยใช้การขุด** (Excavation pile)

เสาเข็มเจาะโดยใช้วิธีการขุดนี้ มีชื่อเรียกในทางเทคนิคว่า เสาเข็มแบร์เร็ต (Barrette) เครื่องมือที่ใช้ในการขุดเป็นเครื่องมือชนิดเดียวกับที่ใช้ในการขุดกำแพง Diaphragm walls ตามรูปที่ 6 เสาเข็มชนิดนี้ไม่เป็นทรงกลม แต่จะเป็นรูปเหลี่ยมทรงต่างๆ เช่นรูปสี่เหลี่ยม รูปตัวที รูปตัวแอล รูปกากะบาท เป็นต้น พื้นที่หน้าตัดเสาเข็มชนิดนี้จะใหญ่กว่าเสาเข็มกลมจึงรับน้ำหนักได้สูงกว่าเสาเข็มรูปทรงกลม เสาเข็มชนิดนี้ก่อสร้างได้เฉพาะระบบเปียกเท่านั้น ไม่สามารถก่อสร้างระบบแห้งได้



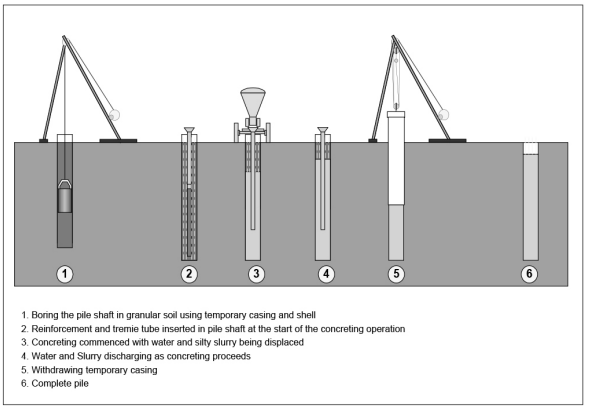
รูปที่ 6 เครื่องมือขุด

3. ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะประเภทต่าง ๆ

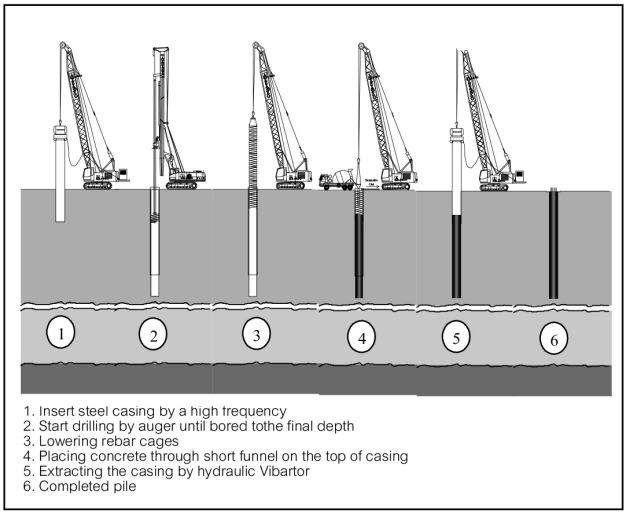
วิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะทั้ง 3 ประเภทข้างต้น สามารถแบ่งตามขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะได้เป็น 2 ประเภท คือเสาเข็มเจาะระบบแห้ง และเสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1. **การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบแห้ง** (Dry Process Bored Pile)

ในกรณีที่ชั้นดินอำนวยให้สามารถก่อสร้างเสาเข็มเจาะเป็นระบบแห้งได้ เช่นในชั้นดินเหนียวแข็ง หลุมเจาะอาจเจาะโดยไม่มีปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินพังนอกจากใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวสั้นๆ ที่ระดับดินเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดตำแหน่งเสาเข็ม หรือในชั้นดินที่มีชั้นดินอ่อนระดับตื้นและต่อด้วยดินเหนียวแข็ง จะต้องใส่ปลอกเหล็กกันชั้นดินอ่อนไว้ การเจาะเสาเข็มระบบแห้งสามารถใช้เครื่องเจาะแบบสามขาและชนิดใช้สว่านเจาะ ขั้นตอนการก่อสร้างทั้งสองแบบโดยสังเขปตามรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบสามขา



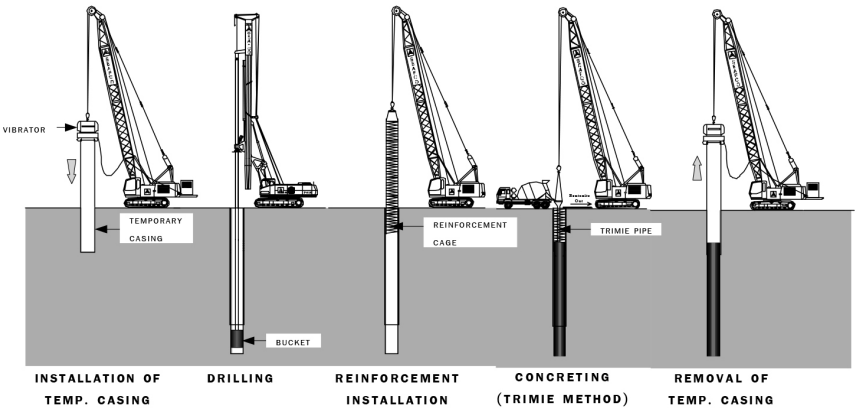
รูปที่ 8 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบแห้งโดยสว่านในชั้นดินกรุงเทพฯ

3.2. การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก (Wet Process Bored Pile)

3.2.1. เสาเข็มเจาะระบบเปียกแบบใช้สว่านเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่ไม่คงตัวเช่นในชั้นทรายที่มีน้ำใต้ดิน ซึ่งหลุมเจาะไม่สามารถมีเสถียรภาพ และลึกเกินกว่าที่จะกดปลอกกันดินชั่วคราวไปสร้างเสถียรภาพของหลุมเจาะ จึงใช้ของเหลวเช่นสารละลายเบ็นโทไนท์หรือสารละลายโพลีเมอร์มาเป็นตัวสร้างเสถียรภาพของหลุมเจาะ โดยสารละลายจะสร้างแรงดันภายในหลุมเจาะต้านแรงดันดินทำให้เกิดเสถียรภาพในหลุมเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีขั้นตอนคล้ายกับเสาเข็มเจาะแห้งโดยใช้สว่านเจาะคือ ชั้นดินอ่อนชั้นบนจะใช้ปลอกชั่วคราวกันดินพัง แต่ส่วนที่ลึกต่ำกว่าระดับปลายปลอกเหล็กชั่วคราว ใช้ของเหลวเป็นตัวพยุงเสถียรภาพของหลุมเจาะ ขั้นตอนโดยสังเขปเป็นไปตามรูปที่ 9 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 9 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกโดยสว่านในชั้นดินกรุงเทพฯ

ก. การลงปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินอ่อน: ปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินพังที่ใช้ต้องมีความยาวลึกเพียงพอที่จะป้องกันชั้นดินอ่อนโดยปลายปลอกเหล็กต้องยาวถึงระดับบนของชั้นดินแข็ง (Stiff clay) และปลอกเหล็กที่กดลงไปต้องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดและได้ดิ่งตามรายการ ปลอกเหล็กนอกจากจะเป็นตัวป้องกันชั้นดินอ่อนแล้วยังเป็นนำสว่านหัวเจาะให้เจาะได้ดิ่งด้วย หากกดปลอกเหล็กไว้เอียง เสาเข็มก็จะเอียงไปด้วย

ข. การเจาะดินภายในปลอกเหล็กออก กระทำโดยสว่านเจาะดิน (Earth auger) เมื่อเจาะเกือบถึงระดับชั้นดินที่ไม่คงรูป ทำการเติมสารละลายฯลงไปในหลุมเจาะให้เติมเพื่อสร้างแรงดันต้านแรงดันของชั้วดิน แล้วทำการเจาะดินภายใต้สารละลายฯด้วยหัวเจาะแบบถัง (Bucket)จนถึงระดับที่ออกแบบไว้

ค. การทำความสะอาดสารละลายฯในหลุมเจาะ ในกรณีที่ใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ เมื่อหลุมเจาะถูกเจาะจนได้ระดับแล้ว จะต้องทำความสะอาดหลุมเจาะโดยการเปลี่ยนถ่ายสารละลายขึ้นมาทำความสะอาดโดยผ่านตะแกรงแยกดินทราย (Desander and desilting) และตรวจสอบจนได้ตามมาตรฐานแล้วจึงทำการติดตั้งโครงเหล็กเสริม

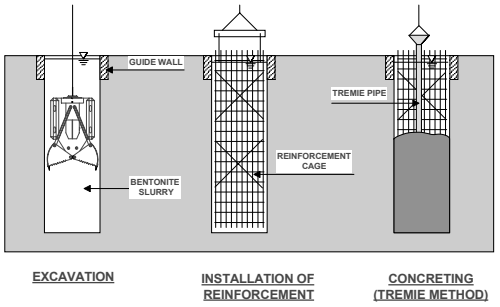
ง. การติดตั้งโครงเหล็กเสริม : เหล็กเสริมควรออกแบบให้มีความยาวตลอดต้น และโครงเหล็กเสริมต้องผูกให้แข็งแรง และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 7.5 ซม.

จ. การเทคอนกรีต : คอนกรีตต้องทำการเทแบบเทใต้น้ำ (Tremie concrete) ก่อนทำการเทคอนกรีตชุดแรกลงไปในท่อเท จะต้องวางตำแหน่งของปลายท่อเทให้ห่างจากก้นหลุมไม่เกิน 10 ซม. และเมื่อเทชุดแรกจนคอนกรีตไหลออกจากท่อหุ้มปลายท่อแล้ว จะต้องรักษาระดับปลายท่อให้ฝังอยู่ในคอนกรีตที่เทลงไปก่อนหน้าตลอดเวลา สารละลายฯที่ถูกแทนที่โดยคอนกรีตจะล้นออกมาจากปากหลุมเจาะจะถูกนำไปทำความสะอาดเพื่อปรับปรุงคุณภาพสำหรับการใช้งานซ้ำ

ฉ. การถอนปลอกเหล็ก : เมื่อถอนคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการถอนปลอกออกโดย Vibro Hammer

3.2.2 เสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยใช้หัวเจาะแบบขุด

ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยใช้หัวเจาะแบบขุด (รูปที่ 10) ซึ่งได้แก่ หัวเจาะก้ามปู (Grab) คล้ายกับขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกที่ใช้สว่านเจาะ แต่จะแตกต่างกันที่เสาเข็มแบบขุดนี้ไม่สามารถใส่ปลอกเหล็กกันดินพังได้ มีเพียงกำแพงนำร่อง (Guide wall) ลึกประมาณ 1.5 เมตรเป็นตัวกำหนดตำแหน่งเสาเข็มเท่านั้นและการขุดต้องทำการขุดภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ตั้งแต่เริ่มขุดจนเทคอนกรีตเสร็จ ขั้นตอนภายหลังการขุดเสร็จเรียบร้อยแล้วคือ การทำความสะอาดหลุมเจาะ การลงโครงเหล็ก เสริม การเทคอนกรีตใต้น้ำเป็นไปเช่นเดียวกับการทำงานเสาเข็มเจาะระบบเปียก เสาเข็มชนิดนี้มีชื่อเรียกว่าเสาเข็มแบเร็ต (Barrette Pile)



รูปที่ 10 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม Barrette

3.2.3. สารละลายที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ ต้องทำการใส่สารละลายลงไปในหลุมเจาะเพื่อก่อให้เกิดแรงดันต้านแรงดันดินไม่ให้หลุมเจาะเกิดการบีบตัวหรือพังทลาย สารละลายฯที่ใช้มีสองชนิดคือ สารละลายเบ็นโทไนท์ และสารละลายโพลิเมอร์

3.2.3.1. <u>สารละลายเบ็นโทไนท์ (Bentonite slurry)</u>

เสาเข็มระบบเจาะเปียกโดยใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ช่วยในการขุดเจาะได้รับการพิสูจน์ว่าได้ผลดีมาแล้วเป็นเวลานาน มีเพียงส่วนน้อยที่เกิดปัญหาและมีคุณภาพต่ำ Hutchinson et al (1974) ได้สรุปไว้ว่า สารละลายเบ็นโทไนท์มีหน้าที่ (Functions) หลายประการคือ

ก) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผนังรูเจาะพังโดยการสร้างแรงดันต้านไว้

ข) คงอยู่ในหลุมเจาะจนกว่างานก่อสร้างจะเสร็จโดยไม่ไหลซึมหายเข้าไปในชั้นดิน

ค) สามารถลอยแขวนตะกอนดินจากการขุดเจาะไม่ให้ตกทับถมที่ก้นรูเจาะ

ง) สามารถถูกแทนที่โดยคอนกรีตที่เทผ่านท่อเทได้หมดโดยง่าย ซึ่งจะทำให้ได้แรงยึดหน่วงที่ดีระหว่างคอนกรีตผิวเสาเข็มกับผนังรูเจาะ

จ) สามารถแยกเศษดินทรายที่ลอยแขวนออกอยู่ได้ด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก

ฉ) สามารถปั๊มสูบได้โดยง่าย

จะเห็นว่าคุณสมบัติข้อ ก) ถึง ค) ต้องการสารละลายที่หนักและเหนียว (Thick slurries) ขณะที่คุณสมบัติข้อ ง) ถึง ข้อ จ) ต้องใช้สารละลายที่เบาและไม่เหนียว (Fluid slurries) Reese et al (1985) รายงานว่าสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ดีเลิศดังกล่าวนั้นเป็นไปไม่ได้ แต่สารละลายเบ็นโทไนท์สามารถทำหน้าที่ทุกขั้นตอนอย่างได้ผลนั้นมีความเป็นไปได้ด้วยการควบคุมที่ดี (An Ideal Slurry, therefore, is impossible. However, effective slurry is possible with control.) ดังนั้นในระหว่างการก่อสร้าง จำเป็นต้องควบคุมคุณสมบัติของสารละลายให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอนด้วยจึงจะได้สมรรถนะของเสาเข็มที่ดี

คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์จากข้อกำหนดหลายประเทศได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ ผู้ออกแบบจึงเลือกจากมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งในตารางที่ 1 มาใช้ ซึ่งบางมาตรฐานก็ไม่เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ไม่ว่าจะใช้มาตรฐานใดในตารางที่1 ก็ต้องทำการผสมและควบคุมคุณสมบัติให้ถูกต้องในทุกขั้นตอน กล่าวคือจะต้องตรวจสอบ Density, March Viscosity, pH Value, Sand Content และ Fluid Loss การผสมสารละลายเบ็นโทไนท์ โดยทั่วไปถ้าใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง 3.5-6.0% จะได้ค่า Density ระหว่าง1.02-

1.04 g/cm^3 สารละลายซึ่งผสมขึ้นครั้งแรกนี้ เมื่อนำไปใช้และนำกลับมาทำความสะอาดเพื่อนำไปใช้ใหม่ ค่า Density จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่สูงกว่า 1.20 g/cm^3 จะต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติใหม่ หรือทิ้งสารละลายชุดนี้ไปตารางที่ 2 เป็นคุณสมบัติที่กำหนดโดย ICE (1996) และผู้เขียนได้ปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติบางตัวให้เหมาะสมกับการทำงานในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่มี Silt ผสมอยู่ในชั้นดิน (ณรงค์ และคณะ, 2543ก)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ที่รวบรวมมาจากแหล่งต่าง ๆ

Authors	FPS (1975, 1977)	Hutchingson et al. (1975)	FDOT (1987, 1988)	Reese and O' Neil (1988)	ICE (1988)	ACI (1989)	*AASHTO (1992)	*Majano & O' Neil (1993)	*ICE & FPS (1996)
Slurry Type	**Bentonite**	**Calcium Bentonite**	**Bentonite or Attapulgite**	**Bentonite or Attapulgite**	**Bentonite**	**Bentonite or Polymer**	**Bentonite or Attapulgite**	**Bentonite**	**Bentonite**
Density (gm/cc)	<1.10	1.024 to 1.218	1.03 to 1.20	1.03 to 1.20	<1.10	<1.36 (bearing pile) <1.12 (firction pile) <1.02 (Polymer)	1.03 to 1.10 1.03 to 1.20	1.02 to 1.07 1.02 to 1.13	<1.10 <1.15
pH	9.5 to 12	<11.7	8 to 12	8 to 11	9.5 to 12	8 to 12	8 to 11 8 to 11	8 to 10 8 to 10	9.5 to 10.8 9.5 to 11.7
Sand Content	<6% (by weight)	<35% (by weight)	<4% (by volume)	-	-	<4% (bearing pile) <25% (friction pile) <1% (Polymer)	<4% <4% (by volume)	<4 % <10%	<2% <2%
Marsh Funnel Viscosity (sec/Qt)	30 to 90	-	28 to 40	28 to 45	30 to 90	26 to 50	28 to 45 28 to 45	32 to 60 32 to 60	30 to 70 < 90
Plastic Viscosity (cP)	<20	<20	<20	-	<20	-	-	6 to 8.5 6 to 10.0	-
Yield Point (Pa)	-	-	-	-	-	-	-	2 to 6.0 2 to 6.5	-
10 min. Gel Strength (Pa)	4 to 40	3.6 to 20	1.9 to 10	-	4 to 40	-	-	-	4 to 40 4 to 40
Differential Head (m)	>1	-	-	-	-	1.5	-	-	-
Fluid Loss (30 minute test)	-	-	-	-	-	-	-	-	< 40 <60
**Maximum Contact Time (hr.)	-	-	-	-	-	-	-	4	-

Notes : *** Upper line for as supplied to pile and lower line for sample from pile prior to placing concrete**
**** Without agitation and sidewall cleaning**

ตารางที่ 2 Test and compliance values for support fluid (ICE, 1996)

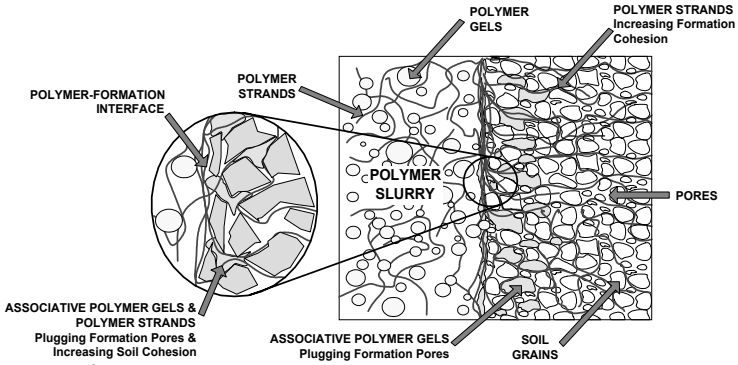
Property to be measured	Test Method and apparatus	API RP13 Section	Compliance values measured at 20 °C	
			As Supplied to pile	Sample from pile prior to placing concrete
Density	Mud balance Low temperature	1	Less than 1.10 g/ml	Less than 1.15 g/ml
Fluid loss (30 minute test)	Test fluid loss	3	Less than 40 ml	Less than 60 ml
Viscosity	Marsh Cone	2	30 to 70 seconds (27 - 50)$^{(1)}$	Less than 90 sec. (Less than 60 sec.)$^{(1)}$
Shear strength (10 min gel strength)	Fann Viscometer	2	4 to 40 N/m^2	4 to 40 N/m^2
Sand Content	Sand screen set	4	Less than 2%	Less than 2%
PH	(2)		9.5 - 10.8 (8 - 11)$^{(1)}$	9.5 - 11.7 (<12)$^{(1)}$

หมายเหตุ 1) ตัวเลขในวงเล็บเป็นความเห็นของผู้เขียน

2) วัดโดย Electrical pH meter แต่ใช้ pH paper แทนได้

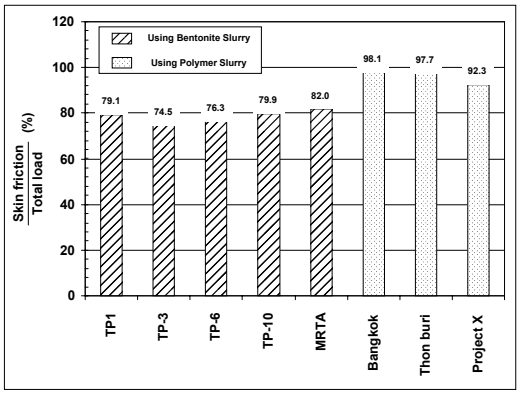
3.2.3.2. <u>สารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Slurry)</u>

แม้นสารละลายเบ็นโทไนท์จะมีข้อดีอยู่มากมายหลายประการแต่สารละลายเบ็นโทไนท์มีข้อเสียคือก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเบ็นโทไนท์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้และอนุภาคของเบ็นโทไนท์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาด้านฝุ่นละออง เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเอาโพลิเมอร์มาใช้ เพราะโพลิเมอร์เป็นสารประเภท Hydrocarbon ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจึงได้มีการทำสารละลายโพลิเมอร์มาใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในหลายๆ โครงการ (ณรงค์และคณะ, 2543ข) สารละลายโพลิเมอร์มีกลไกในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะโดยใช้เส้นใย (Strand) และ Gel เข้าไปอุดช่องว่างในดินและทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินดีขึ้น (รูปที่ 11)

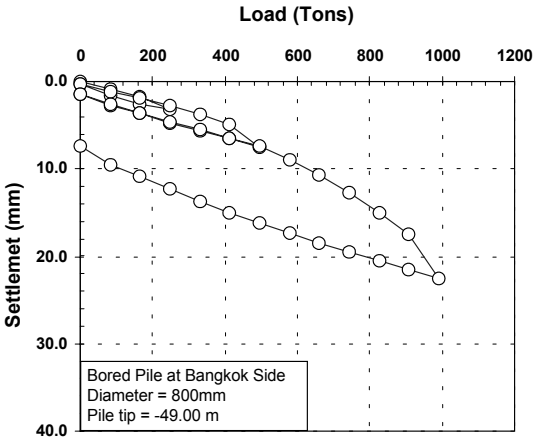


รูปที่ 11 หลักการของสารละลายโพลีเมอร์ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

จากผลการทดสอบหลายโครงการพบว่าค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มมีแนวโน้มสูงกว่าเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ (รูปที่ 12) จะเห็นได้ว่าสัดส่วนแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะที่ใช้โพลิเมอร์จะค่อนข้างสูงกว่าเสาเข็มเจาะที่ใช้เบนโทไนท์ รูปที่13 เป็นผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างของโครงการก่อสร้างสะพานยกระดับรับสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ในการใช้สารละลายโพลีเมอร์ข้อสำคัญที่ควรระวังก็คือจะต้องศึกษาชั้นดินแต่ละแห่งอย่างละเอียดว่ามีความเหมาะสมที่จะนำโพลิเมอร์มาใช้หรือไม่เพราะในชั้นดินที่เป็นทรายหยาบจะเกิดปัญหา High Fluid Loss นอกจากนี้สารละลายโพลิเมอร์ยังมีDensity ต่ำกว่าสารละลายเบ็นโทไนท์ทำให้แรงดันของสารละลายฯ ในหลุมเจาะจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันจากสารละลายเบนโทไนท์



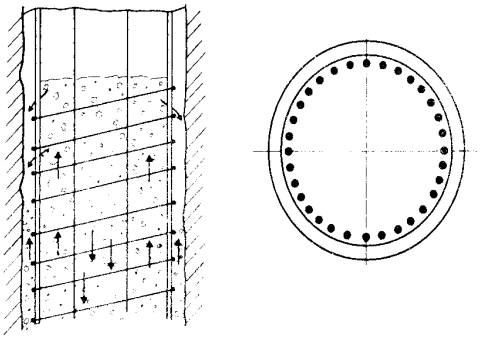
รูปที่ 12 สัดส่วนของแรงเสียดทานที่ผิวต่อน้ำหนักบรรทุกทดสอบของเสาเข็มเจาะที่ใช้เบ็นโทไนท์กับเสาเข็มเจาะที่ใช้โพลิเมอร์



รูปที่ 13 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะโดยใช้โพลีเมอร์ขนาด 800mm ลึก 47 เมตร (ณรงค์ และคณะ, 2543ข)

3.2.4. เหล็กเสริมเสาเข็ม

ปริมาณเหล็กเสริมในเสาเข็มขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรากกล่าวคือหากรับแรงกดอย่างเดียว เหล็กเสริมยืนจะใช้ประมาณ 0.5% ของหน้าตัดเสาเข็ม หากต้องรับโมเมนต์ดัด หรือแรงดันด้านข้าง ปริมาณเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับการคำนวณ อย่างไรก็ดี ปริมาณเหล็กเสริมยืนไม่ควรมีปริมาณเกิน 1% ของหน้าตัดเสาเข็มเพราะหากปริมาณมากเกินไป เมื่อเทคอนกรีตใต้น้ำผ่านท่อเทคอนกรีตอาจไหลผ่านเหล็กเสริมยืนออกไปไม่ได้ ทำให้เหล็กเสริมไม่มีคอนกรีตหุ้ม (รูปที่ 14) และไม่ควรเสริมเหล็กเพียงบางส่วนแต่ควรกำหนดความยาวโครงเหล็กเสริมให้ยาวตลอดความยาวเสาเข็ม



รูปที่ 14 เหล็กเสริมที่มีปริมาณมากเกินไป (Flemming et al, 1977)

3.2.5. คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะระบบเปียก

คอนกรีตสำหรับเสาเข็มระบบเจาะเปียกก่อสร้างในชั้นดินปกติทั่วไปนั้น Fleming and Sliwinski (1977) ได้แนะนำส่วนผสมไว้นานแล้วแต่ยังใช้ได้ดี ตามตารางที่ 3 และ Bartholomew (1979) ยังได้แนะนำให้ปรับเปลี่ยนส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูนซีเมนต์ใน

ปริมาณที่แตกต่างกันให้เหมาะสมกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่มีสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงในระดับต่างๆ กันไว้ ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ข้อแนะนำส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเสาเข็มเจาะเปียกโดยสารละลายเบ็นโทไนท์ Fleming and Sliwinski (1977)

ค่าการยุบตัว	> 175 มิลลิเมตร
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ต่ำกว่า 0.6
ชนิดของหินผสม	ถ้าเป็นไปได้ให้ใช้หินทรงกลมจากธรรมชาติ, ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร
ชนิดของทรายผสม	ทรายธรรมชาติ (Natural and complying with zone 2 or 3 grading)
ปริมาณทราย	30 ถึง 45% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด
ปริมานปูนซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
สารผสมเพิ่ม	แนะนำให้ใส่สารผสมเพิ่มที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการลื่นไหลดีขึ้นและหน่วงเวลาการก่อตัวให้นานขึ้น

ตารางที่ 4 ข้อแนะนำปริมาณปูนซีเมนต์และ W / C ของคอนกรีตเสาเข็มในชั้นดินต่างๆ Bartholomew (1979)

ชนิดเสาเข็ม	คุณสมบัติของคอนกรีต	สภาวะแวดล้อม		
		ปกติ (ก)	ความรุนแรงในชั้นดินระดับปานกลาง (ข)	ความรุนแรงในชั้นดินระดับสูงมาก (ค)
เสาเข็มเจาะแห้ง	ปริมาณซีเมนต์(กก.ต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	300 –450 0.5 –0.55	350 – 450 0.475 –0.5	380 –500 0.45- 0.5
เสาเข็มเจาะเปียก	ปริมาณซีเมนต์(กก.ต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	350-450 0.5 – 0.6	350 –450 0.475 – 0.5	400 – 500 0.43 – 0.45

นอกจากนั้นแล้ว Reese and O'Neill (1988) ยังได้กล่าวไว้ว่าคอนกรีตที่เหมาะกับงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกนั้น ต้องผสมให้คุณสมบัติดีกว่าคอนกรีตโครงสร้างปกติบนดินหลายประการคือ ต้องมีความสามารถลื่นไหลได้ดี (Excellent Fluidity), ต้องสามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง (Self compaction under self-weight), ต้องทนทานต่อการแยกตัวและการเยิ้ม (Resistance to Segregation and Bleeding), ต้องสามารถหน่วงเวลาการก่อตัวได้ (Controlled setting), ต้องสามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่ปกติ (Resistance to harsh environment), ทนทานต่อการไหลชะทำลายโดยน้ำใต้ดิน (Resistance to leaching) และต้องมีกำลังอัดที่ต้องการ (Appropriate Strength and Stiffness)

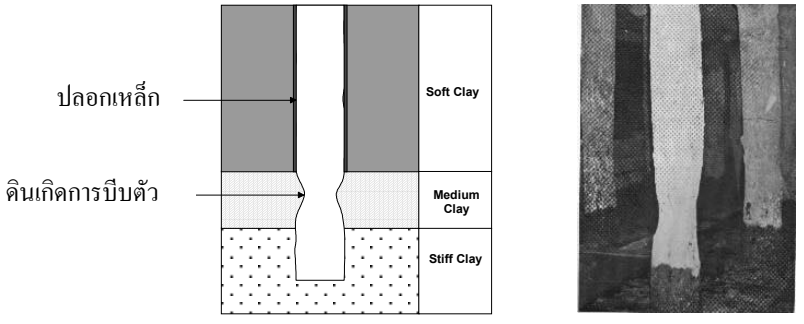
ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานในสนามส่วนใหญ่ จะพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตจากผลการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test), ระยะเวลาการหน่วงการแข็งตัว (Retardation Time) และกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) เป็นเกณฑ์ ซึ่งความจริงแล้วการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตอาจบอกถึงความสามารถในการเทได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น แต่จะไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงการเกาะตัวและความทนทานในการแยกตัว (Cohesiveness และ Resistance to Segregation) ของคอนกรีตได้เลย ทำให้การเทคอนกรีตเสาเข็มระบบเปียกภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์อาจเกิดปัญหาขึ้นได้ ทั้งในขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่และแข็งตัวในภายหลังแล้ว

4. ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นและแนวทางการป้องกัน

4.1 ปัญหาในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบแห้ง

4.1.1. การกดปลอกเหล็กชั่วคราวป้องกันดินพังในเสาเข็มเจาะระบบแห้ง

สำหรับสภาพธรณีวิทยาที่มีชั้นดินอ่อนด้านบนและต่อด้วยชั้นดินแข็งที่มีเสถียรภาพ (เช่นในชั้นดินกรุงเทพฯ) หลุมเจาะส่วนบนต้องได้รับการป้องกันโดยปลอกชั่วคราวกันดินพัง ในกรณีหลังนี้การไส่ปลอกเหล็กกันดินอ่อนพังต้องมีความยาวเพียงพอต่อการป้องกันชั้นดินอ่อนและชั้นดินอ่อนเกือบแข็งด้วย ซึ่งมักจะไม่มีปัญหาสำหรับการเจาะโดยเครื่องสว่านหมุนเนื่องจากปลอกเหล็กยาวเป็นท่อนเดียวและกดโดย Vibro hammer สำหรับในกรณีที่ใช้เครื่องเจาะสามขาเจาะพนักงานขุดเจาะมักจะตอกปลอกเหล็กชั่วคราวต่อกันลงไปเป็นท่อนๆมีความลึกเพียงป้องกันชั้นดินอ่อน มีความลึกไม่พอป้องกันชั้นดินอ่อนเกือบแข็ง ซึ่งชั้นดินอ่อนเกือบแข็งนี้จะไม่พังทลายในทันที่แต่จะเกิดการบีบตัวทำให้หลุมเจาะเล็กลงจนเกิดการคอดตัวของเสาเข็ม ตามรูปที่ 15 ดังนั้นความลึกของปลายปลอกเหล็กชั่วคราวต้องมีความลึกถึงระดับบนของชั้นดินแข็ง (Stiff clay)



รูปที่ 15 ซ้ายมือ ความลึกปลายปลอกเหล็กไม่ถึงชั้นดินแข็งทำให้หลุมเจาะบีบตัว
ขวามือ ทำให้เสาเข็มเกิดการคอดตัว

4.1.2. การเจาะดินเสาเข็มระบบเจาะแห้ง

การเจาะดินภายในปลอกเหล็กกระทำโดยการใช้สว่านในกรณีที่ใช้เครื่องเจาะแบบสว่านหมุนตามรูปที่ 16 หรือกระบอกเก็บดินในกรณีใช้เครื่องเจาะแบบสามขาทิ้งกระแทกดินให้ติดในกระบอกเหล็กและนำขึ้นมาทิ้งด้านบนตามรูปที่ 17 ระหว่างการเจาะจะต้องคอยสังเกตสีและความแข็งของดินที่ขุดเจาะขึ้นมา เพื่อตรวจดูว่าระดับความลึกของหลุมเจาะที่เจาะได้อยู่ที่ระดับใดที่รูเจาะจะมีเสถียรภาพเองได้โดยไม่บีบตัวเล็กลงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความยาวปลอกเหล็กที่ตอกลงไปแล้ว การวัดต้องใช้เทปวัดระยะถ่วงน้ำหนักหย่อนลงไปวัด ในกรณีที่เจาะโดยเครื่องสามขาพนักงานเจาะมักจะใช้ไม้เป็นท่อนความยาวหนึ่งเมตรทาบสลิงเจาะวัดระยะทบความยาวไปเรื่อยๆ การวัดวิธีนี้มักจะผิดพลาดได้ง่าย มีการตรวจพบอยู่เป็นประจำว่าความลึกของหลุมเจาะที่วัดโดยวิธีนี้มีค่าลึกกว่าความลึกจริงที่เจาะไว้เมื่อวัดโดยสายเทปมาตรฐานที่มีความยาวต่อเนื่อง นอกจากนั้นระหว่างการเจาะต้องหมั่นสังเกตชั้นดินที่เหมาะสมสำหรับหยั่งปลายเสาเข็ม (Pile Toe) ถ้าปลายเสาเข็มเจาะระบบแห้งนี้หยั่งลึกถึงชั้นทรายที่มีน้ำใต้ดินแล้ว (Sand Layer or Clayey/ Silty Sand Layer) ก้นรูเจาะจะไม่สามารถคงสภาพแห้งได้ ปลายเสาเข็มเจาะแห้งนี้จึงเหมาะกับชั้นดินชนิดดินแข็ง (Stiff to Hard Sandy /Silty Clay) ซึ่งเป็นชั้นดินที่ทึบน้ำ (Impermeable Soil) ก้นรูเจาะจึงจะแห้งได้ ดังนั้นผู้ควบคุมงานต้องคอยตรวจสอบชั้นดินเป็นระยะๆ และต้องตรวจสอบก้นหลุมเจาะระดับสุดท้ายว่ามีความสะอาดไม่มีเศษดินล่วงหล่นอยู่ก้นหลุม เพราะวัสดุที่ตกหล่นอยู่ก้นหลุมจะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มลดลงได้ และห้ามใช้สว่านหรือกระบอกเจาะดิน (Clay Cutter) ของเสาเข็มขนาดเล็กกว่ามาตรฐานมาใช้เจาะดินที่ระดับใต้ปลายปลอกเหล็ก เพราะจะทำให้ขนาดของเสาเข็มระดับใต้ปลายปลอกเหล็กมีขนาดเล็กกว่าที่ออกแบบไว้ได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากปริมาณคอนกรีตที่เทลงไปในหลุมเจาะ วิธีป้องกันที่ดีที่สุดคือการไม่อนุญาตให้นำกระบอกเก็บดินของเสาเข็มขนาดเล็กกว่าขนาดมาตรฐานที่ใช้เจาะเข้ามาไว้ในหน่วยงาน



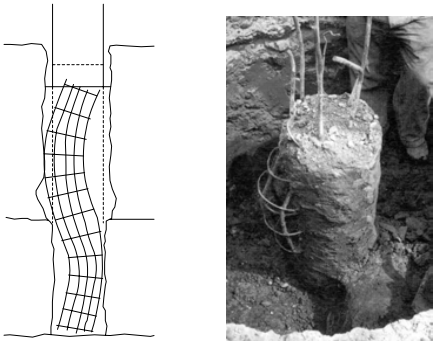
รูปที่ 16 สว่านเจาะดิน



รูปที่ 17 กระบอกเก็บดิน

4.1.3. การติดตั้งโครงเหล็กเสริมเสาเข็ม

ควรกำหนดให้ติดตั้งโครงเล็กเสริมยาวตลอดต้น โครงเหล็กเสริมต้องผูกให้แน่นหนาเพื่อป้องกันการโก่งงอเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตที่ทรุดตัวลง (Slumping of Concrete) ตามรูปที่ 18 และต้องเผื่อระยะให้คอนกรีตหุ้มโครงเหล็กเสริมไว้ 7.5 ซม. นอกจากนั้นแล้วในกรณีเสาเข็มเจาะสามขาก่อนถึงเวลาทำการเทคอนกรีตไม่นานนัก ให้ทำการขยับโครงเหล็กขึ้นลงเล็กน้อย หากไม่สามารถขยับได้โดยง่าย แสดงว่ารูเจาะระดับใต้ปลอกเหล็กเกิดการบีบตัวเล็กลง ต้องแก้ไขรูเจาะใหม่โดยตอกปลอกเหล็กให้ลึกขึ้น และต้องตรวจสอบให้มั่นใจว่ามีการใส่โครงเหล็กครบไม่ได้ใส่ไว้แต่เฉพาะส่วนบน จึงควรนับโครงเหล็กที่ผูกไว้ล่วงหน้าทุกวัน ให้มั่นใจว่าได้มีการใส่โครงเหล็กลงไปยาวตลอดทั้งต้น



รูปที่ 18 โครงเหล็กงอเนื่องจากคอนกรีตทรุดตัวทำให้เหล็กโผล่

4.1.4. คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้และการเทคอนกรีตโดยตรงลงไปในรูเจาะ

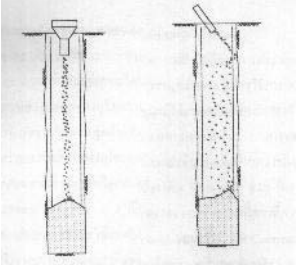
คุณสมบัติของคอนกรีตสดที่ใช้นอกจากออกแบบให้มีกำลังอัดตามต้องการแล้วยังต้องพิจารณาออกแบบให้เป็นคอนกรีต ที่มีลักษณะการเกาะตัวกันดี (Cohesive Concrete) ไม่เกิดการแยกตัวหรือเกิดการเยิ้ม (Resistance to Segregation or Bleeding) ในขณะเท มีความสามารถในการเทที่ดี (Good Workability Concrete) และมีความคงทนสูง (High Durability Concrete) ค่าการยุบตัว (Concrete Slump) ควรกำหนดไว้ระหว่างประมาณ 10.5 ถึง 15.5 ซม.การใช้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวน้อยเกินไปหรือใช้คอนกรีตแห้งเทลงไปที่ก้นหลุมแล้วใช้ลูกตุ้มตำให้แน่นตัวมีแต่ผลเสียมากกว่าผลดี Thorburn et al, (1977) รายงานว่าการใช้คอนกรีตที่มีความสามารถในการเทที่ต่ำ (Low workability concrete) จะเป็นสาเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้เสาเข็มเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ ตามรูปที่ 19 กรณีที่เสาเข็มสามขาที่ใช้คอนกรีตผสมเองโดยโม่ขนาดเล็ก ต้องควบคุมไม่ให้เกิดการผสมปูนซีเมนต์แต่น้อยแต่ใส่หินและทรายมาก หรือใช้ปูนซีเมนต์ผิดประเภท ควรตรวจนับถุงปูนที่ใช้แล้วทุกวัน ถุงปูนที่ใช้แล้วไม่ควรให้เก็บไว้ในหน่วยงานเพราะอาจเผลอเรอนำไปนับซ้ำในวันหลังได้อีก





รูปที่ 19 คอนกรีตเสาเข็มเกิดข้อบกพร่องเนื่องจาก Low workability concrete mix

การเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะระบบแห้งนั้น ADSC (1995) ได้เคยวิจัยและสรุปว่าสามารถเทคอนกรีตโดยตรงจากปากรูลงไปในรูเจาะได้ แต่ให้เทผ่านกรวยขนาดสั้นที่ปากรูเจาะเพื่อให้คอนกรีตตกกระแทกก้นรูอย่างอิสระปราศจากการกระแทกถูกโครงเหล็กหรือผิวผนังรูเจาะ ปัญหาที่มักจะพบเห็นคือชุดทำงานขี้เกียจยกกรวยเทคอนกรีตมาใช้หรืออาจไม่ได้เตรียมไว้เลย ทำให้คอนกรีตที่เทลงไปไม่ตกกระแทกก้นหลุมโดยตรง แต่ตกกระแทกกับโครงเหล็กลงไปทำให้คอนกรีตอาจเกิดการแยกตัว ตามรูปที่ 20 ได้และในกรณีที่รุนแรงอาจกระแทกผนังดินรูเจาะพังลงผสมกับคอนกรีตได้เช่นกัน ดังนั้นผู้ควบคุมงานควรกำหนดให้เทคอนกรีตผ่านกรวยที่ปากรูเจาะทุกครั้งเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวข้างต้นซึ่งขั้นตอนดังกล่าวไม่ทำให้ต้นทุนการทำเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด และมาตรฐาน ADSC (1995) อนุญาตให้เทคอนกรีตระบบแห้งแบบ Free Fall ได้ หากปริมาณน้ำซึมที่ก้นรูเจาะสูงไม่เกิน 5 ซม. และ Thorburn et al (1997) รายงานว่า เมื่อมีน้ำซึมสะสมที่ก้นหลุมมากเกินไป คอนกรีตที่เทลงไปแบบ Free fall จะเกิดการแยกตัว ตามรูปที่ 21



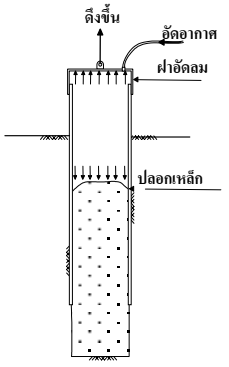
รูปที่ 20
ซ้ายมือ เทคอนกรีตถูกวิธี
ขวามือ เทคอนกรีตผิดวิธี



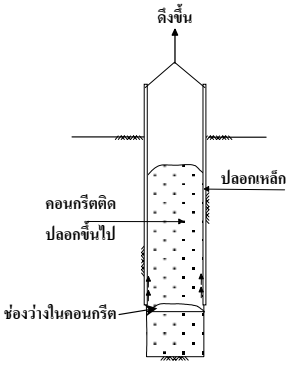
รูปที่ 21 คอนกรีตปลายเสาเข็มแยกตัวเนื่องจากมีน้ำซึมสะสมที่ก้นรูเจาะมาก (after Thorburn et al, 1977)

4.1.5. การถอนปลอกเหล็ก

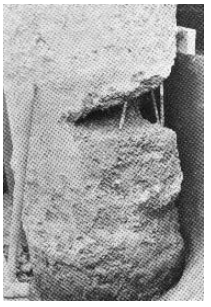
ในกรณีเครื่องเจาะแบบสามขา หลังจากเทคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออกทีละท่อน เมื่อถอดออกมาแต่ละท่อนแล้ว ต้องล้างเศษปูนที่ติดภายในปลอกเหล็กทันที เพื่อให้มั่นใจได้ว่าไม่มีเศษปูนแข็งตัวติดอยู่ในปลอกเหล็กขณะก่อสร้างต้นต่อไป การที่มีเศษปูนติดภายในปลอกเหล็กจะทำให้ความฝืดระหว่างผนังปลอกเหล็กกับคอนกรีตสดที่เทลงไปมีมาก เสี่ยงต่อคอนกรีตขยับตัวติดขึ้นมาขณะกำลังถอนปลอกเหล็ก วิธีถอนที่ดีและมีประสิทธิภาพต่อการป้องกันคอนกรีตติดขึ้นมาดีที่สุดคือการใช้ความดัน (Pressure) จากเครื่องอัดลมช่วยในการถอน ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เองเป็นที่มาของชื่อเพรสเชอร์ไพลิ่ง (Pressure Piling) ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนๆ ความดันจะช่วยดันปลอกเหล็กให้ถอนง่ายขึ้น และความดันจะกดลงที่ผิวหน้าคอนกรีตไม่ให้คอนกรีตขยับติดปลอกเหล็กขึ้นมาด้วย (รูปที่ 22) ควรถอนแบบนี้ประมาณสองถึงสามปลอกจนเห็นว่าแรงฝืดระหว่างปลอกเหล็กกับคอนกรีตและระหว่างปลอกเหล็กกับดินเหลือน้อยแล้ว จึงทำการถอนโดยตรงอย่างเดียวต่อไป ปัญหาที่พบส่วนมากเกิดจากชุดเหมาทำงานทำการถอนปลอกเหล็กโดยตรงไม่ใช้ความดันช่วย ทั้งที่ไม่ทำให้ต้นทุนเพิ่ม จึงทำให้คอนกรีตที่ปลายปลอกเหล็กอาจขยับติดปลอกขึ้นมาจนทำให้ดินอ่อนใต้ปลอกเหล็กไหลทะลักเข้ามาและคอนกรีตที่ขยับติดขึ้นมาหล่นลงมาผสมกับดิน (รูปที่ 23 ก. และรูปที่ 23 ข.) จนทำให้เสาเข็มขาดความมั่นคง ดังนั้นผู้ควบคุมงานควรกำหนดให้ถอนปลอกเหล็กช่วงแรกโดยใช้แรงดันช่วยด้วย ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพงานดีขึ้นมาก



รูปที่ 22 ถอนโดยใช้ Pressure



รูปที่ 23 ก. ถอนโดยไม่ใช้ Pressure



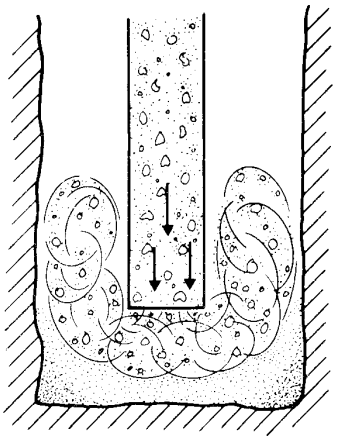
รูปที่ 23 ข. ดินแทรกในคอนกรีต

after Thorburn et al, 1977

4.2 ปัญหาในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก

4.2.1 การทำความสะอาดก้นหลุมและทดสอบสารละลายฯ

การเจาะดินจะมีเศษดินและตะกอนตกสะสมที่ก้นหลุมและสารละลายฯจะข้นเหนียวไม่เหมาะที่คอนกรีตจะแทนที่ได้หมด จึงต้องทำความสะอาดก้นหลุมอาจใช้ Cleaning Bucket หรือระบบ Recycle (Air Lift) เพื่อแยกตะกอนดินทรายออกจากสารละลายฯและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายฯที่ก้นหลุมขึ้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ขั้นตอนนี้สำคัญเพราะหากก้นหลุมไม่สะอาดหรือสารละลายฯเหนียวหนักเกินไปคอนกรีตจะไล่แทนที่สารละลายฯได้ไม่หมด (รูปที่ 24) ทำให้แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มลดลงหรืออาจเกิด Soft toe การทำความสะอาดนี้เป็นขั้นตอนสำคัญไม่สามารถลัดขั้นตอนได้ แต่เป็นที่น่าเสียดายและน่าอันตรายที่พบว่ายังมีผู้ประกอบการหลายรายทั้งจากท้องถิ่นและจากต่างประเทศก่อสร้างลัดขั้นตอนโดยละเว้นไม่ปฏิบัติในขั้นตอนนี้ ทำให้พบว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างแล้วมีสมรรถนะในการรับน้ำหนักต่ำกว่าปกติ



รูปที่ 24 ก้นหลุมตะกอนหนาคอนกรีตแทนที่ไม่หมด (Flemming et al, 1977)

4.2.2. ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มเนื่องจากความผันแปรของคอนกรีต

คอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกที่ถือว่ามีคุณภาพดีนั้นต้องมีคุณสมบัติครบถ้วนทั้งขณะที่ยังเหลวอยู่ และเมื่อแข็งตัวแล้วด้วย กล่าวคือขณะยังเหลวจะต้องมีความเหลวเพียงพอต่อการเทผ่านท่อ Tremie Pipe และสามารถลื่นไหลเข้าไปเต็มทุกส่วนของรูเจาะได้, มีการยึดเกาะตัวกันดีทั้งในขณะขนส่งและขณะทำการเทผ่านท่อ, สามารถอัดตัวแน่นได้เองด้วยน้ำหนักตัว, เนื้อคอนกรีตต้องมีความสม่ำเสมอไม่เกิดสภาวะการแยกตัวและเกิดการเยิ้มของน้ำในเนื้อคอนกรีตทั้งในขณะและหลังการเท, เมื่อแข็งตัวแล้วต้องมีกำลังอัดตามต้องการ, ต้องมีความคงทนทั้งในระยะสั้นและยาวและคอนกรีตต้องต้านทานการซึมของน้ำได้ดี ส่วนผสมคอนกรีตแม้จะถูกออกแบบและกำหนดไว้อย่างดีแล้ว แต่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเสร็จออกมาแล้วก็ยังอาจเกิดความผันแปรจนก่อปัญหาต่อความสมบูรณ์ของเสาเข็มได้จากสาเหตุหลายประการ คือ

4.2.2.1 สาเหตุจากผู้ผลิตคอนกรีต: เนื่องจากวัสดุส่วนผสมส่วนใหญ่นำมาจากธรรมชาติ คุณสมบัติจึงไม่ค่อยแน่นอน เช่นความละเอียดของทรายซึ่งจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา, กรรมวิธีและช่วงเวลาที่นำขึ้นมาใช้เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังอาจมีความไม่แน่นอนเนื่องจากการชั่ง

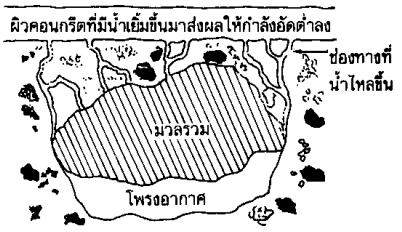
ตวงส่วนผสม ซึ่งความผิดพลาดในการชั่งตวงอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการควบคุมการผลิต, เทคนิคการขนส่ง ความผันแปรเช่นนี้หากเกิดขึ้นกับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปจะเกิดปัญหาไม่มากนักเนื่องจากจะกระจายทั่วไปในแนวราบ แต่ในงานเสาเข็มเจาะเป็นโครงสร้างหน้าตัดแคบๆ ที่ก่อสร้างในแนวดิ่ง ความผันแปรหากเกิดขึ้นจะเป็นชั้นๆ จนก่อปัญหาขึ้นมากกว่างานหล่อโครงสร้างทั่วไปในแนวราบ

4.2.2.2 สาเหตุจากเนื้อคอนกรีตเอง: คอนกรีตเป็นวัสดุเนื้อผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์, หิน, ทราย, น้ำ, และน้ำยาผสมคอนกรีตนำมาผสม รวมกันเป็นคอนกรีตสด หินที่อยู่ในส่วนผสมจะถูกพยุงไม่ให้เกิดการแยกตัวด้วยมอร์ต้า แต่แรงดึงดูดของโลกไม่เพียงแต่ทำให้หินทรายจมตัวลงแต่รวมถึงเม็ดปูนซีเมนต์ด้วย ดังนั้นหากส่วนผสมของคอนกรีตผสมออกมาแล้วเกิดการยึดเกาะกันไม่ดีพอ หิน, ทรายและปูนซีเมนต์จะจมตัวลงในเนื้อคอนกรีตสด จนเมื่อแรงต้านการจมตัวมากกว่าน้ำหนักของหินทรายหรือเม็ดปูนหรือจนเมื่ออนุภาคของหินทรายสัมผัสกันจนเป็นโครงข่าย ผลก็คือน้ำที่เบาที่สุดจะถูกดันขึ้นสู่ด้านบนจนเกิดการเยิ้ม (Bleeding) ขึ้น ตามรูปที่ 25 ซึ่งการเยิ้มนี้ก็คือการแยกตัวชนิดหนึ่งนั่นเอง และน้ำบางส่วนที่เยิ้มจะถูกกักไว้ใต้มวลรวม ตามรูปที่ 26 เมื่อคอนกรีตแข็งตัวบริเวณที่น้ำถูกกักไว้นี้จะเป็นโพรงอากาศ (Air Pocket) ซึ่งถ้าคอนกรีตเกิดการแยกตัว (Segregation) ด้วยก็ยิ่งทำให้ความพรุนมีมากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้น้ำซึมผ่านเข้าในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น (High Permeability Concrete) เกี่ยวกับการเยิ้มของน้ำนี้ Fleming et al (1992) ได้สำรวจและกล่าวว่าอาจจะพบเห็นการเยิ้มนี้ในคอนกรีตเสาเข็มเจาะ โดยน้ำอาจจะใช้ช่องทางซึมขึ้นมาตามแนวเหล็กเสริมยืนหรือตรงตำแหน่งเดิมของท่อเทคอนกรีต (Tremie Pipe) สู่ด้านบนได้ ซึ่งความผันแปรของคุณสมบัติคอนกรีตจากการเยิ้มนี้เคยพบเห็นว่าเกิดขึ้นกับงานเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ ตามรูปที่ 27 และเคยสำรวจพบว่าหัวเสาเข็มระบบเจาะเปียกในกรุงเทพฯ ที่เทคอนกรีตซึ่งมีค่ายุบตัวประมาณ 20 ซม.ไว้สูงจนถึงระดับพื้นดิน เมื่อเวลาผ่านไปประมาณครึ่งชั่วโมงเกิดมีน้ำปุดขึ้นมาให้เห็น และเมื่อเวลาผ่านไปสองชั่วโมงพบว่าระดับคอนกรีตหัวเสาเข็มที่เทไว้สูงวัดได้ว่าเกิดทรุดตัวต่ำลงไปถึง 80 ซม โดยจะมีน้ำเยิ้มขึ้นมาแทนที่ตลอดเวลา (เป็นการแสดงว่าการเยิ้มของน้ำในคอนกรีตจะทำให้ระดับคอนกรีตหัวเสาเข็มที่แข็งตัวแล้วมีระดับต่ำกว่าระดับคอนกรีตที่วัดไว้ขณะที่ยังเหลวอยู่ได้) ต่อมาได้ทำการเจาะเอาแก่นคอนกรีตหัวเสาเข็มที่แข็งตัวแล้วถึงความลึกประมาณ 5 เมตรขึ้นมาพบว่าคอนกรีตมีสภาพพรุนและกำลังต่ำ ตามรูปที่ 28 สาเหตุของปัญหาเกิดจากการเยิ้มทำให้มวลหยาบจมตัวลงเบื้องล่างดันน้ำในเนื้อคอนกรีตขึ้นสู่ด้านบน การซ่อมแซมหัวเสาเข็มนี้ผู้รับเหมาหลักที่ซื้อคอนกรีตมาใช้ได้ทำการสกัดคอนกรีตหัวเสาเข็มส่วนที่คุณสมบัติเกิดการผันแปรจนถึงระดับคอนกรีตที่แน่นตัว (Dense) ดีแล้วจึงหล่อคอนกรีตขึ้นมาใหม่โดยผู้ขายคอนกรีตรับค่าใช้จ่าย การเยิ้มของน้ำในคอนกรีตเป็นปัญหาหลักของข้อบกพร่องของคอนกรีตในงานเสาเข็มระบบเจาะเปียก เนื่องจากไม่สามารถตรวจพบการเยิ้มล่วงหน้า

ก่อนและภายหลังการเทในสนามได้ เพราะหัวเสาเข็มส่วนใหญ่อยู่ต่ำกว่าระดับผิวดินมาก และการเยิ้มจะเกิดขึ้นในขั้นตอนที่เทคอนกรีตเสร็จแล้วและคอนกรีตกำลังอยู่ในสภาวะนิ่งก่อนการก่อตัว (Bleeding occurs during the dormant period before the initial setting of the concrete: Sliwinski and Fleming, 1982) แต่จะทราบว่าเกิดการเยิ้มขึ้นหลังจากการขุดเพื่อก่อสร้างฐานรากแล้ว ความผันแปรของคอนกรีตจากการเยิ้มอาจเกิดขึ้นในขณะกำลังเทคอนกรีตผ่านท่อเทใต้น้ำได้เช่นกัน หากเกิดการเทคอนกรีตอย่างไม่ต่อเนื่องเช่นรอรถคอนกรีตแต่ละคันนานเกินไป แล้วคอนกรีตที่อยู่ภายในท่อเทที่ระดับล่างๆจะถูกอัดแน่นด้วยน้ำหนักของคอนกรีตส่วนบนและน้ำจะถูกผลักขึ้นไปด้านบนภายในท่อเทจนทำให้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ของคอนกรีตที่ระดับล่างของท่อมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถไหลได้โดยแรงโน้มถ่วง (Gravity) ทำให้เกิดการติดขัด (Blockage)ในท่อได้เช่นกัน ตามรูปที่ 29 ปัญหาการเยิ้มอาจลดลงได้โดยการใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดการเยิ้ม (Anti-Bleed Admixture) เข้าช่วย หรือใช้มวลผสมหยาบตามธรรมชาติรูปทรงกลมเช่นกรวด (แต่หายาก) และผสมปริมาณทรายที่ไม่มากเกินไป เพราะปริมาณมากจะทำให้การเยิ้มเกิดขึ้นได้มาก



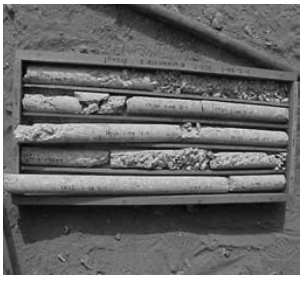
รูปที่ 25 ลักษณะการเยิ้มที่เกิดขึ้นในคอนกรีต



รูปที่ 26 น้ำที่เยิ้มบางส่วนถูกกักไว้ใต้มวลรวม(ชัชวาลย์ ,2536)



รูปที่ 27 น้ำซึมขึ้นตามแนวเหล็กเสริมยืนและตามแนวเก่าของท่อ Tremie(ณรงค์, 2543)



รูปที่ 28 สภาพคอนกรีตที่เจาะขึ้นมาจากหัวเสาเข็มเจาะที่คอนกรีตเกิดมีการเยิ้ม (after Thasnanipan et al, 2000)



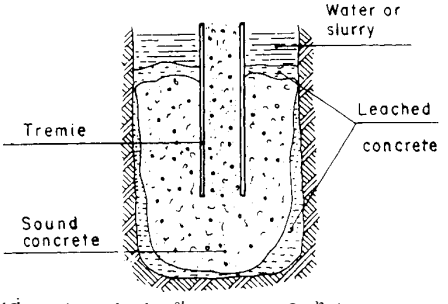
รูปที่ 29 คอนกรีตอัดแน่นในท่อ Ttemie เนื่องจากความผันแปรของคอนกรีต (ณรงค์, 2543)

4.2.2.3 จากการอัดตัวแน่นที่ไม่สมบูรณ์: คอนกรีตงานโครงสร้างบนดินโดยทั่วไปจะถูกทำให้อัดตัวแน่นโดยการจี้ไล่ฟองอากาศออก แต่ธรรมชาติของงานเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะไม่สามารถไล่ฟองอากาศออกเพื่อให้คอนกรีตแน่นตัวโดยการจี้ได้ ดังนั้นถ้าคอนกรีตที่ผสมมาไม่สามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเองแล้วคอนกรีตจะเกิดการพรุน ทำให้กำลังอัด, ความสมบูรณ์และความทนทานของคอนกรีตลดน้อยลงไป Xanthakos (1994) ได้แนะนำว่า คอนกรีตที่เทใต้น้ำผ่านท่อเทที่จะสามารถอัดแน่นโดยน้ำหนักตัวเองได้ดี ควรมีค่า Compaction Ratio ของคอนกรีตประมาณ 0.95 –0.96

4.2.3. การเทคอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะ

การเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผ่านท่อเท (Tremie Concrete) เป็นขั้นตอนที่สำคัญสูงสุด เพราะเป็นการหล่อผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งาน (End Product) หากควบคุมการเทคอนกรีตไม่ดีและผิดขั้นตอนจะทำให้ความสมบูรณ์ (Integrity) ของเสาเข็มเสียหายและสมรรถนะในการรับน้ำหนักลดลง ปัญหาต่างๆ ในการเทคอนกรีตใต้น้ำสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

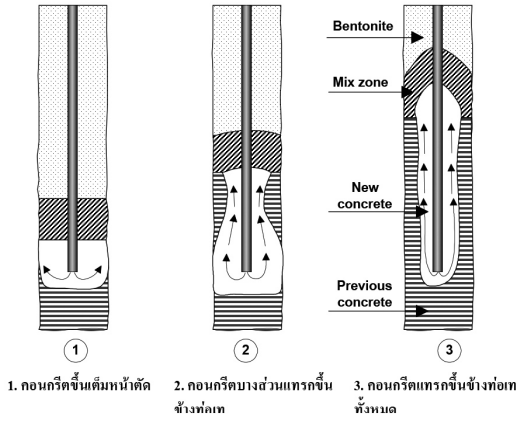
1. เทคอนกรีตชุดแรก (First Batch) ทะลุตัวกันน้ำ (Plug) ทำให้คอนกรีตผสมกับสารละลายฯโดยตรง
2. วางปลายท่อห่างก้นหลุมมากเกินไป ทำให้คอนกรีตผสมกับสารละลายเบ็นโทไนท์ (รูปที่ 30)



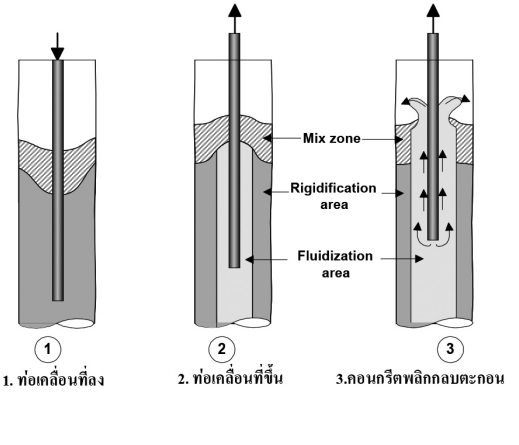
รูปที่ 30 ปลายท่อห่างก้นหลุมมากเกินไป (Reese et al, 1985)

3. รอยต่อท่อเทรั่ว ทำให้ไหลเข้าสะสมในท่อเท อาจทำให้คอนกรีตในท่อแยกตัว
4. ไม่มีการทำความสะอาดสารละลายฯในหลุมเจาะและไม่มีการเก็บตัวอย่างสารละลายฯที่ก้นหลุมมาทดสอบก่อนเทคอนกรีตทำให้ไม่สามารถทราบสถาวะของหลุมเจาะอันอาจทำให้เกิดปัญหาติดตามมาเช่นมีตะกอนกันหลุมมาก, ปริมาณทรายสูง, Filter Cake หนา ฯลฯ ทำให้เสาเข็มด้อยคุณภาพ สมรรถนะในการรับน้ำหนักได้ต่ำ

5. ระหว่างการเทคอนกรีตฝังปลายท่อในคอนกรีตลึกมากเกินไป ทำให้คอนกรีตที่ไหลออกจากปลายท่อไม่สามารถดันคอนกรีตชุดเก่าขึ้นเติมหน้าตัดรูเจาะ ทำให้คอนกรีตชุดหลังแทรกตัวขึ้นรอบๆ ท่อเทเท่านั้นทำให้ครูด filter cake ไม่ออกและกลบทับสิ่งสกปรกหน้าผิวคอนกรีต (รูปที่ 31)
6. ชักปลายท่อเทพ้นผิวหน้าคอนกรีตทำให้เทคอนกรีตไม่ต่อเนื่อง
7. ชักท่อเทขึ้นๆ ลงๆ (Jarring) ทำให้สารละลายฯแทรกลงข้างท่อหรือคอนกรีตพลิกกลับ (รูปที่ 32)

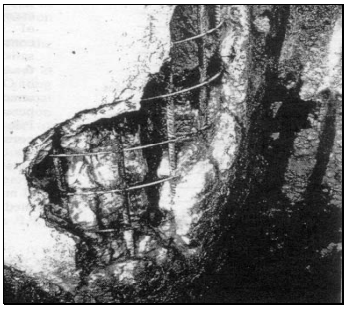


รูปที่ 31 ปลายท่อเทฝังในคอนกรีตลึกมากเกินไป



รูปที่ 32 ชักท่อเทขึ้นลง ๆ เป็นการเทคอนกรีตใต้น้ำที่ผิดวิธี

8. ตะกอนก้นหลุมมากและผสมกับคอนกรีตที่เทชุดแรกและไล่ตะกอนขึ้นไม่หมด ทำให้กำลังแบกทานปลายเสาเข็มลดลง
9. ตะกอนก้นหลุมมาก ผสมกับคอนกรีตที่เทชุดแรกและถูกดันขึ้นมาข้างบนบางส่วนอาจติดค้างโครงเหล็ก (รูปที่ 33)
10. คอนกรีต Workability ไม่ดี อาจมาจากส่วนผสมผิด, รูปร่างหินแบนมาก, ทำให้เทแล้วไม่ลื่นไหลหรือไหลไม่เต็มหน้าตัดเสาเข็ม ทำให้สารละลายฯแทรกตัว, คอนกรีตที่มีน้ำส่วนเกินเยิ้มออกมามากทำให้คอนกรีตแยกตัว ดังรูปที่ 34



รูปที่ 33 โพรงเกิดจากตะกอนดินติดค้างบนโครงเหล็ก



รูปที่ 34 คอนกรีตที่เกิดการแยกตัว

11. คอนกรีตมี Slump ต่ำไป ทำให้ Flowability ไม่ดี

12. มีระยะเวลาหน่วงการแข็งตัวน้อยไปคอนกรีตเกิดกระด้าง (Stiff) หรือแข็งตัว (Initial Set) ก่อนเทคอนกรีตเสร็จ ทำให้เสาเข็มเสียหาย

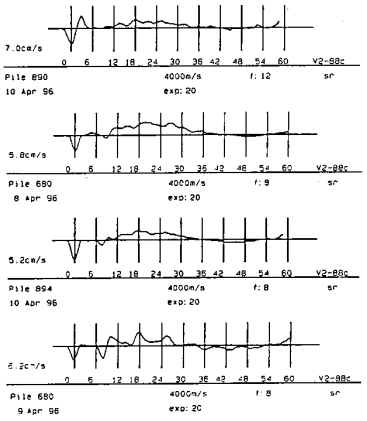
4.3. ปัญหาจากการทำงานภายหลังการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแล้วเสร็จ

4.3.1 เสียหายจากการขุดดินโดยใช้เข็มพืดเหล็กและลาดดิน

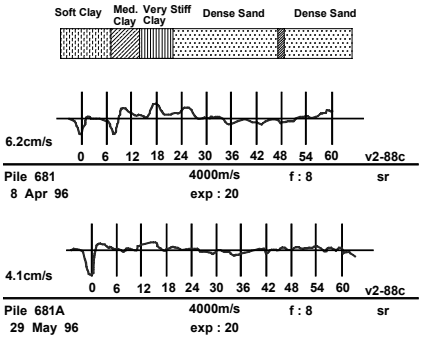
ได้มีการสำรวจความเสียหายของเสาเข็มเจาะในการก่อสร้างในกรุงเทพฯโครงการหนึ่งที่เกิดจากการขุดดินฐานรากเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0, 1.2 และ 1.5 เมตร ลึก 59 เมตรจำนวนกว่า 900 ต้นที่ใช้ระบบป้องกันดินชนิดเข็มพืดเหล็กชนิด FSP III ลึก 16 เมตร ร่วมกับลาดดินเป็นตัวป้องกันดินเคลื่อนตัวตามรูปที่ 35 ก่อนที่จะขุดถึงระดับสุดท้ายคือ 8.10 เมตรดินเกิดการเคลื่อนตัวและสังเกตพบว่าผิวดินในระยะห่างจากหลังเข็มพืดมีการทรุดตัวลง ผู้รับเหมางานอาคารจึงเสริมค้ำยันลาดเอียงเพื่อพยายามหยุดการเคลื่อนตัวของดินหลังการแก้ไขแล้วได้ตรวจสอบเสาเข็มจำนวนกว่า 450 ต้น ด้วย Sonic integrity test (Seismic Test) พบว่าเสาเข็มมีการเสียหายตั้งแต่เล็กน้อยจนถึงมาก อันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวดังกล่าวข้างต้นจำนวนรวม 32 ต้น ตามรูปที่ 36 ซึ่งเป็นความเสียหายแบบ Type B อันเป็น Structural Defect ผู้รับเหมางานอาคารทำการซ่อมแซมโดยเจาะคอนกรีตถึงระดับต่ำกว่ารอยร้าวแล้วฉีดน้ำปูนผสมพิเศษลงไปแทนที่ส่วนที่เสียหาย สำหรับต้นที่ถูกดินดันหรือรถขุดเกี่ยวจนเสียหายมาก ผู้รับเหมาอาคารทำการสกัดส่วนที่เสียหายออกออกแล้วหล่อกลับขึ้นมาใหม่ ซึ่งการซ่อมแซมได้ผลดีทั้งสองวิธีและเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก แล้วทำการทดสอบซ้ำตามรูปที่ 37



รูปที่ 35 การป้องกันดินเคลื่อนตัวโดยเสาเข็มพืดเหล็กและลาดดิน (after Thasnanipan et al, 1998)



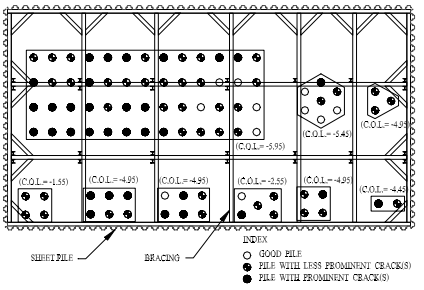
รูปที่ 36 ผลการตรวจสอบความเสียหายต่อเสาเข็ม



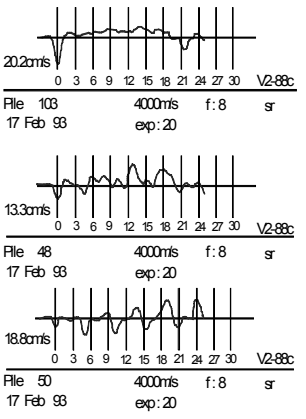
รูปที่ 37 ภาพแสดงผลการทดสอบก่อนและหลังการซ่อมเสาเข็ม (after Thasnanipan et al, 2000)

4.3.2 ความเสียหายเนื่องจากการอูดของดิน (Soil Heave or Swelling)

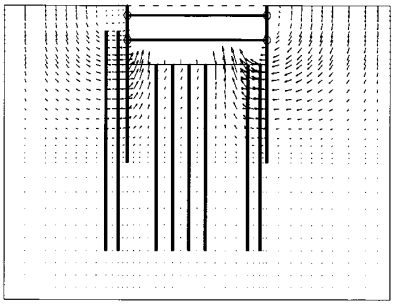
โครงการก่อสร้างในถนนสุขุมวิท ชั้นดินประกอบด้วยดินอ่อนลึก 15 เมตรและอ่อนปานกลางต่ำลงไปถึง 17 เมตร ลึกลงไปเป็นชั้นดินแข็งถึงแข็งมากถึงระดับกว่า 25 เมตร เสาเข็มที่ใช้เป็นเสาเข็มระบบเจาะแห้ง ขนาดหน้าตัดกลม 60 ซม.ลึก 26 เมตรเสริมเหล็กยืน ขนาด 16 มม. 6 เส้น จำนวน 143 ต้น ระบบกันดินชั่วคราวผู้รับเหมาอาคารใช้เสาเข็มพืดเหล็กยาว 14 เมตร ชนิด FSP III มีค้ำยันสองชั้นที่ 1.0 และ 3.5 เมตร ระดับขุดอยู่ที่ 0.85 และ 5.95 เมตรตามลำดับ ในการขุดดินไม่เห็นว่าเข็มพืดเหล็กมีการโก่งจนผิดปกติ แต่จากการตรวจสอบเสาเข็มทุกต้นโดย Seismic Test พบว่าเสาเข็มที่อยู่ในบ่อขุดเกิดรอยร้าวถึง 71 ต้น (84%)โดยจะพบรอยร้าวอยู่ที่ระดับประมาณ 5.5 ถึง 13.8 เมตรวัดจากดินเดิม เสาเข็มที่ร้าวมากจำนวน 24 ต้นและที่ปกติ 1 ต้นถูกทดสอบด้วยวิธี Dynamic Load Test เพื่อเปรียบเทียบกัน ผลทดสอบพบว่าเสาเข็ม 22 ต้นรับน้ำหนักได้เกินกว่าที่กำหนดไว้ มีรับน้ำหนักได้ 90% ของที่ออกแบบไว้จำนวน 2 ต้น และรับน้ำหนักต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ 50% จำนวน 1 ต้น รูปที่ 38 เป็นผังเสาเข็ม รูปที่ 39 เป็นผลการทดสอบเสาเข็มที่เสียหาย ซึ่งต่อมาถูกซ่อมแซมโดยการเจาะแก่นคอนกรีตและอัดฉีดด้วยน้ำปูนพิเศษ ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์โดย โปรแกรม Plaxis ตามรูปที่ 40 ทำให้ทราบสาเหตุของความเสียหายว่าเกิดจากการที่ขุดดินส่วนบนออกทำให้ดินด้านล่างที่ถูกดินส่วนบนกดทับไว้เป็นหมื่นหรือล้านปี เกิดการพองหรืออูดตัวขึ้น (Swelling หรือ Heaving) จนเกิดแรงดึง (Tension Force) กระทำต่อเสาเข็มที่เสริมเหล็กไว้น้อยจนเกิดการร้าวขึ้น และจากการวิเคราะห์นี้ยังพบว่า Moment ที่เกิดในเสาเข็มเนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินจากงานขุดมีค่าสูงกว่า Ultimate Moment Capacity ของเสาเข็มจนเกิดร้าวที่ระดับรอยต่อของชั้นดินอ่อนกับดินแข็งเป็นส่วนใหญ่ ตามรูปที่ 41 จากผล Sonic Integrity test (Seismic Test) พบว่าเสาเข็มบางต้นเกิดรอยร้าวที่หลายระดับเนื่องจากเกิดทั้งแรงดึงและแรงดันในเสาเข็มต้น ซึ่งตรงกับ ความเสียหายแบบ Type B อันเป็น Structural Defect ที่เกิดขึ้นภายหลังการติดตั้ง(ก่อสร้าง)เสาเข็ม



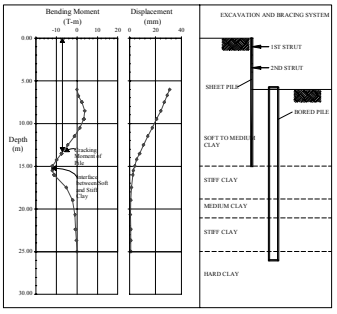
รูปที่ 38 ผังเสาเข็มในบ่อขุดที่เกิดความเสียหาย (after Thasnanipan et al, 1998)



รูปที่ 39 ผลการทดสอบเสาเข็มดี, เสียหายปานกลางและเสียหายมาก



รูปที่ 40 การวิเคราะห์โดย FEM (after Thasnanipan et al, 2000)



รูปที่ 41 ค่าโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวที่คำนวณได้ของเสาเข็มต้นใกล้กับเข็มพืดมากที่สุด(after Thasnanipan et al, 2000)

4.3.3 ความเสียหายต่อคอนกรีตเสาเข็มเนื่องจากสภาวะแวดล้อมในชั้นดิน

- เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 เมตรก่อสร้างที่ริมฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาเมื่อถูกสกัดถึงระดับตัดที่ระดับ 6.00 เมตรแล้ว พบว่ามีน้ำซึมขึ้นมาที่หัวเสาเข็มตรงแนวเหล็กเส้นและตรงแนวท่อเทคอนกรีตจนหัวเสาเข็มชื้นหลายต้นตามรูปที่ 42 ผู้รับเหมาจึงเจาะแก่นคอนกรีตส่วนบนขึ้นมาพบว่าคอนกรีตเนื้อไม่แน่นมีลักษณะพรุน เมื่อน้ำในแม่น้ำขึ้นน้ำจึงซึมผ่านคอนกรีตขึ้นสู่ด้านบนด้วย Capillary Suction ตามรูพรุนที่ต่อเนื่องกัน (Inter Connection Pore) ต่อมาผู้รับเหมาโครงสร้างซ่อมโดยสกัดคอนกรีตส่วนที่พรุนออกและหล่อขึ้นมาใหม่ สาเหตุของการพรุนเชื่อว่าเกิดมาจากการเยิ้มของน้ำในคอนกรีตหรือคอนกรีตเหลวถูกชะล้างโดยน้ำใต้ดินที่ขึ้นลงตามระดับน้ำในแม่น้ำซึ่งเป็นความเสียหายแบบ Type C อันเป็น Structural Defect ที่เกิดขึ้นภายหลังการติดตั้งเสาเข็มเสร็จแล้ว

- Thorburn et al, (1977) ได้สำรวจพบความเสียหายจากภัยธรรมชาติต่อเสาเข็มเจาะเกิดขึ้นชนิดที่ไม่คาดคิดมาก่อน เนื่องจากบริเวณก่อสร้างเคยเป็นทางน้ำเก่าและมีน้ำไหลผ่านเมื่อถมปรับบริเวณก่อสร้างแล้วแต่ผู้เกี่ยวข้องไม่ทราบว่าทางน้ำเก่ายังไหลผ่านใต้ดินได้อยู่ เมื่อเทเสร็จและถอนปลอกเหล็กออกแล้วนั้น ขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวมีน้ำใต้ดินไหลผ่านมาชะคอนกรีตเสาเข็มเสียหาย ตามรูปที่ 43 ความเสียหายนี้เป็น Structural Defect



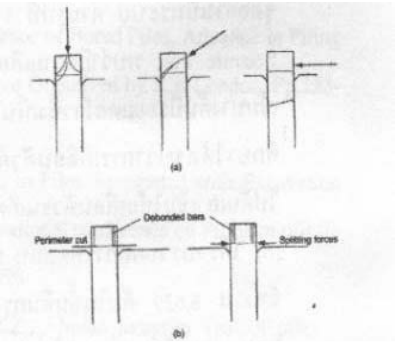
รูปที่ 42 น้ำซึมที่หัวเสาเข็มเนื่องจากคอนกรีตไม่แน่นตัว



รูปที่ 43 ทางน้ำใต้ดินชะคอนกรีตเหลวเสียหาย (Thorburn et al,. 1977)

4.3.4 ความเสียหายเนื่องจากการสกัดหัวเสาเข็ม

ในบางโครงการที่มีการทำเสาเข็มนำร่องไว้สำหรับตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มก่อนและหลังการขุดดินและสกัดหัวเสาเข็ม โดยทำการหล่อคอนกรีตเสาเข็มไว้สูงถึงพื้นดินและทำการทดสอบ Sonic Integrity Testไว้ก่อนหนึ่งครั้งและพบว่าไม่มีข้อบกพร่องนั้น เมื่อการขุดดินฐานรากและสกัดหัวเสาเข็มเสร็จแล้วจึงทดสอบอีกครั้งกลับพบว่าเสาเข็มเกิดร้าวในภายหลังที่ต่ำกว่าระดับตัดใช้งาน แสดงว่าระหว่างขั้นตอนการขุดดินหรือสกัดหัวเสาเข็มได้ก่อความเสียหายต่อเสาเข็มขึ้น สถาบันวิศวกรรมโยธาและสมาพันธ์ผู้เชี่ยวชาญงานเสาเข็มแห่งอังกฤษ (ICE/FPS, 1999) ได้กำหนดว่าการใช้เครื่องจักรกลขุดดินและสกัดหัวเสาเข็มมักจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเสาเข็ม



รูปที่ 44 (บน) หลีกเลี่ยงการสกัดโดยการกระแทกที่หัวเสาเข็ม
(ล่าง) ควรใช้สกัดด้วยมือที่ระยะ 30 ซม.สุดท้าย(after ICE/FPS,1999)

จึงแนะนำว่าการสกัดหัวเสาเข็มควรใช้อุปกรณ์เบาถือได้ด้วยมือ หรือใช้หัวตัดคอนกรีตระบบไฮโดรลิค และระยะ 300 มม. สุดท้ายควรขุดดินด้วยมือโดยขุดเป็นร่องรอบๆเสาเข็มตามรูปที่ 44

5. **เสาเข็มเจาะอัดน้ำปูน** (Grouted Bored Pile)

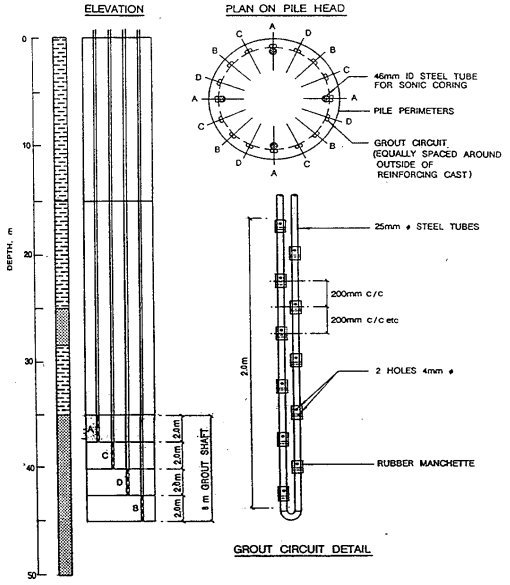
เนื่องจากวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะไม่ว่าระบบใดก็ตามจะมีผลทำให้ผิวดินรอบหลุมเจาะมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงเนื่องจากสาเหตุหลายประการคือ

- เกิดการคลายตัว (Soil relaxation) ของดินรอบหลุมเจาะและที่ก้นหลุมเจาะ
- การขุดดินออกเท่ากับเป็นการลด Overburden Pressure ของดินกับทรายทำให้เกิดคลายแรงเค้นกดทับ (Stress Relief)
- ดินทรายก้นหลุมเจาะถูกกระทบกระเทือน (Disturbed)

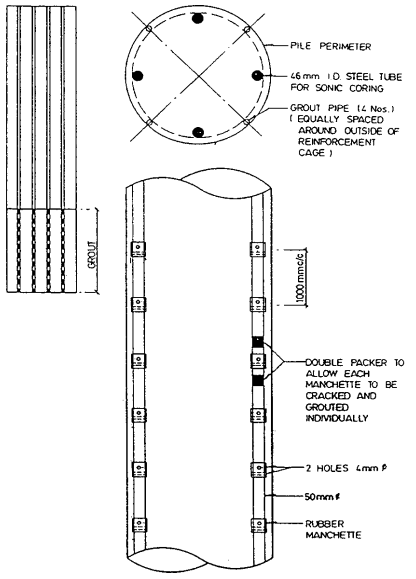
จึงทำให้เกิดวิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวและปลายเสาเข็มเพื่อชดเชยปัญหาดังกล่าวข้างต้น การอัดฉีดน้ำปูนทำให้เสาเข็มรับน้ำหนักได้มากขึ้น และพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มดีขึ้น วิธีการอัดฉีดน้ำปูนมีทั้งอัดฉีดที่ปลายเสาเข็ม และที่ผิวเสาเข็ม

5.1 การอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวเสาเข็ม (Shaft grouted bored piles)

ได้มีการนำเอาการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวมาใช้ครั้งแรกในโครงการ Hopewell (ซึ่งเรียกชื่อย่อว่า โครงการ BERTS ในปัจจุบัน) โดยมีการจัดเรียงท่ออัดฉีดน้ำปูนดังแสดงใน รูปที่ 45 และ 46

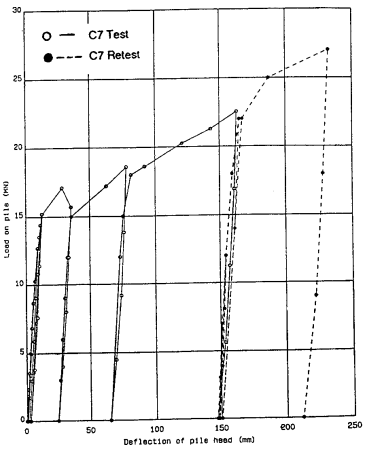


รูปที่ 45 Arrangement of initial shaft grout circuit detail (Littlechild et al. 1998b)



รูปที่ 46 Arrangements of final shaft grout detail (Littlechild et al, 1998b)

ในโครงการดังกล่าวได้มีการทดสอบเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวทั้งในขณะก่อสร้างและทดสอบซ้ำในเวลาหนึ่งปีให้หลัง ผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่หนึ่งปีให้หลังไม่ลดลงแต่อย่างใดดังแสดงใน รูปที่ 47

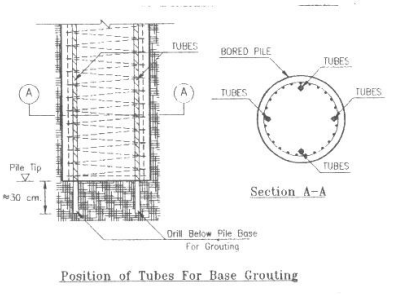


รูปที่ 47 Load versus pile head movement for pile shaft grouted in sand showing initial and reload test loading (Littlechid et al, 1998b)

5.2 การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base grouted bored piles)

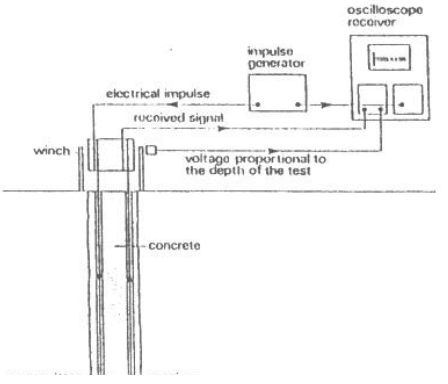
การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ได้มีการดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 ในโครงการก่อสร้างสะพานแขวนพระราม 9 และต่อมาอีกหลายโครงการ วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม ที่ทำกันอยู่มีอยู่หลายวิธีคือ

ก) แบบฝังท่อเหล็กในตัวเสาเข็มและเจาะดินใต้ปลายเสาเข็มผ่านท่อที่ฝังไว้ลงไปประมาณ 30 ซ.ม. นำ PACKER หย่อนผ่านท่อเหล็กลงไปในรูที่เจาะเตรียมไว้ใต้ปลายเสาเข็ม และอัดน้ำปูนผ่าน PACKER หรืออัดฉีดโดยตรงกับปลายท่อเหล็กที่ระดับพื้นดิน การฝังท่อเหล็กอาจฝัง 2, 3หรือ 4 ท่อ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (รูปที่ 48) อัดฉีดน้ำปูนโดยฝังท่อเหล็กนี้มักจะทำควบคู่ไปกับการทำ CROSS HOLE ULTRASONIC TESTING เพราะสามารถส่ง SENSOR ผ่านท่อที่ฝังไว้เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของตัวเสาเข็มได้ทุกระดับ (รูปที่ 49)



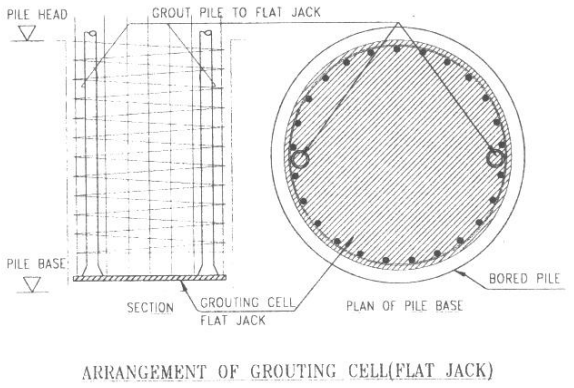
Position of Tubes For Base Grouting

รูปที่ 48 รูปแสดงตำแหน่งท่อสำหรับอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม



รูปที่ 49 รูปแสดงการทดสอบ CROSS- HOLE ULTRASONIC ผ่าน ท่ออัดฉีดน้ำปูน

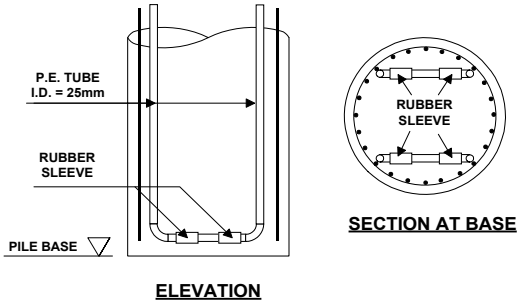
ข) การอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มโดยติดตั้ง GROUTING CELL (FLAT-JECK) GROUTING CELL จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดของเสาเข็มหุ้มด้วยแผ่นยางที่ด้านล่าง การติดตั้งจะผูกติดกับปลายโครงเหล็กเสริมหย่อนลงจนถึงก้นรูเจาะและที่ด้านบนของ GROUTING CELL จะต่อด้วยท่อผูกติดโครงเหล็กขึ้นมาบนหัวเสาเข็ม การอัดฉีดน้ำปูนจะอัดฉีดผ่านท่อเข้าไปใน GROUTING CELL เพื่อให้แผ่นยางขยายตัวดันชั้นทรายหรือตะกอนใต้ปลายเสาเข็มให้แน่นเมื่ออัดฉีดหถึงความดันระดับหนึ่ง แผ่นยางจะแตกให้น้ำปูนไหลแทรกตัวเข้าในชั้นทรายที่ระดับปลายเสาเข็มและแข็งตัว ทำให้ทรายที่ปลายเสาเข็มแน่นตัว อุปกรณ์ GROUTING CELL ดังแสดงในรูปที่ 50



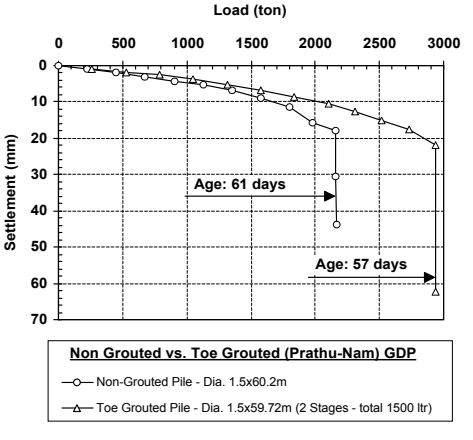
รูปที่ 50 รูปแสดงตำแหน่ง GROUTING CELL

ค) การอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มโดยติดตั้งท่อระบบ NONE RETURN VALVE ซึ่งมีชื่อเรียกว่าระบบ TUBE-A-MANCHETTES ไว้ที่ปลายเสาเข็มรูปตัวยู (U) (รูปที่ 51 ก.) การติดตั้งโดยทั่วไปจะติดตั้ง 2 ชุด (2 CIRCUITES) และที่ปลายของ TUBE-A-MANCHETTES จะต่อด้วยท่อยางรับแรงดันสูงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ขึ้นมาถึงระดับพื้นดิน การอัดฉีดน้ำปูนจะอัดฉีดผ่านท่อยางด้วยแรงดันจาด GROUTING PUMP ทำให้ NONE RETURN VALVE ขยายตัวให้น้ำปูนไหลออกที่ปลายเสาเข็มผสมกับชั้นทรายใต้เสาเข็ม

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มส่วนใหญ่จะใช้ระบบท่อแบบ Tube-A-Manchette (รูปที่ 51ก.) เพราะทำได้รวดเร็ว ได้ผลดีและราคาประหยัด โดยได้มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเปรียบเทียบกับเสาเข็มเจาะที่ไม่ได้มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มซึ่งก่อสร้างในหน่วยงานเดียวกันพบว่าเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักดีกว่ามากดังแสดงใน รูปที่ 51 ข.



รูปที่ 51 ก. ตำแหน่งท่ออัดฉีดน้ำปูนในระบบ Tube-A-Manchette (ณรงค์, 2540)



รูปที่ 51 ข. การทดสอบเสาเข็มเปรียบเทียบในหน่วยงานเดียว กัน (ณรงค์, 2540)

6. บทสรุป

เสาเข็มเจาะที่ใช้ในประเทศไทยได้มีการพัฒนาทั้งด้านอุปกรณ์, เครื่องจักร และวิธีการก่อสร้างดีขึ้นกว่าในอดีตมาก เมื่อก่อสร้างอย่างถูกวิธีจะสามารถรับน้ำหนักได้สูง และยังสามารถเสริมสมรรถนะในการรับน้ำหนักให้ดีขึ้นด้วยการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวหรือปลายเสาเข็ม การออกแบบก่อสร้างเสาเข็มเจาะสามารถทำได้หลายรูปทรงหลายระดับความลึก อย่างไรก็ตามแม้นเสาเข็มเจาะจะมีข้อดีมากมายก็ตาม แต่หากก่อสร้างโดยไม่ปฏิบัติตามขั้นตอนหรือใช้คอนกรีตที่มีคุณภาพไม่เหมาะสมแล้ว อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพและสมรรถนะของเสาเข็มเจาะได้ นอกจากนั้นแล้วปัญหาอาจเกิดขึ้นกับเสาเข็มเจาะในภายหลังได้จากการก่อสร้างที่ตามมาเช่นการสกัดหัวเสาเข็มและการขุดดินก่อสร้างฐานรากโดยขาดความระวัดระวังอย่างพอเพียง

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ พนักงานบริษัท ซีฟโก้ จำกัด ทุกคนที่ได้ช่วยพิมพ์ ตรวจสอบคำ และจัดเรียงบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- AASHO (1992), Standard and specification for highway bridges.
- ACI (1994), Standard specification for end bearing drilled piers, (ACI 336.1)
- ADSC (1995) Standard and specification for the foundation drilling industry. (Incorporating ACI 336.1 94)
- ADSC and DFI (1989), Drill shaft inspector's manual.
- Bartholomew, R.F.(1979), The Protection of Concrete Pile in Aggressive Ground Conditions: An International Appreciation in Proceeding. Conference on. Recent Piling Developments in the Design and Construction of Piles. Organized by Institution of Civil Engineers, London, pp 131 –141.
- British Standard Institution, BS8004: Code of practice for foundation, BSI London.
- Flemming, W. G. K. and Sliwinski, Z. J. (1977), The use and influence of bentonite in bored pile construction, CIRIA report PG3.

- Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., Elson, W. K. (1992), Piling Engineering, John Wiley&Sons, Inc.
- Gasaluck, W., Luthisungnoen, P., Angsuwotai, P. Muktabhant,P. and Mobkhuntod, P(2000). On thw Design of Foundation in Collapsible Khon Kaen Loess., Geo Eng 2000. An International Conference on Geotechnical and Geological Enineering., Melbourne, Australia, 19-24 November 2000. Pp in CD Rom.
- Hutchinson, M. T., Daw, G. P., Shotton, P. G. and Jame, A. N(1974). The properties of Bentonite Slurries used in Diaphragm Walling and their control. Diaphragm Walls & Anchorages. Proc. of the conf. Organized by The Institution of Civil Engineers and Held in London, 18 –20 Sep 1974. (Printed in 1975). Pp 33 – 39
- Littlechild B., Plumbridge G. (1998a), Effect of Construction Technique on the Behavior of Plain Bored Cast In-situ Piles Constructed Under Drilling Slurry, Conference Papers of 7th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria, pp. 1.6.1 to1.6.8.
- Littlechild B., Plumbridge G., Free M. W. (1998b), Shaft Grouted Piles in Sand and Clay in Bangkok, Conference Papers of 7th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria, pp. 1.7.1 to1.7.8.
- Reese, L. C. and Tucker, K. L. (1985), Bentonite slurry in constructing drilled piers, Drilled piers and caisson II, ASCE convention., Denver, Colorado, USA.
- Reese, L. C. and O' Niel, M. W. (1988), Drill Shafts Construction Procedures and Design Methods, US. Department of Transportation Incorporation with ADSC.
- Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. (1974), Practical consideration affecting the performance of diaphragm walls, Proceedings of the conference on diaphragm wall and anchorage, ICE, London.
- Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. (1982), The Integrity and performance of bored piles, Advance in Piling&Ground Treatment for Foundation, ICE, London., pp.153-165
- Thasnanipan, N., Maung, A. W., and Tanseng, P. (1998) Damages to Piles Associated with Excavation Works in Bangkok Soft Clay. Proceeding of the Sixth International Conference on Problem of Pile Foundation Engineering. Russia. Pp. 91-98 (Volume III) .
- Thasananipan, N., Muang, A. W., Navaneethan, T. (2000), Non-Destructive Integrity Testing on Piles Founded in Bangkok Subsoils, 6th International Conference on the

Application of Stress Wave Theory to Piles (Stress Wave 2000), São Paulo City, Brazil, (Paper has been accepted by organizing committee)

- The Institution of Civil Engineers, ICE (1996), Specification for piling and Embedded Retaining wall (1996) Thomas Telford. London.
- The Institution of Civil Engineers and The Federal of Piling Specialists, ICE/FPS. (1999), The Essential Guide to the ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls. Thomas Telford.
- Thorburn, S. and Thorburn J. Q. (1977), Review of problems associated with the construction of cast-in-place piles, CIRIA report PG.2
- Tomlinson M. J. (1994), Pile Design and Construction Pratice, 4th Edition, E&FN Spon.
- Weltman, A.J, Little J.A (1977), A Review of Bearing Pile Types, Construction Industry Research and Information Association , CIRIA Report PG.1.
- Xanthakos(1994), P. P., Slurry Walls as Structural Systems . McGraw – Hill Inc.
- ชัชวาลย์ เศรษบุตร (2536) Concrete Technology, CPAC
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2540), ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพ ในปัจจุบัน, การสัมนาทางวิชาการเรื่องฐานราก 40, จัดโดย ว.ส.ท., ณ. โรงแรมเซ็นทรัลพลาซ่า,ลาดพร้าว, หน้า 1-26
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2543), ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพฯ,เอกสารการสัมมนาเรื่องฐานราก 2000 จัดโดยอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธา วสท. หน้า P ถึง 38.
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว, พรพจน์ ตันเส็ง (2543ก), สารละลายเบ็นโทไนท์ในงานกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตในชั้นดินกรุงเทพฯ: คุณสมบัติต่างๆ และ วิธีการควบคุม, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6, เพชรบุรี, หน้า GTE211-GTE216
- ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ เผด็จ รุจิขจรเดช และ พรพจน์ ตันเส็ง (2543ข) การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6, เพชรบุรี, หน้า GTE115-GTE120

พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ
BEHAVIOR OF POLYMER SLURRY FOR WET-PROCESS BORED PILE CONSTRUCTION IN BANGKOK SUBSOILS

ดร. วันชัย เทพรักษ์[1] และ ธยานันท์ บุณยรักษ์[2]

Wanchai Teparaksa[1] and Thayanan Boonyarak[2]

[1]รองศาสตราจารย์, [2]นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ: ปัจจุบันสารละลายโพลีเมอร์ (Polymer Slurry) สามารถนำมาใช้แทนที่การใช้งานสารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) เพื่อเป็นสารรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่า งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์โดยการสร้างและทดสอบแบบจำลองการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายในสภาพต่างๆ พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลสนามจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเบนโทไนท์จะทำให้ (1) ปริมาณการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายลดลง (2) ระยะเวลาเริ่มต้นของการเกิดเยื่อบุทึบน้ำ(Time for Initial Cake Formation, T_c) ลดลงและ (3) ความหนาของเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) เพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียวไม่ทำให้ อัตราการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายลดลงตามระยะเวลา ในส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) ของเสาเข็มที่ใช้โพลีเมอร์มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์และค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ของเสาเข็มที่ใช้โพลีเมอร์มีค่าสูงกว่าค่าจากเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์

ABSTRACT: Polymer slurry has been adopted to replace the bentonite slurry as the hole stabilizing slurry for wet-process bored pile construction in Bangkok subsoils. This research aims to study the behavior of polymer slurry by means of models testing and field investigation. The results show that, in case of increasing ratio of bentonite in the slurry, (1) the filtrate volume through sand layer decreases, (2) the time for initial cake formation (T_c) decreases and (3) the thickness of filter cake increases. On the other hand, in case of using pure polymer slurry, the filtration rate of slurry remains steady. The adhesion factor (α) for estimating unit skin friction in clay layer of bored piles using polymer slurry are in the same range as those of bored piles using bentonite slurry. The friction factor (β) for estimating unit skin friction in sand layer of bored piles using polymer slurry are significantly increased compared with the case of bentonite slurry.

KEYWORDS: POLYMER SLURRY, BENTONITE SLURRY, WET-PROCESS BORED PILE, FILTRATION

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากสารรักษาเสถียรภาพแบบเดิมที่ใช้อยู่คือสารละลายเบนโทไนท์มีข้อเสียหลายอย่างเช่น เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงแรงเสียดทานในชั้นทรายเนื่องจากเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake), สิ้นเปลืองอุปกรณ์ในการก่อสร้างและพลังงานในการใช้เครื่องเป่าลม (Air Lift) และเครื่องกรองทราย (Desander), ทำให้สถานที่ก่อสร้างสกปรกมาก, มีความยุ่งยากในการทำงานมากกว่าการใช้สารละลายโพลีเมอร์, เกิดการอุดตันในระบบระบายน้ำเมื่อนำเบนโทไนท์ไปทิ้ง ฯลฯ

2. คุณสมบัติของสารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์

รูปที่ 1 และ 2 แสดงลักษณะของสารละลายเบนโทไนท์และสารละลายโพลีเมอร์ตามลำดับ สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารสังเคราะห์ประเภทแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) มีชื่อทางเคมีว่า Na-Montmorillonite เบนโทไนท์จะถูกบรรจุในรูปผงสีน้ำตาล เบนโทไนท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Mc-Gel การใช้สารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียวในงานเสาเข็มเจาะโดยปกติจะผสมเบนโทไนท์ประมาณ 3-6% โดยน้ำหนัก (ฉรงค์และคณะ [5]) โดยน้ำหนักกับน้ำ เพื่อให้เบนโทไนท์ดูดน้ำ (Hydrated) ซึ่งสารผสมจะมีสภาพเป็นคอลลอยด์ (Colloid) เมื่อสูบสารละลายเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะ สารละลายจะถ่าย

แรงดันไปสู่ผนังหลุมเจาะให้มีเสถียรภาพอยู่ได้ ในชั้นทรายสารละลายเบนโทไนท์จะก่อเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ทำให้สารละลายถ่ายแรงดันไปที่เม็ดทรายได้ รูปที่ 3 แสดงพฤติกรรมของสารละลายเบนโทไนท์ในหลุมเจาะ

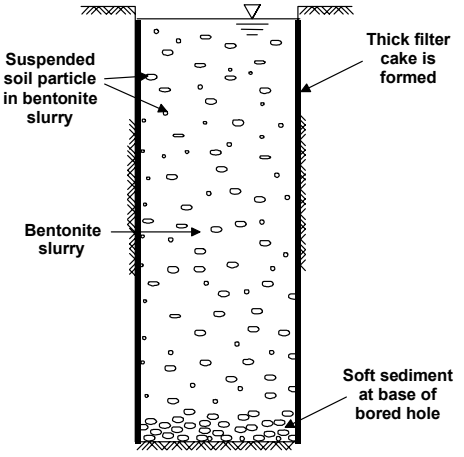
สารละลายโพลีเมอร์ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะเป็นสารสังเคราะห์ชนิดโมเลกุลใหญ่หรือแบบลูกโซ่ยาว (Long Chain Molecule) ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า PHPA (Partially Hydrolized Polyacrylamides) ชื่อทางการค้าของโพลีเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ JF-Mud P โดยใช้อัตราส่วนการผสมกับน้ำในช่วง 0.05-0.1% โดยน้ำหนัก การรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะโดยใช้โพลีเมอร์เพียงอย่างเดียวจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายโพลีเมอร์ซึมผ่านเข้าไปในชั้นทรายทำให้เกิดแรงเสียดไถ (Drag Force) และสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายเนื่องจากโครงสร้างของโพลีเมอร์จะจับตัวกับเม็ดทราย ทำให้ผนังของหลุมเจาะมีเสถียรภาพอยู่ได้ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียวจะเกิดการสูญเสียของสารละลายในชั้นทรายในปริมาณมาก ในทางปฏิบัติการใช้สารละลายโพลีเมอร์จะผสมเบนโทไนท์ลงไปในสารละลายในปริมาณเล็กน้อย (0.5-1.5%) เพื่อให้เกิดเยื่อบุทึบน้ำที่มีความหนาไม่มากดังแสดงในรูปที่ 4



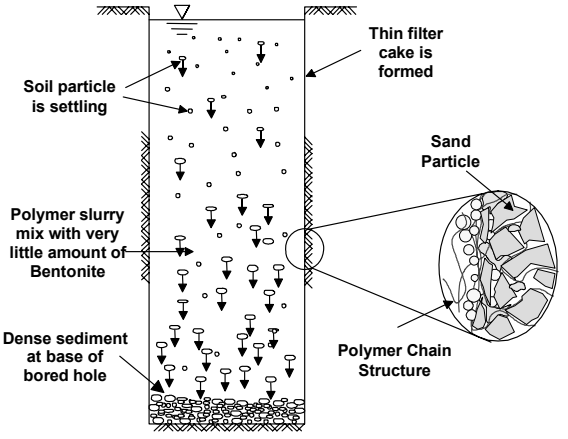
รูปที่ 1 ลักษณะของสารละลายเบนโทไนท์ล้วน



รูปที่ 2 ลักษณะของสารละลายโพลีเมอร์ล้วน



รูปที่ 3 พฤติกรรมของสารละลายเบนโทไนท์ในหลุมเจาะ

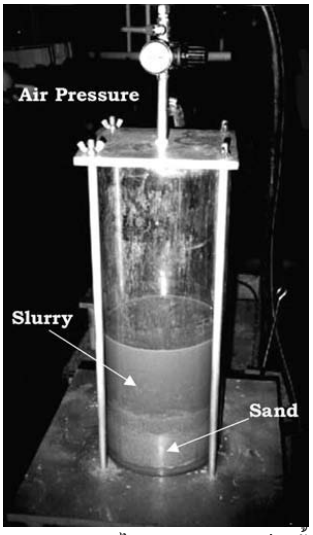


รูปที่ 4 พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ผสมเบนโทไนท์ในหลุมเจาะ

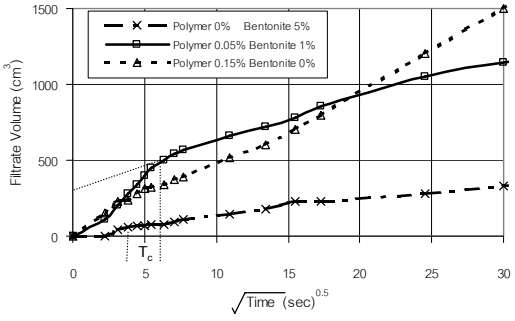
3. พฤติกรรมการไหลผ่านชั้นทราย

เมื่อสารละลายเบนโทไนท์ไหลผ่านชั้นทรายเบนโทไนท์จะก่อเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ซึ่งจะเป็นแผ่นอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) ที่ไปยึดเกาะกับเม็ดทราย อันจะส่งผลให้อัตราการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายมีค่าลดลงอย่างมาก ในการทดสอบพฤติกรรมดังกล่าวจึงได้มีการทดสอบแบบจำลอง (Model Test) (Teparaksa and Boonyarak [3], ธยานันท์ [6]) จากการทดสอบแบบจำลองการไหลผ่านชั้นทราย แสดงในรูปที่ 5

ผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่าเมื่อเบนโทไนท์เริ่มไหลผ่านชั้นทราย อัตราการไหลจะลดลงอย่างชัดเจนซึ่งเวลา ณ จุดนั้นเรียกว่า เวลาเริ่มต้นของการเกิดเยื่อบุทึบน้ำ (Time of Initial Cake Formation, T_c) (Hutchinson et al [1]) ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีใช้สารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว (Bentonite 5%) จะเกิดเยื่อบุทึบน้ำอย่างรวดเร็ว



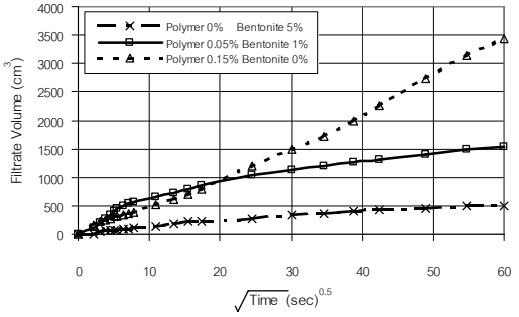
รูปที่ 5 แบบจำลองการไหลของสารละลายผ่านชั้นทราย



รูปที่ 6 การไหลของสารละลายชนิดต่างๆผ่านชั้นทราย

ในกรณีที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์เพียง (Polymer 0.15%) อย่างเดียวจะไม่เกิดเยื่อบุทึบน้ำ อัตราการไหลผ่านชั้นทรายของสารละลายโพลีเมอร์มีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยอัตราการไหลของสารละลายจะขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลาย สำหรับการใช้สารละลายผสมระหว่างโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์ (Polymer 0.05% Bentonite 1%) จะเกิดเยื่อบุทึบน้ำบางๆที่ผิวหน้าของชั้นทราย โดยมีค่า T_c นานกว่าและมีอัตราการลดลงของการไหลช้ากว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว

ปริมาณการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเบนโทไนท์เป็นหลัก เนื่องจากเมื่อเบนโทไนท์ไหลผ่านทรายเบนโทไนท์จะก่อเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ที่ผิวหน้าทรายที่มีอัตราการไหลผ่านของสารละลายต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของสารละลายผ่านทราย สารละลายที่มีปริมาณของเบนโทไนท์ที่มากกว่าจะก่อเยื่อบุทึบน้ำที่มีความหนามากกว่า ทำให้อัตราการซึมผ่านของสารละลายต่ำกว่าสารละลายที่มีปริมาณของเบนโทไนท์น้อยกว่าหรือสารละลายที่ไม่มีเบนโทไนท์ผสมอยู่ รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าสารละลายที่ใช้เบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว (Bentonite 5%) มีปริมาณการไหลผ่านทรายต่ำที่สุด สารละลายผสมระหว่างโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์ (Polymer 0.05% Bentonite 1%) มีปริมาณการไหลผ่านชั้นทรายที่มากกว่า เนื่องจากสารละลายก่อเยื่อบุทึบน้ำที่มีความหนาน้อยกว่าสารละลายเบนโทไนท์ล้วน ในกรณีที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ล้วน (Polymer 0.15%) ปริมาณการไหลของสารละลายผ่านชั้นทรายจะมีค่าสูงมากที่สุด เนื่องจากสารละลายจะไม่สร้างเยื่อบุทึบน้ำ



รูปที่ 7 การไหลของสารละลายชนิดต่างๆผ่านชั้นทรายที่เวลา 60 นาที

4. กำลังรับแรงเฉือนของผิวหน้าทรายเมื่อผ่านการไหลของสารละลาย

จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวหน้าของทรายโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบพกพา (Pocket Penetrometer) พบว่าหลังจากสารละลาย (เบนโทไนท์หรือโพลีเมอร์) ไหลผ่านชั้นทราย จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของผิวหน้าทรายเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 ในขณะที่ทรายส่วนที่ลึกจากผิวหน้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 9 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโพลีเมอร์จะทำให้ทรายมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน และเยื่อบุทึบน้ำจากเบนโทไนท์จะทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายแรงจากสารละลายทำให้ทรายแน่นขึ้น รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวหน้าชั้นทรายจะเห็นได้ว่า การใช้สารละลายที่ผสมระหว่างโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้กำลังของผิวหน้าทรายเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนมากกว่าการใช้สารละลายโพลีเมอร์หรือเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการส่งเสริมกันของพฤติกรรมของสารละลายทั้งสอง นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์และโพลีเมอร์ค่าหนึ่ง (Bentonite = 1% Polymer = 0.1% โดยน้ำหนัก) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากจุดนี้ไปแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณของโพลีเมอร์หรือเบนโทไนท์ลงไปในสารละลายอีกก็ไม่ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของทรายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่จุดนี้โครงสร้างของสารละลายโพลีเมอร์ได้สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายและเบนโทไนท์ได้สร้างเยื่อบุทึบน้ำเพื่อให้ผิวหน้าของทรายมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นสมบูรณ์แล้ว



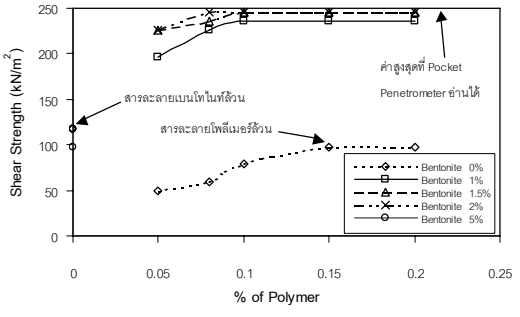
รูปที่ 8 ลักษณะของผิวหน้าทรายที่ผ่านการไหลของสารละลาย



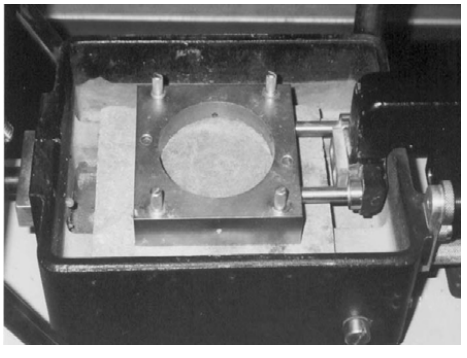
รูปที่ 9 ลักษณะของทรายส่วนที่ลึกจากผิวหน้าที่ผ่านการไหลของสารละลาย

5. การทดสอบแรงเสียดทานของผิวหน้าทรายที่ผ่านการไหลของสารละลาย

การทดสอบแรงเสียดทานจะกระทำหลังจากที่สารละลายไหลผ่านทรายเป็นเวลา 60 นาที การทดสอบจะเก็บตัวอย่างผิวหน้าทรายโดยใช้กล่องเก็บตัวอย่าง (Shear Box Sampler) แล้วดันตัวอย่างผิวหน้าทรายเข้าไปที่กล่องเฉือนตัวอย่างชิ้นบน (Upper Shear Box) โดยที่มีแผ่นปูนทราย (Mortar) เป็นผิวหน้าทดสอบแรงเสียดทานแทนที่กล่องเฉือนตัวอย่างชิ้นล่าง (Lower Shear Box) ดังรูปที่ 11 แล้วทดสอบแรงเสียดทานด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Testing Apparatus) ดังแสดงในรูปที่ 12 ผลการทดสอบจะได้แรงเสียดทานในรูปของมุมเสียดทานระหว่างทรายกับแผ่นปูนทราย (δ) ซึ่งได้จากการพล็อตค่าระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับทดสอบ (Normal Stress) แสดงในดังรูปที่ 13 ซึ่งจะพบว่ามุม δ จากการทดสอบทรายที่ผ่านการไหลของโพลีเมอร์มีค่าลดลง เนื่องจากโพลีเมอร์มีลักษณะลื่นเมื่อผสมเสร็จใหม่ๆ แต่การใช้งานกับเสาเข็มเจาะก่อนที่เสาเข็มจะรับน้ำหนักจากโครงสร้างอย่างเต็มที่ โพลีเมอร์จะสลายตัวไปเกือบทั้งหมดทำให้ผิวหน้าทรายไม่มีความลื่นเหลืออยู่ ในกรณีการทดสอบทรายที่ผ่านการไหลของสารละลายเบนโทไนท์จะให้ค่ามุม δ ที่มีค่าต่ำสุด เนื่องจากผิวหน้าของทรายมีเยื่อบุทึบน้ำอยู่ ทำให้เม็ดทรายไม่สัมผัสกับแผ่นปูนทรายโดยตรง มุม δ ที่ได้จากการทดสอบในแรงเสียดทานในห้องปฏิบัติการนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) เนื่องจากปัจจัยในการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีความแตกต่างกับสภาพในสนาม ผลการทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้สารละลายแต่ละชนิดเท่านั้น



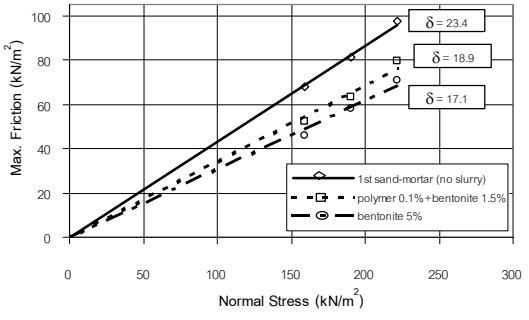
รูปที่ 10 กำลังรับแรงเฉือนของผิวหน้าทรายจากการทดสอบด้วยพีนีโตรมิเตอร์แบบพกพา (Pocket Penetrometer)



รูปที่ 11 ตัวอย่างผิวหน้าทรายในกล่องเฉือนตัวอย่างชิ้นบน (Upper Shear Box) สัมผัสกับแผ่นปูนทราย (Mortar)



รูปที่ 12 การทดสอบแรงเสียดทานของตัวอย่างทรายด้วยเครื่องทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Testing Apparatus)

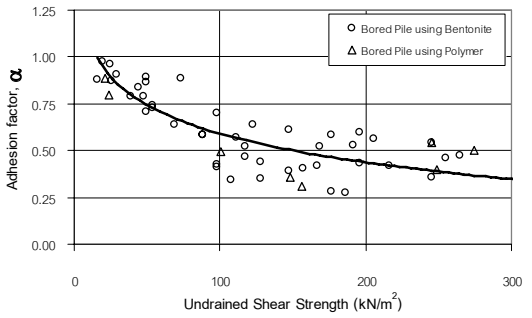


รูปที่ 13 มุมเสียดทานระหว่างทรายและแผ่นปูนทรายของสารละลายชนิดต่างๆ

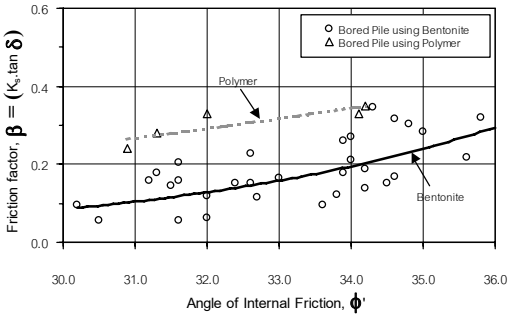
6. การวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวและชั้นทราย (α และ β)

การวิเคราะห์กลับเพื่อหาพารามิเตอร์ในการออกแบบเสาเข็มจากการทดสอบเสาเข็มเจาะโดยใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดในกรุงเทพฯมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของสารละลาย ผู้เขียนได้ทำการรวบรวมผลการทดสอบเสาเข็มในกรุงเทพฯที่ก่อสร้างด้วยวิธีการใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะพร้อมทั้งมีการติดตั้งเครื่องมือวัดเป็นจำนวน 8 ต้นและทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของเสาเข็มที่เจาะโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์จากงานวิจัยที่ผ่านมา (ชาญชัย [4], วันชัยและชาญชัย [7]) ผลการเปรียบเทียบจะเปรียบเทียบในรูปของสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (Adhesion Factor, α) และสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (Friction Factor, β) โดยในรูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบค่า α ของการใช้สารละลายที่ต่างชนิดกันจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว (Undrained Shear Strength, S_u) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์และสารละลายเบนโทไนท์มีความสัมพันธ์อยู่ในช่วงเดียวกัน เนื่องจากทั้งสารละลายโพลีเมอร์และเบนโทไนท์จะไม่ซึมเข้าไปในชั้นดินเหนียว พฤติกรรมการรักษาเสถียรภาพในชั้นดินเหนียวของสารละลายทั้งสองชนิดจึงไม่แตกต่างกันเป็นผลให้ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าออกมาอยู่ในช่วงเดียวกัน

สำหรับความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) กับมุมต้านทานภายในของทราย (Angle of Shearing Resistance, ϕ') ที่ได้จากเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์จะมีค่าสูงกว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์จะไม่ก่อเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ในชั้นทรายที่มีความหนามากดังเช่นการใช้สารละลายเบนโทไนท์ ทำให้เสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายเท่ากับการใช้สารละลายเบนโทไนท์ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) กับกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (S_u)



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) กับมุมต้านทานภายในของทราย (ϕ')

7. การตกตะกอนของเม็ดดินในหลุมเจาะ

เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์เป็นสารละลายจึงไม่มีกำลังรับแรงเฉือนทำให้เม็ดดินไม่แขวนลอยในสารละลายดังเช่นในสารละลายเบนโทไนท์ นอกจากนี้โครงสร้างของโพลีเมอร์จะไปหุ้มหรือจับตัวกับดินเม็ดละเอียดและดึงให้เม็ดดินมารวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนลงสู่ก้นหลุมได้อันจะส่งผลทำให้ในกรณีทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะจริงที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์สามารถทำการเก็บตะกอนในหลุมเจาะได้โดยใช้ถังเก็บตะกอน (Cleaning Bucket) ตักตะกอนขึ้นมา แต่ทั้งนี้จะต้องรอให้การตกตะกอนเสร็จสิ้นสมบูรณ์เสียก่อน ซึ่งความหนาของตะกอนและเวลาในการตกตะกอนจะมีปัจจัยหลายๆอย่างเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น ความลึกของหลุมเจาะ, ขนาดของเม็ดดินในหลุมเจาะ, สภาพชั้นดินในหลุมเจาะ, อัตราส่วนผสมของสารละลาย, ความหนืดของสารละลาย, ขั้นตอนและเครื่องมือในการขุดเจาะ ฯลฯ (R. Edmundo Majano and Micheal W. O'neil [2])

จากปัจจัยหลายๆอย่างดังที่กล่าวมาข้างต้น การหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนที่สมบูรณ์ ควรจะได้จากการเก็บข้อมูลเฉพาะสถานที่ขุดเจาะเสาเข็มที่เริ่มต้นก่อสร้าง โดยปล่อยให้เกิดการตกตะกอนในหลุมเจาะแล้วจับเวลาเทียบกับความหนาของตะกอนเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมของการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์สำหรับสถานที่ก่อสร้างนั้นๆ

8. สรุป

การใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ในหลายๆด้านคือ ไม่เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย, มีขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างง่ายกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์, ประหยัดอุปกรณ์และพลังงานในการก่อสร้างมากกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ อันจะส่งผลทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมากกว่ากรณีที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ ทัศนนิพันธ์และคุณชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ บริษัทซีฟโก้จำกัด ที่ได้ช่วยเหลือในด้านการสร้างแบบจำลอง, ข้อมูลในสนามและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Hutchinson, M.T. et al, Properties of Bentonite Slurries used in Diaphragm walling and their control, pp 33-39. Institution of Civil Engineers, London, 1975.

[2] Edmundo, M. R. and O'neil, M. W., Effect of Mineral and Polymer Slurries on Perimeter Load Transfer in Drilled Shafts, ADSC: The International Association of Foundation Drilling, Houston, Texas, 1993.

[3] Teparaksa, W and Boonyarak, T, Performance and Behavior of Polymer Slurry in Wet-Process Bored Pile in Bangkok Subsoils, Proceeding of the fourteenth KKNN Seminar on Civil Engineering, Kyoto, November, pp 439-444, 2001.

[4] ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, พฤติกรรมของเสาเข็มแบบเร็ตและเสาเข็มเจาะที่ติดเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

[5] ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และพรพจน์ ตันเสิ่ง, การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, 2543

[6] ธยานันท์ บุณยรักษ์, พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

[7] วันชัย เทพรักษ์ และชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, พฤติกรรมของเสาเข็มแบบเร็ตที่ติดเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพฯ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, 2543

For further information, contact: Assoc. Prof. Dr. Wanchai Teparaksa, Department of Civil Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330 E-mail: fcewtp@eng.chula.ac.th

คอนกรีตเทคโนโลยีสำหรับงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก

Concrete Technology for Deep-Seated Wet-Process Bored Piling

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์[1] เผด็จ รุจิขจรเดช[2] ซอว์ ซอว์ เอย์[3] และ ธยานันท์ บุณยรักษ์[4]

[1]กรรมการผู้จัดการ [2]กรรมการผู้ช่วยผู้จัดการ [3]ผู้จัดการโครงการ [4]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

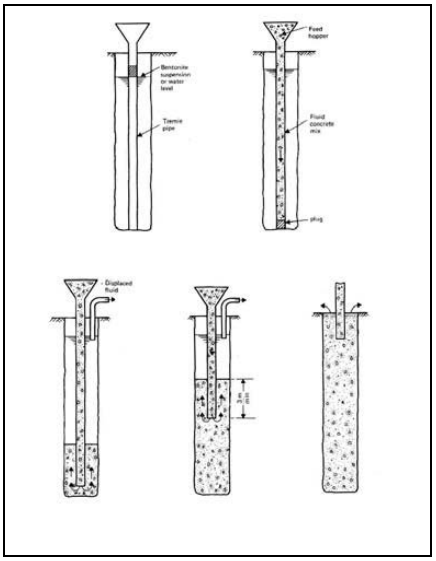
บทคัดย่อ: เสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกเป็นโครงสร้างชนิดพิเศษที่ก่อสร้างใต้ดินโดยเทคอนกรีตผ่านท่อเท (Tremie) ตามปกติเสาเข็มเจาะลึกจะมีอัตราส่วนความชะลูดอยู่ระหว่าง 20-75 โดยมีโครงเหล็กเสริมตลอดความยาวเสาเข็ม การเทคอนกรีตในหลุมเจาะต้องเทอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งเสาเข็ม โดยที่ไม่สามารถใช้วิธีจี้เขย่าคอนกรีตให้แน่นได้ คอนกรีตที่เหมาะสมที่จะใช้กับงานเสาเข็มเจาะระบบเปียกจะต้องมีความสามารถในการเทได้สูงมาก เนื่องจากคอนกรีตจะต้องไหลผ่านท่อเทลงไปแทนที่สารรักษาเสถียรภาพเพื่อเติมเต็มช่องว่างในหลุมเจาะโดยผ่านโครงเหล็กเสริม คอนกรีตนี้จะต้องสามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยคอนกรีตจะต้องไม่เกิดการแยกตัว ไม่เกิดการเยิ้ม (Bleeding) และมีความต้านทานการถูกชะล้างโดยน้ำใต้ดิน เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ต้องมีกำลังอัดและความคงทนตามที่ออกแบบไว้ บทความนี้ได้กล่าวถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก

ABSTRACT: Deep-seated wet-process bored pile is considered as a special structure constructed in the ground where concrete must be placed through tremie pipe to cast in-situ under the support fluid. Most of the deep bored piles have been designed with full length of steel cage and with slenderness ratio ranging from 20 to 75. Placing of concrete in bored pile is also different from other works as it required continuous placing without interruption till completion. Moreover, due to the nature of the construction process, concrete for bored piles cannot flow or being compacted by vibrator. Many of the designers and concrete suppliers usually miss the essential characteristics of the green concrete for bored piles, which must be poured under special conditions such as flowing through the tremie pipe by gravity to the base of the borehole, displacing support fluid and flowing up through the steel cage without mixing with the support fluid, ground water and soil. Such fresh concrete required resistance to segregation and bleeding, resistance to leaching and compaction under self-weight with appropriate strength and durability after hardening. This paper discusses the basic characteristics required for the concrete in deep wet-process bored pile construction.

คำหลัก: ความสามารถในการเทได้ การแยกตัวของคอนกรีต การเยิ้มน้ำ ความคงทน ความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีต

1. บทนำ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกที่มีความลึกมากจำเป็นที่จะต้องใช้คอนกรีตที่มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป เนื่องจากเสาเข็มเจาะมีโครงสร้างที่มีความชะลูดสูงมาก การก่อสร้างมักจะต้องใช้เทคนิคเทคอนกรีตใต้น้ำดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ดังนั้นเนื้อคอนกรีตของเสาเข็มเจาะจะสัมผัสกับดินและน้ำใต้ดินตลอดเวลา คอนกรีตที่เทลงหลุมเจาะจะต้องมีความเหมาะสมทั้งในสภาพที่ยังเป็นคอนกรีตสดและในสภาพคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การเลือกอัตราส่วนผสมของคอนกรีต ขนาดของมวลรวม วัสดุเชื่อมประสาน และสารผสมปรับปรุงคุณสมบัติที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่จะให้คอนกรีตมีคุณสมบัติตรงตามที่ออกแบบไว้ การซ่อมแซมคอนกรีตที่มีคุณภาพต่ำในโครงสร้างเสาเข็มเป็นสิ่งที่ทำได้ยากมาก ต้องเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากเป็นคอนกรีตที่อยู่ใต้ดินและมีความลึกมาก การควบคุมคุณภาพคอนกรีตและการควบคุมการก่อสร้างจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก ปัจจัยต่อไปนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตในเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเทคอนกรีตในเสาเข็มเจาะระบบเปียก [6]



รูปที่ 2 การเทคอนกรีตในเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกจะต้องเทผ่านท่อเท (Tremie)

2. คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการ

คอนกรีตที่เทลงในเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกควรจะมีคุณสมบัติเมื่อเป็นคอนกรีตสดและเมื่อแข็งตัวแล้วดังนี้

2.1 คุณสมบัติที่เหมาะสมของคอนกรีตสด

2.1.1 ความสามารถในการเทได้ (Workability)

คอนกรีตที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกต้องมีความสามารถในการเทได้ที่สูงมาก เพื่อให้คอนกรีตไหลเติมเต็มในช่องว่างทั้งหลุมเจาะได้และสามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเองเนื่องจากการเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยใช้ท่อเท (Tremie) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 ไม่สามารถใช้เครื่องจี้ทำให้คอนกรีตแน่นได้ โดยทั่วไปค่ายุบตัว (Slump) ที่มีความเหมาะสมสำหรับคอนกรีตในเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีค่าอยู่ระหว่าง 17-20 ซม.

2.1.2 ความต้านทานต่อการแยกตัวและการเยิ้ม

คอนกรีตที่มีความเหมาะสมจะต้องไม่เกิดการแยกตัวขณะขนส่งและขณะที่เทผ่านท่อเทใต้น้ำ (Tremie) หรือผ่านโครงเหล็กเสริม การแยกตัวของคอนกรีตเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างปูน หิน ทราย น้ำ และสารปรับปรุงคุณสมบัติมีไม่มากพอ ทำให้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงเช่น หิน ทราย และปูนจมลงด้านล่างของส่วนผสมและทำให้น้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าถูกดันขึ้นด้านบนของส่วนผสม ส่งผลให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ขึ้น การแยกตัวของเม็ดหินและการเยิ้มน้ำจะทำให้เนื้อคอนกรีตไม่มีความสม่ำเสมอ กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง และคอนกรีตบางส่วนจะมีความพรุนมาก ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย รูปที่ 4 แสดงถึงคอนกรีตที่เกิดการแยกตัวได้ง่าย ไม่เหมาะที่จะใช้งานกับเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก คอนกรีตที่สามารถต้านทานต่อการแยกตัวและการเยิ้มควรมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ไม่เกิน 0.4 ส่วนผสมจึงจะมีการยึดเกาะตัวกันได้ดี ลักษณะคอนกรีตที่เหมาะสมได้แสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากจะต้องควบคุมไม่ให้มีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากเกินไป แต่ต้องควบคุมให้ความสามารถในการเทได้มีค่าสูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่สารปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตประเภทสารลดปริมาณน้ำ (Water-reducing agent) ใช้มวลรวมหยาบที่มีลักษณะกลม และไม่ใช้ทรายที่มีความละเอียดมากเป็นส่วนผสม [5]



รูปที่ 3 ท่อเท (Tremie) และกรวยรับคอนกรีต (Hopper)



รูปที่ 4 คอนกรีตที่เกิดการแยกตัวไม่เหมาะสมที่จะใช้กับงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก [4]



รูปที่ 5 คอนกรีตที่มีสภาพเทได้สูงมากและไม่มีการแยกตัวมีความเหมาะสมที่จะใช้กับงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก [4]

2.1.3 ระยะเวลาในการก่อตัว (Setting Time)

คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มจะต้องไม่แข็งตัวเร็วเกินไป เนื่องจากการเทคอนกรีตจะต้องเทผ่านท่อเท (Tremie) ไล่คอนกรีตส่วนที่เทลงไปก่อนให้ขึ้นมาด้านบนสุด เพื่อให้คอนกรีตทั้งเสาเข็มเป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้นี้จะผสมสารหน่วงการก่อตัวเพื่อยืดระยะเวลาก่อตัว ให้คอนกรีตในเสาเข็มทั้งต้นแข็งตัวพร้อมๆกัน มีความสามารถในการเทได้ที่สูงแม้เวลาผ่านไปแล้ว 4 ชั่วโมงนับจากเริ่มผสมคอนกรีต ค่าการยุบตัวต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 100 มม. ดังรูปที่ 6 และมีเนื้อคอนกรีตสม่ำเสมอกันตลอดทั้งเสาเข็ม

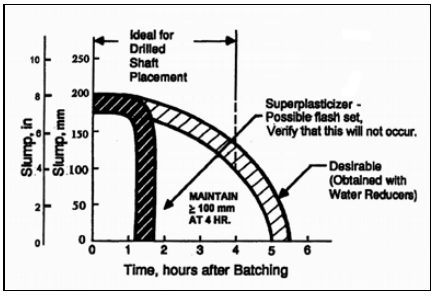
2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

2.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต

ตามปกติเสาเข็มเจาะระบบเปียกจะมีความลึกมาก ลักษณะการรับแรงของเสาเข็มส่วนใหญ่จะเป็นแบบรับน้ำหนักด้วยแรงเสียดทาน (Friction type) หรืออาจรับน้ำหนักด้วยแรงเสียดทานผสมแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Friction and end bearing type) การวิบัติของเสาเข็มส่วนใหญ่จะเกิดจากดินรอบๆเสาเข็มรับแรงเฉือนไม่ได้ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตในเสาเข็มไม่จำเป็นต้องมีค่าสูงมากนัก (ตามปกติจะใช้ $f_c' \cong$ 240-280 ksc)

2.2.2 ความคงทนของคอนกรีต

เนื่องจากเสาเข็มเป็นโครงสร้างใต้ดินที่มีความลึกมาก ผิวคอนกรีตจะต้องสัมผัสกับดินและน้ำใต้ดินตลอดเวลา คอนกรีตที่ใช้จึงต้องสามารถทนสภาพเหล่านี้ได้โดยที่เนื้อคอนกรีตไม่มีความเสียหาย ทั้งนี้เนื้อคอนกรีตควรต้องมีความแน่นสม่ำเสมอตลอดทั้งต้น คุณสมบัตินี้มีความสำคัญสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากถ้าเนื้อคอนกรีตไม่สมบูรณ์สม่ำเสมอ การถ่ายแรงในเสาเข็มสู่ชั้นดินที่ความลึกต่างๆก็จะเกิดปัญหาตามมาด้วย



รูปที่ 6 คอนกรีตที่ใช้จะต้องมีค่ายุบตัวสูงกว่า 100 มม. เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง [6]

3. คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับวัสดุส่วนผสมคอนกรีต

3.1 วัสดุประสานในคอนกรีต

ในงานเสาเข็มเจาะระบบเปียกปริมาณรวมของวัสดุประสานควรมีค่าไม่น้อยกว่า 380 กก./ลบ.ม. และในกรณีที่สัมผัสกับน้ำทะเลไม่ควรน้อยกว่า 400 กก./ลบ.ม. คอนกรีตจะมีความยึดเกาะที่ดี มีความคงทน และมีกำลังอัดได้ตามที่ออกแบบไว้

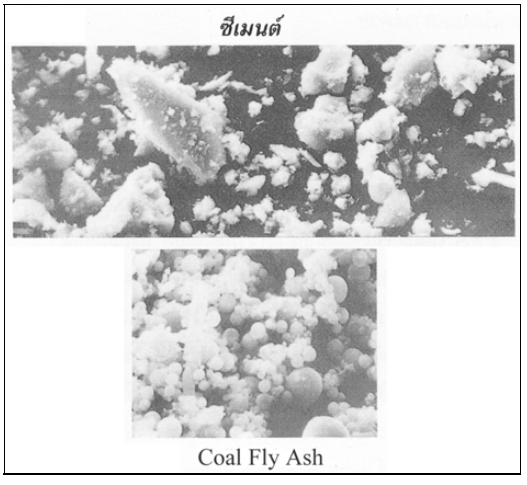
3.1.1 ปูนซีเมนต์

ตามปกติจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นส่วนผสม ในบางกรณีเมื่อก่อสร้างใน

สภาพแวดล้อมของทะเล จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต้านทานซัลเฟต (Sulphate Resistance Portland Cement) ในกรณีใช้วัสดุประสานอื่นนอกจากปูนซีเมนต์ผสมด้วยแล้ว ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำสุดในส่วนผสมควรมีค่าอย่างน้อย 200 กก./ลบ.ม.

3.1.2 วัสดุประสานอื่นนอกจากปูนซีเมนต์

วัสดุประสานที่นิยมใช้ในคอนกรีตสำหรับเสาเข็มเจาะได้แก่ เถ้าลอยจากถ่านหิน (Coal fly ash) ซึ่งแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ เพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ลดพฤติกรรมการแยกตัวและการเยิ้ม ยืดระยะเวลาในการก่อตัว [7] อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในคอนกรีตจะทำให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ตามปกติจะใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผสมคอนกรีตในปริมาณระหว่าง 20-50% ของวัสดุประสานทั้งหมด



รูปที่ 7 รูปขยายเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ (รูปบน) กับเถ้าลอยจากถ่านหิน (รูปล่าง) [7]

3.2 วัสดุมวลรวม

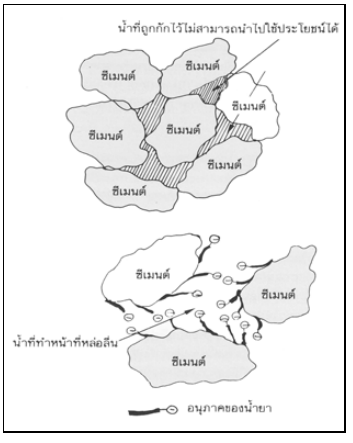
เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้จำเป็นต้องมีความสามารถในการเทได้สูงมาก ขนาดที่เหมาะสมของมวลรวมหยาบควรมีค่าระหว่าง 15-20 มม. เนื่องจากการใช้ขนาดหินที่เล็กเกินจำเป็นต้องใช้ปริมาณวัสดุประสานมาก ส่วนหินที่มีขนาดใหญ่เกินจะทำให้คอนกรีตมีโอกาสเกิดการแยกตัวและมีความสามารถในการเทได้ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ปริมาณหินที่ใช้ไม่ควรมีค่าเกิน 60% ของวัสดุมวลรวมทั้งหมด

3.3 สารปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต

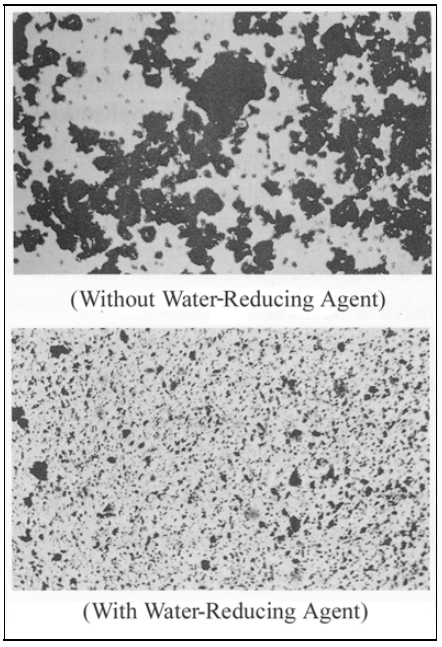
คอนกรีตที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกจะต้องมีคุณสมบัติพิเศษกว่าคอนกรีตธรรมดาเพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานกับเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก บางกรณีมีความจำเป็นต้องผสมสารปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ในส่วนผสมคอนกรีต

3.3.1 สารลดปริมาณน้ำ (Water-reducing Agent)

คอนกรีตที่เทจะต้องมีความสามารถในการเทได้ที่สูงมากเพื่อให้คอนกรีตไหลผ่านท่อเทและเติมเต็มช่องว่างในเสาเข็ม โดยไม่มีการจี้คอนกรีต นอกจากนี้ ต้องควบคุมไม่ให้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงเกินไป การใช้สารลดปริมาณน้ำจะช่วยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติการไหลที่ดี เนื่องจากสารนี้จะทำให้ส่วนผสมสามารถนำเอาน้ำมาใช้ประโยชน์ทำหน้าที่หล่อลื่นระหว่างอนุภาคซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 การที่คอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำทำให้คอนกรีตมีความแน่น สามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง มีกำลังอัดสูง ไม่เกิดการแยกตัว และทำให้เนื้อคอนกรีตมีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 เปรียบเทียบคอนกรีตที่ไม่ผสมสารลดปริมาณน้ำ (รูปบน) กับคอนกรีตที่ผสมสารลดปริมาณน้ำ (รูปล่าง) ซึ่งมีความสามารถในการเทได้ที่สูงกว่า [4]



รูปที่ 9 เปรียบเทียบคอนกรีตที่ไม่ผสมสารลดปริมาณน้ำ (รูปบน) กับคอนกรีตที่ผสมสารลดปริมาณน้ำ (รูปล่าง) พบว่าคอนกรีตที่ผสมสารลดปริมาณน้ำมีเนื้อสม่ำเสมอมากกว่า [4]

3.3.2 สารหน่วงการก่อตัว (Retarder)

การเทคอนกรีตในหลุมเจาะลึกจะต้องใช้คอนกรีตในปริมาณมากและใช้เวลาในการเทนาน คอนกรีตที่ใช้ควรมีระยะเวลาก่อตัวนานพอที่คอนกรีตทั้งหลุมเจาะที่จะเริ่มแข็งตัวหลังจากเทเสร็จ เพื่อให้คอนกรีตทั้งเสาเข็มมีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้คอนกรีตที่เทไปก่อนหน้ามีความสามารถในการไหลได้ดีขณะที่เทคอนกรีต ปริมาณการผสมสารหน่วงการก่อตัวจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ต้องการใช้หน่วงในการเทคอนกรีตของหลุมเจาะนั้น

3.3.3 สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-entraining Agent)

สารกักกระจายฟองอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากขึ้นในเนื้อคอนกรีตขณะที่เป็นคอนกรีตสด ซึ่งสารนี้จะช่วยทำให้คอนกรีตสดมีความยืดเกาะตัวดีขึ้น ช่วยลดการแยกตัวและลดการเยิ้มน้ำของคอนกรีต อย่างไรก็ตามฟองอากาศนี้จะทำให้คอนกรีตมีความพรุน ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ทำให้ความทึบน้ำของคอนกรีตลดลง และทำให้ความคงทนของคอนกรีตลดลงด้วย [4] ดังนั้น ควรใช้สารชนิดนี้ในปริมาณที่เหมาะสมเท่านั้น

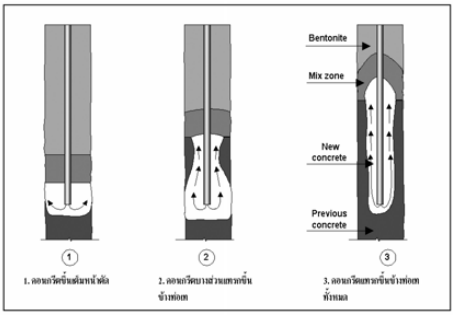
4. การเทคอนกรีตในหลุมเจาะ

เพื่อให้คอนกรีตในหลุมเจาะมีความสมบูรณ์ การควบคุมการเทคอนกรีตจะต้องทำตามข้อกำหนดต่อไปนี้

- ปลายท่อเทต้องจมอยู่ในคอนกรีตอย่างน้อย 2 ม. ตลอดเวลา เพื่อไม่ให้คอนกรีตผสมกับสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะและทำให้เนื้อคอนกรีตของเสาเข็มเจาะมีความต่อเนื่อง

- ก่อนเทคอนกรีตจะต้องใส่วัสดุกั้น (Plug) ระหว่างคอนกรีตกับสารรักษาเสถียรภาพ เพื่อไม่ให้คอนกรีตสัมผัสกับสารรักษาเสถียรภาพโดยตรง เนื้อคอนกรีตจะได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือถูกชะล้าง

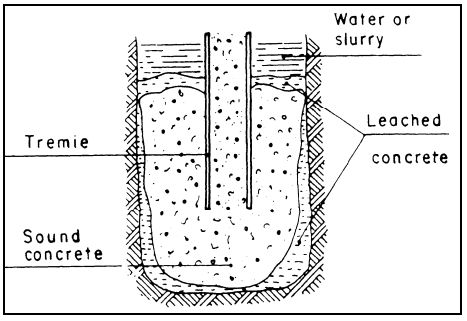
- ไม่ควรให้ท่อเทจมอยู่ในคอนกรีตมากเกินไป (ปลายท่อเทควรจมอยู่ในคอนกรีตระหว่าง 3-5 ม.) เพราะจะทำให้แรงดันของคอนกรีตในท่อเทไม่มีค่าสูงพอที่จะครูดเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ที่เกิดจากสารรักษาเสถียรภาพที่ผนังหลุมเจาะซึ่งเป็นสารละลายเบนโทไนท์ และจะเป็นผลให้กำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะลดลง [2] ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ถ้าปลายท่อเทฝังอยู่ในคอนกรีตลึกเกินไป แรงดันจากคอนกรีตภายในท่อเทจะไม่มากพอที่จะครูดผนังหลุมเจาะเพื่อกำจัดเยื่อบุทึบน้ำ (Filter cake) ออกได้

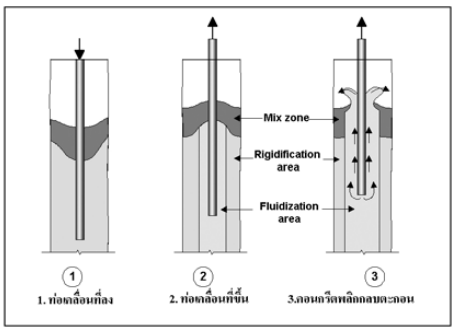
- ในระยะเริ่มต้นไม่ควรให้ระยะห่างระหว่างปลายท่อเทกับก้นหลุมเจาะมากเกินไป (ระยะห่างที่เหมาะสมควรมีค่าเท่ากับ 7.5 ซม.) เพราะจะทำให้แรงดันจากท่อเทไม่มาก

พอที่จะไล่ตะกอนก้นหลุมขึ้นมาได้ทั้งหมด อันจะส่งผลให้แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าลดลง เนื่องจากตะกอนก้นหลุมสะสมกันอยู่ที่ปลายเสาเข็ม ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ในขณะเริ่มเทคอนกรีต หากปลายท่อเทอยู่ห่างจากก้นหลุมมากเกินไป จะทำให้คอนกรีตที่ดีไม่สามารถไล่คอนกรีตที่ผสมตะกอนดินออกไปได้

- ไม่ชักท่อเทขึ้นๆลงๆ เพราะจะทำให้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีไปผสมกับคอนกรีตที่ผสมกับตะกอน (คอนกรีตที่เทไปชุดแรกก่อนหน้านี้) เป็นผลให้เนื้อคอนกรีตไม่สม่ำเสมอกันและเกิดส่วนที่มีกำลังอัดลดลง ดังในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การชักท่อเทขึ้นๆลงๆจะทำให้คอนกรีตดีผสมกับคอนกรีตส่วนบนสุดที่มีตะกอนดินปนอยู่

- ใช้ท่อเทที่มีขนาดเหมาะสมกับหลุมเจาะ เนื่องจากหากใช้ท่อเทที่มีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้คอนกรีตไหลไม่สะดวก แต่ถ้าท่อเทมีขนาดใหญ่เกินจะทำให้สอดไปในโครงเหล็กเสริมไม่สะดวกและอาจทำความเสียหายให้โครงเหล็กเสริมได้ ตามปกติท่อเทที่ใช้จะมีขนาด 10 นิ้ว

5. สรุป

คอนกรีตที่ใช้กับงานเสาเข็มเจาะจะต้องมีคุณสมบัติพิเศษกล่าวคือ มีความสามารถในการเทได้สูงมาก สามารถอัดตัวแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง มีความต้านทานต่อการแยกตัวและการเยิ้ม มีระยะเวลาในการก่อตัวที่เหมาะสม มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมใต้ดินสูง มีเนื้อคอนกรีตแน่นสม่ำเสมอ มีกำลังอัดตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งการผสมคอนกรีตให้มีคุณสมบัติดังกล่าวจะต้องออกแบบส่วนผสมระหว่างวัสดุประสาน วัสดุมวลรวม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และสารปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้เหมาะสม นอกจากนี้ ขั้นตอนและวิธีการเทคอนกรีตที่เหมาะสมจะช่วยทำให้คอนกรีตในเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกมีความสมบูรณ์ได้ ปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะทำให้เสาเข็มเจาะลึกระบบเปียกมีคุณภาพสูง สามารถรับน้ำหนักจากโครงสร้างได้ตามที่ออกแบบไว้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ICE, Specification for Piling and embedded retaining wall, Thomas Telford Publishing, London, 1996

[2] Teparaksa, W and Boonyarak, T, Performance and Behavior of Polymer Slurry in Wet-Process Bored Pile in Bangkok Subsoils, Proceeding of the fourteenth KKNN Seminar on Civil Engineering, Kyoto, November, pp 439-444, 2001.

[3] Xanthakos, P. P., Slurry Walls as Structural Systems . McGraw – Hill Inc., 1994

[4] ชัชวาล เศรษฐบุตร, คอนกรีตเทคโนโลยี, เดอะพริ้น อินเตอร์เนชันแนล, 2536

[5] ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์, ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล และสุเมธ ประเวศวรารัตน์, ปัญหาในงานเสาเข็มเจาะที่เกิดจากคุณภาพคอนกรีต, เอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, หน้า GTE 37-44, กรุงเทพฯ, 2544

[6] ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์, ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, เฉลิมพล มโนสุทธิสารและนิธิวุฒิ จิตตะกวี, ลักษณะพิเศษของคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานเสาเข็มเจาะระบบเปียก, เอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8,หน้า GTE 322-327, ขอนแก่น, 2545

[7] ว.ส.ท. 2544, การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต พิมพ์ครั้งที่ 1 ตุลาคม 2544

ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อ ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์, บริษัทซีฟโก้ จำกัด, 26/10 ถนนรามอินทรา ซอย 109, แขวงบางชัน, เขตคลองสามวา, กรุงเทพฯ 10510, โทร. 0-2919-0090 โทรสาร 0-2919-0098 หรือ seafco@seafco.co.th

การเตรียมงานและควบคุมการก่อสร้างฐานรากในพื้นที่ประวัติศาสตร์

PREPARATION AND INSPECTION OF FOUNDATION CONSTRUCTION IN HISTORICAL AREA

สุเมธ ประเวศวรารัตน์ [1] ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ [2] และธยานันท์ บุณยรักษ์ [2]

[1]ผู้จัดการโครงการ [2]วิศวกรปฐพี

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

บทคัดย่อ : การก่อสร้างฐานรากขนาดใหญ่รวมถึงระบบโครงสร้างใต้ดินในปัจจุบันได้มีการขยายตัวอย่างมาก ในบางโครงการพื้นที่ก่อสร้างเหล่านี้จะต้องทำงานใกล้กับพื้นที่ประวัติศาสตร์ซึ่งมีความอ่อนไหวสูง โดยที่ข้อกำหนดต่างๆเกี่ยวกับการทำงานในบริเวณดังกล่าวจะมีข้อจำกัดสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ปกติ ดังนั้นการก่อสร้างในบริเวณนี้จะต้องใช้ความระมัดระวังสูง จะต้องมีการเตรียมการและการวางแผนเป็นอย่างดี ขณะทำการก่อสร้างจะต้องทำการสังเกตถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ บางกรณีอาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเพื่อลดผลกระทบจากการทำงานต่อโครงสร้างประวัติศาสตร์ เนื้อหาในบทความประกอบด้วย ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการก่อสร้างฐานราก การเตรียมงานและวางแผน การควบคุมและเฝ้าระวังขณะทำการก่อสร้าง รวมทั้งได้แสดงตัวอย่างการก่อสร้างฐานรากในบริเวณใกล้กับพื้นที่ประวัติศาสตร์ 3 โครงการ

ABSTRACT: Foundation construction adjacent to historical building has many constraints and requirements. Contractor needs to have thorough site preparation and proper plan to minimize adverse effect induced by construction on historical structure. During construction period, appropriate observation and monitoring should be carried out. In some cases, construction sequences or techniques need to be modified in order to minimize damage to structures. This paper presents effects from foundation construction on structure, construction planning, site preparation and construction monitoring. Three case studies of foundation construction nearby historical area are also presented.

KEYWORDS : Foundation, Pile, Retaining Wall

For further details, contact *Chanchai Submaneewong, 26/10 Ram Intra 109 Rd., Bangchan, Khlong Sam Wah, Bangkok 10510, Tel : 0-2919-0090-7, Fax: 0-2919-0098, E-mail: seafco@seafco.co.th*

1. บทนำ

การก่อสร้างโครงสร้างอาคารสูงและระบบสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ในปัจจุบันมีการขยายตัวเป็นอย่างมาก ฐานรากขององค์อาคารเหล่านี้ส่วนใหญ่จะออกแบบใช้ระบบฐานรากเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในการรับ-ถ่ายน้ำหนักโครงสร้าง ในการก่อสร้างระบบฐานรากซึ่งเป็นโครงสร้างใต้ดินสำหรับบางโครง การออกแบบให้มีชั้นใต้ดินทำให้การก่อสร้างฐานรากจำเป็นต้องมีการขุดดินจนถึงระดับตัดหัวเสาเข็มซึ่งต้องมีการใช้ระบบกำแพงป้องกันดิน เช่น Sheet Pile หรือกำแพง Diaphragm Wall เข้ามาเกี่ยวข้องในการก่อสร้าง และในบางกรณีการก่อสร้างตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่นพื้นที่ประวัติศาสตร์ หรือพื้นที่ใกล้กับเครื่องจักรหรือเครื่องมือที่มีความไวสูง (รูปที่ 1) ดังนั้นการก่อสร้างในบริเวณดังกล่าวจะต้องมีการเตรียมงานที่ดี มีการเฝ้าระวังและพิจารณาผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ในเรื่องของเสียง ความสั่นสะเทือนและฝุ่น โดยการควบคุมมลภาวะจากหน่วยงานก่อสร้างให้อยู่ในเกณฑ์กำหนดตามข้อบัญญัติของกฎหมาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมลภาวะทางเสียงและฝุ่นจะก่อให้เกิดการร้องเรียนและปัญหาต่อสุขอนามัยของประชาชน ในขณะที่มลภาวะเรื่องการสั่นสะเทือนจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งก่อสร้างข้างเคียง สิ่งต่างๆ เหล่านี้ผู้รับเหมาจะต้องมีความเข้าใจในขั้นตอนการก่อสร้างระบบฐานรากเป็นอย่างดี โดยจะต้องมองเห็นขั้นตอนที่อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่ประวัติศาสตร์ รวมทั้งหาวิธีตรวจสอบและป้องกันอย่างเหมาะสม บทความนี้นำเสนอผลกระทบและปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างฐานราก ตลอดจนการควบคุมงานก่อสร้างโดยจะเน้นในงานก่อสร้างเสาเข็มและงานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดิน



รูปที่ 1 การก่อสร้างฐานรากอาคารในพื้นที่ประวัติศาสตร์ต้องมีการวางแผนและควบคุมงานอย่างดี

2. ผลกระทบหลักจากการก่อสร้างฐานราก

ผลกระทบหลักจากการก่อสร้างฐานรากซึ่งเกี่ยวข้องกับงานหลายกิจกรรมคืองานก่อสร้างเสาเข็ม งานขุดดินซึ่งมีระบบการก่อสร้างหรือติดตั้งกำแพงกันดินเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่งผลต่อพื้นที่รอบๆ ข้างได้ทุกๆ กิจกรรม โดยเฉพาะถ้าพื้นที่ก่อสร้างอยู่ใกล้กับพื้นที่ประวัติศาสตร์ที่ควรค่าต่อการอนุรักษ์นั้น ต้องมีการวางแผนเตรียมงานและควบคุมการก่อสร้างไม่ให้เกิดผลกระทบหรือเกิดให้น้อยที่สุด ถ้าโครงการใดขาดการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างที่ดีพอ อาจจะก่อให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างข้างเคียงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวิบัติของโครงสร้างข้างเคียงที่เกิดจากการขาดการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างที่ดีพอ

ผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างฐานราก แยกออกได้เป็น

2.1. ผลกระทบจากการติดตั้งเสาเข็มตอกต่อพื้นที่ข้างเคียง

ผลกระทบที่เกิดขึ้นในการตอกเสาเข็มต่อพื้นที่รอบๆ ข้างได้แก่

2.1.1. การเคลื่อนตัวของดิน

ในการตอกเสาเข็มทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัว (Ground movement) ผิวดินเกิดการอูดตัว (Ground heave) และเป็นผลให้เสาเข็มเกิดการยกตัวขึ้น จากการศึกษาในอดีตของ Premchitt et al (1988) พบว่าผิวดินเกิดการอูดตัวขึ้น 150 มม. หลังจากการตอกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงผ่านชั้นดินเหนียวที่เป็น Marine Deposit

2.1.2. มลภาวะทางเสียง

แหล่งที่ทำให้เกิดเสียงสำหรับระบบเสาเข็มตอกมาจากการตกกระทบของตุ้มตอก (Hammer) ในระหว่างการตอกเสาเข็ม

2.1.3. แรงสั่นสะเทือน

แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มจะส่งผลให้เกิดการบดอัดตัว (Compaction) ของดินโดยเฉพาะดินทราย ซึ่งจะส่งผลให้พื้นดินเกิดการทรุดตัวเนื่องมาจากการอัดตัวทำให้ช่องว่าอากาศในดินลดลง (O' Neill, 1971) นอกจากนี้แรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มยังส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงให้เกิดความเสียหายได้ ซึ่งรายละเอียดในส่วนนี้ได้ทำการอธิบายในหัวข้อที่ 2.2.4

2.2. ผลกระทบจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะต่อพื้นที่ข้างเคียง

ในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ มีขั้นตอนที่อาจส่งผลกระทบต่อพื้นที่รอบๆ ข้างได้แก่ มลภาวะทางสิ่งแวดล้อม และแรงสั่นสะเทือนในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มเจาะซึ่งจะเกิดปัญหาในขั้นตอนการลงและการถอนปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing)

2.2.1. มลภาวะจากของเหลวค้ำจุนจากการขุดเจาะเสาเข็ม

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยใช้สารละลายเบ็นโทไนท์มีข้อเสียคือก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเบ็นโทไนท์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้และอนุภาคของเบ็นโทไนท์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาด้านฝุ่นละออง ดินที่ขุดเจาะออกมาผสมกับสารละลายเบ็นโทไนท์จะอยู่ในสภาพที่เหนียวคล้ายน้ำโคลนเหลว (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 สภาพดินที่เกิดขึ้นในหน่วยงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบ็นโทไนท์

ในปัจจุบันจึงได้มีการทำสารละลายโพลิเมอร์มาใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในหลายๆ โครงการ (ณรงค์และคณะ, 2543) เนื่องจากโพลิเมอร์เป็นสารประเภท Hydrocarbon ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม (รูปที่ 4) นอกจากนี้สารละลายโพลิเมอร์มีกลไกในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะโดยใช้เส้นใย (Strand) และ Gel เข้าไปอุดช่องว่างในดินและทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินดีขึ้น งานเสาเข็มเจาะในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะใช้สารละลายโพลิเมอร์มากขึ้น ส่วนในงานก่อสร้างกำแพงกันดินนั้นยังคงใช้สารละลายเบนโทไนท์ในการรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ



รูปที่ 4 สภาพหน้าดินที่ดีกว่าที่เกิดขึ้นในหน่วยงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์

2.2.2. มลภาวะจากฝุ่น และเศษสิ่งสกปรกจากการก่อสร้าง

มลภาวะจากฝุ่น และเศษสิ่งสกปรกจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะนั้นเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มมีการขุดดินและมีการเทคอนกรีตในที่ ในบางครั้งจึงต้องมีการกองวัสดุก่อสร้างหรือกองดินที่ขุดเจาะขึ้นมาได้รอการขนถ่ายไปทิ้งนอกหน่วยงาน ซึ่งหลีกเลียงไม่ได้ที่จะไม่เกิดฝุ่นละออง แต่สามารถลดปัญหาได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

- ลดปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้น โดยทำการพรมน้ำบริเวณก่อสร้าง และบริเวณกองหิน ทรายของโรงผลิตคอนกรีต
- ทำรั้วโดยรอบโรงผลิตคอนกรีต เพื่อป้องกันฝุ่นจากขั้นตอนการผลิตคอนกรีต
- ติดตั้งเครื่องล้างล้อ เพื่อทำความสะอาดล้อของพาหนะที่จะออกจากสถานที่ก่อสร้าง (รูปที่ 5)




รูปที่ 5 การล้างล้อพาหนะที่จะออกนอกหน่วยงานก่อสร้างโดยการติดตั้งเครื่องล้างล้ออัตโนมัติ

- จัดให้มีพนักงานทำความสะอาดทั้งภายใน และรอบบริเวณสถานที่ก่อสร้าง โดยเฉพาะบริเวณทางเข้า-ออก

2.2.3. มลภาวะจากเสียงจากการก่อสร้าง

ถึงแม้การก่อสร้างเสาเข็มเจาะจะไม่มีการใช้ตุ้มน้ำหนักตอกแต่การก่อสร้างจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ซึ่งได้แก่ รถเครน รถขุดดินและรถบรรทุก ในการทำงาน ส่งผลให้เกิดเสียงต่างๆจากเครื่องจักร การป้องกันผลกระทบจากมลภาวะจากเสียงจากการก่อสร้างนั้นอาจทำตามวิธีการดังต่อไปนี้

- ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมกับงานในพื้นที่วิกฤต
- วางแผนการทำงานที่ก่อให้เกิดเสียงดังให้ถูกเวลา เพื่อไม่เป็นการรบกวนต่อผู้อยู่ในพื้นที่ข้างเคียง
- บำรุงรักษาเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้างอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดเสียงที่อาจเกิดจากการทำงานผิดปกติของเครื่องจักร
- ใช้พนักงานควบคุมเครื่องจักรที่มีประสบการณ์ เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างราบรื่น
- ลดปริมาณงานที่ทำให้เกิดเสียงดังให้น้อยลง เช่น ตักคอนกรีตส่วนเกินจากระดับตัดใช้งานหลังจากทำการเทคอนกรีตเสร็จในการก่อสร้างกำแพงกันดินแบบขุดหล่อในที่ เพื่อให้เป็นการลดงานสกัดกำแพง ซึ่งเป็นงานที่ทำเกิดเสียงดัง

2.2.4. แรงสั่นสะเทือนจากการก่อสร้าง

แรงสั่นสะเทือนในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ เกิดจากกิจกรรมในการก่อสร้างหลายประเภทเช่น การลงปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing Installation) โดยใช้หัวกดเขย่า (Vibro Hammer) ซึ่งมีความถี่ในการสั่นสะเทือนสูง การเคลื่อนย้ายของเครื่องจักรและรถบรรทุกดินเป็นต้น การป้องกันผลกระทบจากมลภาวะจากแรงสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากการก่อสร้างนั้นอาจทำตามวิธีการดังต่อไปนี้

- ทำการก่อสร้างด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้กับโบราณสถาน
- ลดการใช้พาหนะขนาดใหญ่ผ่านบริเวณอาคารโบราณสถาน โดยจัดหาระบบลำเลียงดินโดยสายพานแทนการใช้รถบรรทุกดิน และจัดให้มีระบบลำเลียงคอนกรีตโดยใช้ระบบปั๊ม แทนการใช้รถบรรทุกคอนกรีต
- ในกรณีที่การก่อสร้างปกติก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนเกินกว่าพิกัดที่กำหนดไว้ต่อพื้นที่ที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบต่ออาคารข้างเคียง อาจจำเป็นต้องใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวแบบสั้นความยาวประมาณ 5-8 ม. โดยไม่ใช้หัวกดเขย่า (Vibro Hammer)

2.3. ผลกระทบจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานราก

ในการขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานรากโดยทั่วไปต้องมีการเลือกใช้ระบบกำแพงป้องกันดินให้เหมาะสม สิ่งที่ผู้เกี่ยวข้องกับงานขุดดินต้องพิจารณาคือการเคลื่อนที่และทรุดตัวของดินรอบบ่อขุด ซึ่งเป็นสิ่งที่จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แม้จะมีการเลือกใช้ระบบกำแพงกันดินและระบบค้ำยันแบบใดก็ตามก็ยังไม่สามารถขจัดการเคลื่อนตัวซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของดินหรือการโก่งตัวของระบบกำแพงและค้ำยันได้ทั้งหมด แต่สามารถออกแบบระบบกำแพงเพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวของดินให้เหมาะสมตามสภาพของงานและสิ่งแวดล้อมข้างเคียง อย่างไรก็ตามระดับความรุนแรงของการเคลื่อนตัวเป็นสิ่งที่คำนวณยาก เพราะว่ามีความซับซ้อนของปฏิกิริยาระหว่างชั้นดินกับโครงสร้างที่กันดินไว้และจากปัจจัยอื่นๆ แต่อาจสังเกตจากผลการวัดของอุปกรณ์การตรวจจับการเคลื่อนตัวของดินที่ติดตั้งไว้ของงานก่อสร้างในอดีตเป็นเกณฑ์ และจัดตารางการตรวจวัดงานที่ก่อสร้างเป็นระยะๆให้สัมพันธ์กับความก้าวหน้าของงาน จึงอาจจะควบคุมการเคลื่อนตัวให้อยู่ในระดับที่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดน้อยลงได้

ปริมาณการเคลื่อนที่และทรุดตัวของดินรอบบ่อขุดขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน (สภาวะน้ำใต้ดิน คุณสมบัติด้านกำลังและการเสียรูป) และวิธีการก่อสร้าง (ขั้นตอนการขุดดินและการติดตั้งค้ำยัน ชนิดและความแข็งแรงของกำแพงและระบบค้ำยัน)

2.3.1.การขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินเป็นเสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile Wall)

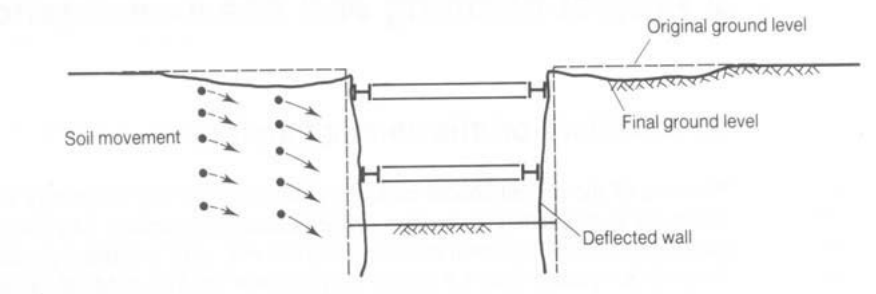
เสาเข็มพืดเหล็กเป็นระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall) อาจมีความเหมาะสมต่องานก่อสร้างใต้ดินที่ลึกไม่เกิน 8 เมตร เนื่องจากราคาประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall) ซึ่งได้แก่ Diaphragm Wall หรือ Secant Pile Wall แต่ทั้งนี้ในขั้นตอนการทำงานจะพบว่าการใช้ Sheet Pile อาจส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง ดังนี้

ก. สภาพชั้นดิน: การตอกเสาเข็มเหล็กโดยใช้เครื่องเขย่าในชั้นดินอ่อน จะเกิดความสั่นสะเทือน และหากกระทบกับสิ่งกีดขวางใต้ดินที่ไม่เป็นธรรมชาติ (เช่นสิ่งก่อสร้างเก่า) จะทำให้ความสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นอีกมากจนอาจเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างข้างเคียงได้

ข. ความลึกของงานก่อสร้างใต้ดิน: ในงานก่อสร้างใต้ดินลึกในใจกลางเมืองหรือพื้นที่ประวัติศาสตร์ที่ต้องใช้เสาเข็มพืดเหล็กยาวกว่า 16 เมตร จะทำให้การเก็บรวมกอง การขนส่ง การยกย้าย การยกปัก การตอกเสาเข็มพืดเหล็กขนาดยาวเป็นเรื่องที่ควบคุมลำบาก และเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุได้สูง

ค. เสียงและความสั่นสะเทือน: เสียงจากการตอกหรือกดเสาเข็มพืดเหล็กในใจกลางเมืองหรือพื้นที่ประวัติศาสตร์เป็นสิ่งที่ป้องกันได้ยาก และการก่อสร้างในใจกลางเมืองมักจะมีสิ่งก่อสร้างและสาธารณูปโภคข้างเคียง ซึ่งมักจะมีความอ่อนไหวต่อความสั่นสะเทือนในการตอกหรือถอนเสาเข็มพืดเหล็ก

ง. เนื่องจาก Sheet Pile เป็นระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น ดังนั้นในงานขุดดินที่ใช้ Sheet Pile ดินจะเกิดการเคลื่อนตัวสูง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวและทรุดตัวรอบบ่อขุด ซึ่งอาจส่งผลเสียหายต่อโครงสร้างโดยรอบได้มาก (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวและทรุดตัวของดินรอบบ่อที่หลีกเลี่ยงได้ยาก (after Williams et al, 1993)

2.3.2. การขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง (Rigid Wall)

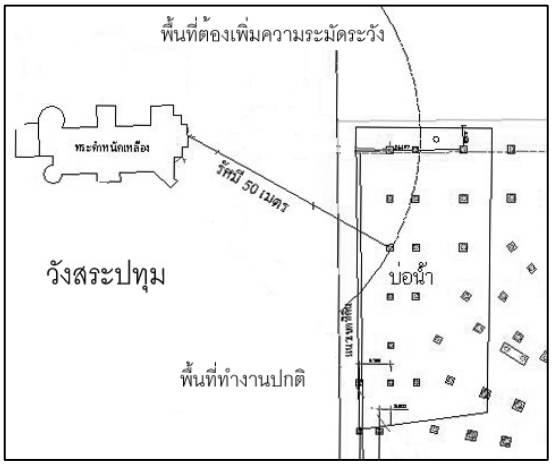
วิธีการก่อสร้างระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall) ซึ่งได้แก่ Diaphragm Wall หรือ Secant Pile Wall คล้ายกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะซึ่งเป็นการติดตั้งแบบแทนที่มวลดิน ทำให้ผลกระทบจากการก่อสร้างต่อพื้นที่ข้างเคียงคล้ายกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะซึ่งมีการสั่นสะเทือนไม่มากนัก และระดับเสียงของการก่อสร้างมีไม่มากจนเกินไป จึงเหมาะสมกับการทำงานในใจกลางเมืองที่มีประชากรและยานยนต์หนาแน่น และพื้นที่ประวัติศาสตร์ที่มีความอ่อนไหว

3. การควบคุมการก่อสร้างเพื่อควบคุมความเสียหาย

3.1. กำหนดแผนและขั้นตอนการทำงาน

ก่อนการทำงานต้องศึกษาพื้นที่การก่อสร้างและพื้นที่ข้างเคียงโดยเฉพาะถ้าพื้นที่ข้างเคียงเป็นพื้นที่ประวัติศาสตร์ อาจจำเป็นต้องทำการหาระยะวิกฤตเพื่อทดสอบผลกระทบก่อนการก่อสร้างและกำหนดแบ่งพื้นที่การก่อสร้างก่อน-หลัง เพื่อหลีกเลี่ยงให้เกิดผลกระทบที่น้อยที่สุด ซึ่งการกำหนดระยะวิกฤตมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

- พิจารณาจากผลของการทดสอบของโครงการที่ผ่านมา เช่น กำหนดระยะวิกฤตตามระยะห่างที่ได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ดังตัวอย่างรูปที่ 14 ในกรณีที่ตำแหน่งการก่อสร้างฐานรากอยู่ห่างจากระยะวิกฤต ก็สามารถทำการก่อสร้างตามขั้นตอนปกติ แต่หากการก่อสร้างอยู่ภายในระยะวิกฤต ก็จะต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษ และอาจจะต้องเปลี่ยนขั้นตอนหรือวิธีการก่อสร้างให้เหมาะสม
- พิจารณาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี การก่อสร้างฐานรากบางโครงการจะต้องทำการขุดดิน ซึ่งจะทำให้เกิดการทรุดตัวในระดับต่างกันตามระยะห่างจากพื้นที่ก่อสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎีสามารถประมาณค่าการทรุดตัวจากการก่อสร้างได้ ทำให้ผู้รับเหมาทราบว่าการขุดดินอาจทำให้โครงสร้างข้างเคียงทรุดตัวเพียงใด ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอาจมีการทรุดตัวเกิดขึ้นในระดับสูงมากจนเกินที่ยอมรับได้ ก็ควรจะหามาตรการป้องกันเช่น เพิ่มความยาวของระบบกำแพงกันดิน เพิ่มความแข็งแรงของระบบค้ำยัน ปรับปรุงคุณภาพดิน หรือเลือกขั้นตอนการขุดดินที่สามารถลดขอบเขตของการทรุดตัว
- พิจารณาจากลักษณะของโครงสร้างประวัติศาสตร์ ถ้าโครงสร้างประวัติศาสตร์มีความแข็งแรงน้อยหรือมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหาย ก็ควรจะเพิ่มระยะวิกฤตเข้าไปในพื้นที่ก่อสร้างมากขึ้นและควรหามาตรการป้องกันที่เหมาะสม รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ก่อสร้างฐานราก โดยแบ่งเป็นพื้นที่การทำงานที่ต้องเพิ่มความระมัดระวังกับพื้นที่ทำงานตามขั้นตอนปกติ



รูปที่ 7 ก. พื้นที่ภายในรัศมี 50 m จากวังสระปทุมต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษ



รูปที่ 7 ข. พื้นที่ภายในแนว 50 m จากวัดและโรงเรียนต้องเพิ่มความระมัดระวัง

3.2. การตรวจวัดโดยการสังเกตการณ์

ขณะทำการก่อสร้างจะต้องทำการสังเกตโดยเบื้องต้น เช่นดูปริมาณฝุ่นด้วยสายตา ตรวจสอบความดังเสียงด้วยการฟัง ตรวจสอบแรงสั่นสะเทือนด้วยความรู้สึก และสังเกตโครงสร้างข้างเคียงว่ามีสิ่งที่ผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ เช่น ในงานขุดดิน ต้องคอยสังเกตดูระบบค้ำยันและถนนโดยรอบโครงการว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นหรือไม่ถ้าเกิดดังตัวอย่างในรูปที่ 8 ก็ต้องหาสาเหตุเพื่อแก้ไขต่อไป



รูปที่ 8 การทรุดตัวของถนนรอบบ่อขุดซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

3.3 การตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือวัด

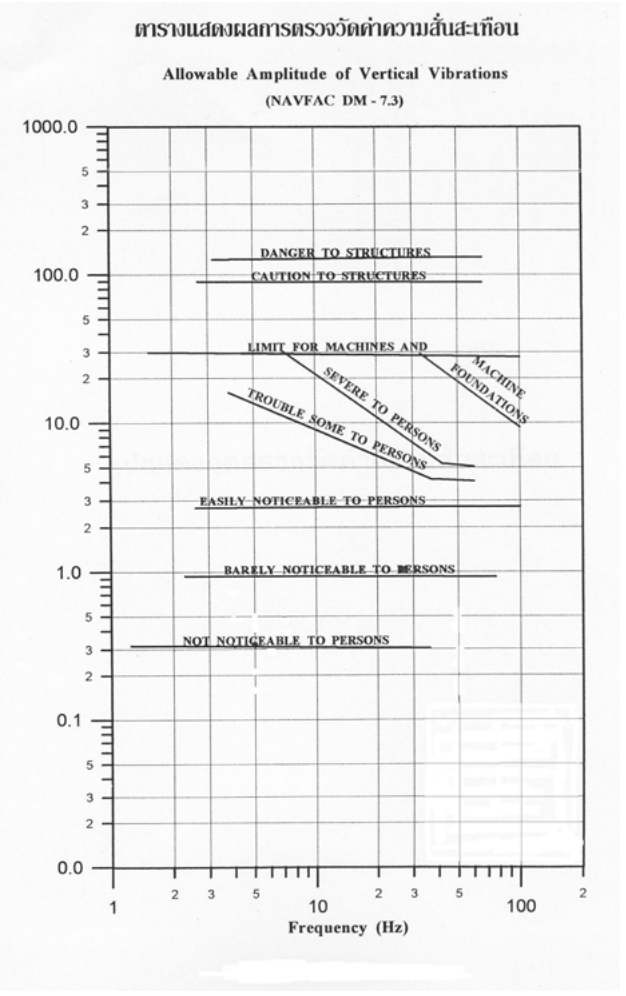
3.3.1. การตรวจวัดค่าความสั่นสะเทือน (Vibration Test)

การตรวจวัดค่าความสั่นสะเทือนเป็นการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดค่าความสั่นสะเทือน (Vibration Monitor) ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยติดตั้งหัวสัญญาณแบบ 3 ทิศทาง ค่าความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ จะถูกบันทึกและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือน มาตรฐานผลการตรวจวัดสากลของสถาบัน NAVFAC ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดช่วงความสั่นสะเทือนแสดงในกราฟ รูปที่ 10 นอกจากนี้มาตรฐานของประเทศเยอรมัน DIN 4150 กำหนดไว้ว่าสำหรับโครงสร้างประวัติศาสตร์ (Historical Structure) ยอมให้ค่าความเร็วคลื่นอนุภาคสูงสุด (PPV) เกิดขึ้นได้ไม่เกิน 5 มม. / วินาที





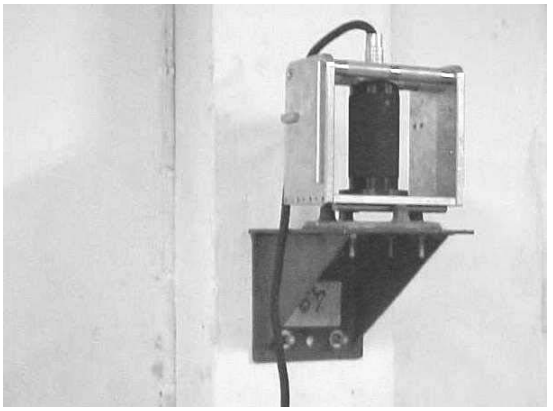
รูปที่ 9 การทดสอบวัดค่าความสั่นสะเทือนของอาคารประวัติศาสตร์ในขณะทำการลงปลอกเหล็กชั่วคราว



รูปที่ 10 กราฟช่วงความสั่นสะเทือนตามมาตรฐานผลการตรวจวัดสากลของสถาบัน NAVFAC ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.2. การตรวจวัดการเอียงตัวของอาคาร

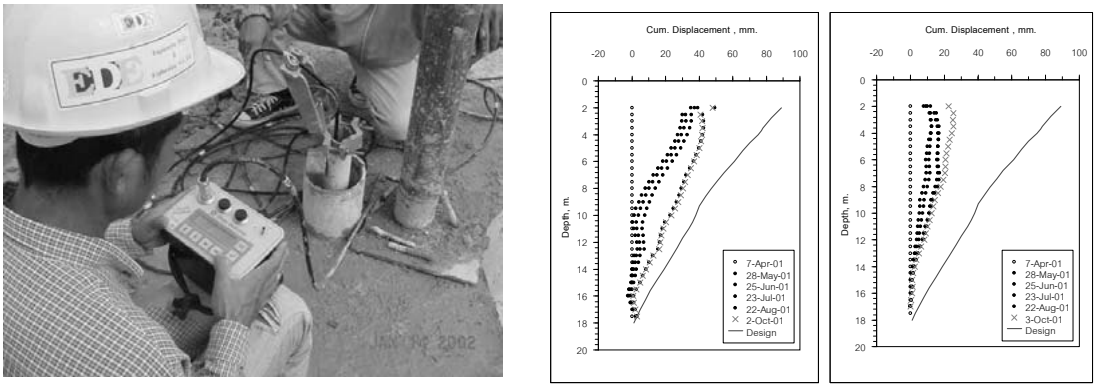
การตรวจวัดการเอียงตัวของอาคารโดยใช้เครื่อง Tilt Meter ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงแนวระนาบ โดยติดตั้ง Tilt Sensor ลงบน Tilt Plate ที่ติดตั้งบนตัวโครงสร้างดังตัวอย่างรูปที่ 11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระนาบจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปเป็นสัดส่วนกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ การติดตั้ง Tilt meter ควรเลือกติดตั้งที่โครงสร้างหลัก เช่น เสา คาน โดยการติดตั้งในอาคารควรเลือกติดตั้งตามตำแหน่งที่สามารถ สร้างระนาบการเอียงของโครงสร้างได้ ผลที่ได้จากการวัดจะเป็นค่าความเอียง (องศา หรือ เรเดียน) เปรียบเทียบกับระยะเวลาการก่อสร้างตามตัวอย่างการวัดค่ารูปที่ 19



รูปที่ 11 เครื่องตรวจวัดการเอียงตัวของอาคารโดยใช้เครื่อง Tilt meter

3.2.3. การวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินไม่ว่าจะเป็นกำแพง Sheet Pile กำแพง Diaphragm Wall หรือกำแพงแบบ Secant Pile จะใช้เครื่องมือตรวจวัดที่เรียกว่า Inclinometer ดังตัวอย่างรูปที่ 12 ค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้ใช้สอบทานความถูกต้องในการออกแบบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ นอกจากนั้นผลที่ได้จากการวัดยังสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มการทรุดตัวของผิวดินบริเวณโดยรอบบ่อขุดได้



รูปที่ 12 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินโดยใช้เครื่อง Inclinometer

3.2.4. การตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน

การตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินด้วย Settlement Plate ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์วัดการทรุดตัวในแนวดิ่ง การติดตั้งควรจะเลือกติดตั้ง Plate ตามระยะห่างจากพื้นที่ก่อสร้าง ที่ได้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวทางทฤษฎีสูง การติดตั้ง Settlement plate ที่เหมาะสมควรจะติดตั้งตามตำแหน่งที่สามารถสร้างรูปตัดการทรุดตัวเทียบกับระยะห่างของพื้นที่ก่อสร้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การติดตั้ง Settlement plate เพื่อวัดค่าการทรุดที่ผิวดิน

3.4. การกำหนดระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level)

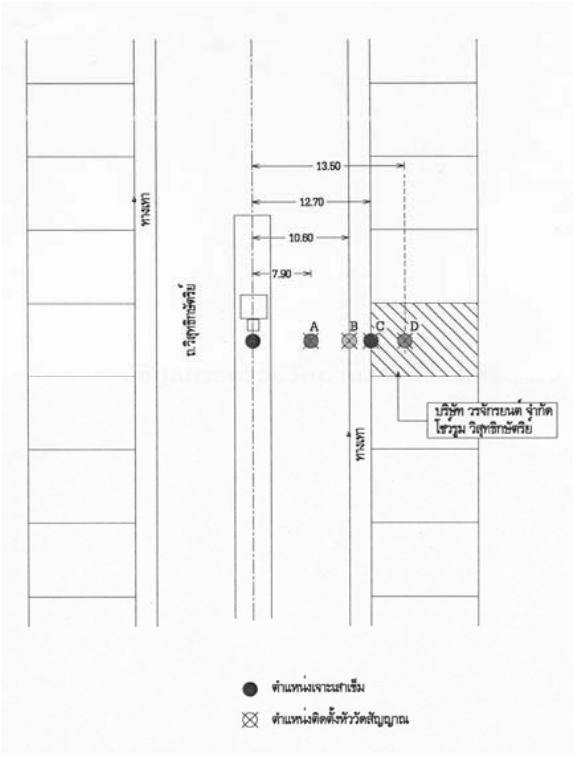
ในการขุดดินซึ่งมีการติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ เช่นติดตั้ง Inclinometer วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงหรือติดตั้ง Settlement Plate เป็นวัดค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง เพื่อสอบทานค่าการออกแบบกับค่าที่วัดได้จริงในสนาม ต้องกำหนดระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level) เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการควบคุมงาน โดยกำหนดเป็น 3 ระดับ (วันชัย, 2545) คือ

- Alert Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 70 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายต้องทำการตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้าง
- Alarm Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 80 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องต้องปรึกษากับผู้ออกแบบเพื่อความมั่นใจว่าระบบการก่อสร้างมีความปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างข้างเคียง
- Action Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 90 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ต้องหยุดการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยและผลกระทบต่อพื้นที่ประวัติศาสตร์และพื้นที่ข้างเคียงอย่างละเอียด

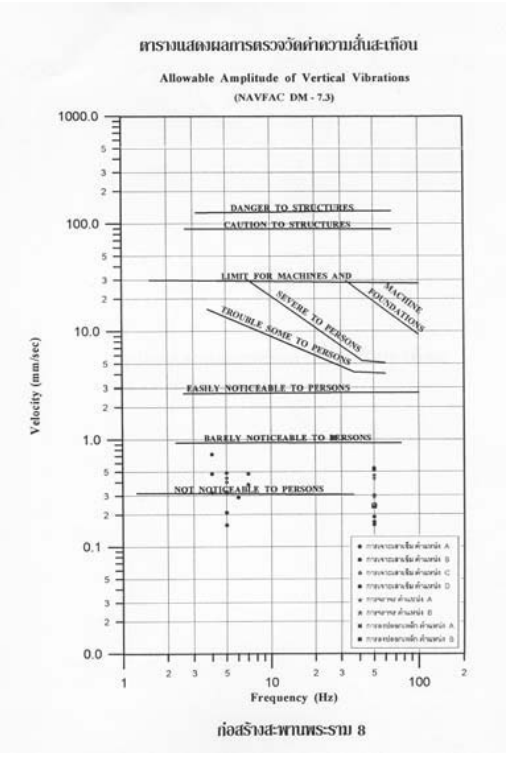
4. กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างฐานรากใกล้พื้นที่ประวัติศาสตร์ในอดีตที่ผ่านมา

4.1. กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างเสาเข็มเจาะฐานรากสะพานพระราม 8

โครงการก่อสร้างสะพานพระราม 8 บนถนนวิสุทธิกษัตริย์ ได้กำหนดออกแบบฐานรากเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 800 มม. แต่เนื่องจากการก่อสร้างตั้งอยู่ใกล้ชุมชน และอาคารเก่า ซึ่งห่างจากตัวตึกอาคาร 12.7 ม. ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจาะเสาเข็มอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารได้ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยต่ออาคารและทรัพย์สิน ผู้รับเหมาจึงได้กำหนดให้ทำการวัดค่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเจาะเสาเข็ม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมมิให้เกิดการกระทบกระเทือนต่ออาคาร



ก. ตำแหน่งทดสอบ



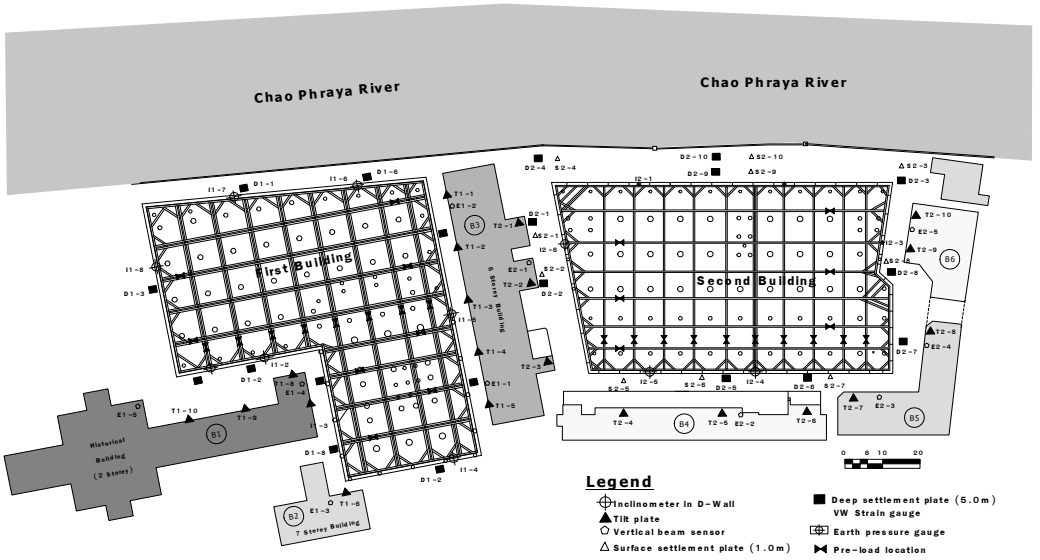
ข. ผลการทดสอบ

รูปที่ 14 การทดสอบวัดค่าความสั่นสะเทือนในโครงการก่อสร้างสะพานพระราม 8 บนถนนวิสุทธิกษัตริย์ ขณะก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

ผลการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่าค่าความเร็วคลื่นอนุภาคสูงสุด (PPV) ที่วัดได้ระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในขั้นตอนการลงปลอกเหล็กชั่วคราวและการขุดเจาะดินมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-1.0 มม./วินาที เมื่อพล๊อตลงในกราฟมาตรฐานผลการตรวจวัดสากลของสถาบัน NAVFAC ประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าค่าความสั่นสะเทือนที่วัดได้จัดอยู่ในระดับที่ไม่รุนแรงพอที่จะมีผลกระทบทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหลักของอาคารข้างเคียง แต่บางขั้นตอนการก่อสร้างค่าความสั่นสะเทือนมีมากพอที่จะทำให้บุคคลภายในและภายนอกอาคารรู้สึกได้ถึงความสั่นสะเทือน

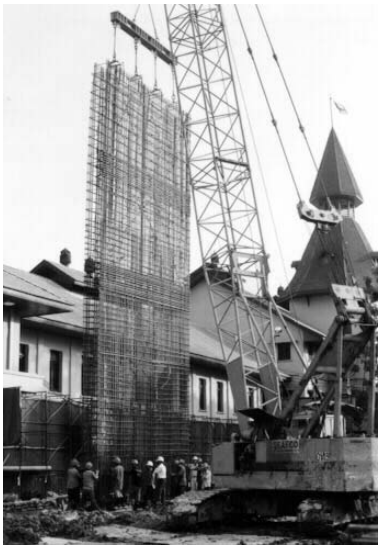
4.2. กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างฐานรากห้องสมุดและอาคารจอดรถใต้ดินมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

โครงการนี้อยู่ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ท่าพระจันทร์ติดกับอาคารตึกโดมและอาคารเรียนคณะเศรษฐศาสตร์ ซึ่งอาคารตึกโดมเป็นประวัติศาสตร์และเป็นสัญลักษณ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พื้นที่ก่อสร้างมีข้อจำกัดในการทำงานทั้งทางด้านกฎหมายสิ่งแวดล้อม กฎหมายโบราณวัตถุ พรบ.ควบคุมอาคาร ฯลฯ อาคารประกอบด้วยห้องใต้ดิน 3 ชั้น โครงสร้างระดับเหนือดิน 4 ชั้น (เนื่องจากอาคารอยู่ในเขตเกาะรัตนโกสินทร์ที่ถูกควบคุมความสูงของอาคารไว้) ผังบริเวณการก่อสร้างดังแสดงไว้ในรูปที่ 15



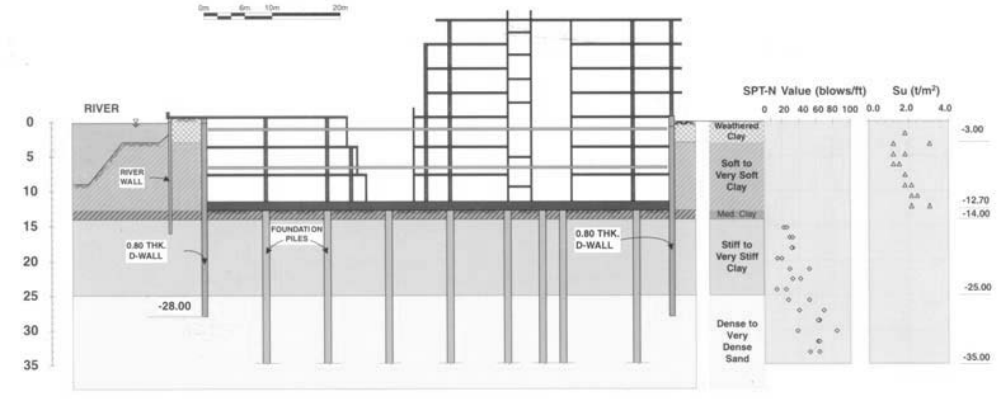
รูปที่ 15 ผังบริเวณการก่อสร้างโครงการก่อสร้างฐานรากห้องสมุดมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ในการก่อสร้างทำงานได้เฉพาะเวลากลางคืนเท่านั้น เวลากลางวันไม่สามารถลำเลียงวัสดุเข้าไปทำงานได้ รูปที่ 16 เป็นการก่อสร้างกำแพง Diaphragm wall และงานขุดดินใกล้ชิดกับอาคารตึกโดม โครงการนี้ได้มีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงโดยติดอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัว (Inclinometers) ไว้ในกำแพง Diaphragm Wall และติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัว (Settlement points) และเอียงตัว (Tilt Meters) ไว้ที่อาคารข้างเคียงโดยรอบกำแพง Diaphragm Wall ที่ออกแบบมีความหนาหนา 80 ซม. ปลายกำแพงลึก 28 เมตร เสาเข็มรับโครงสร้างทั้งหมดใช้เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 80 ซม. จนถึง 150 ซม. ความลึกปลายเสาเข็มออกแบบไว้ที่ 48 เมตร ตามรูปที่ 17 เป็นรูปตัดโดยสังเขปของอาคารห้องสมุด

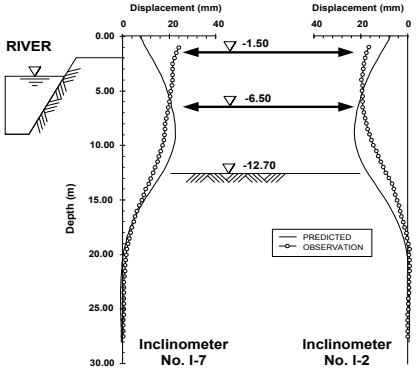




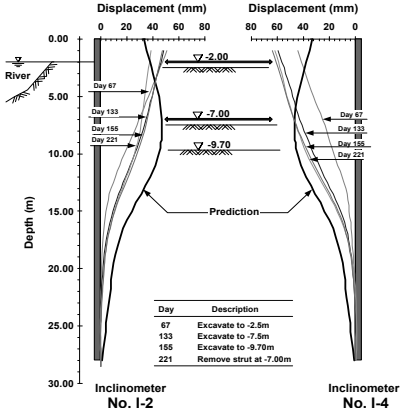
รูปที่ 16 การก่อสร้างกำแพง Diaphragm wall และงานขุดดินใกล้ชิดกับอาคารตึกโดม



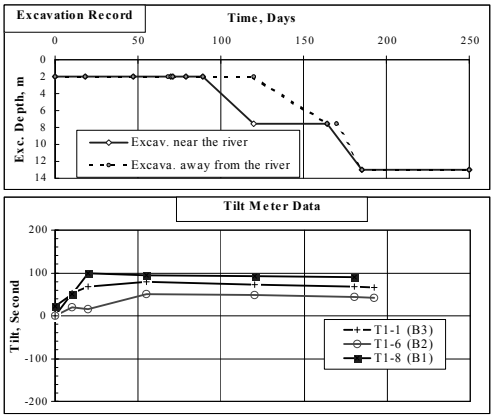
รูปที่ 17 รูปตัดขวางของห้องสมุด



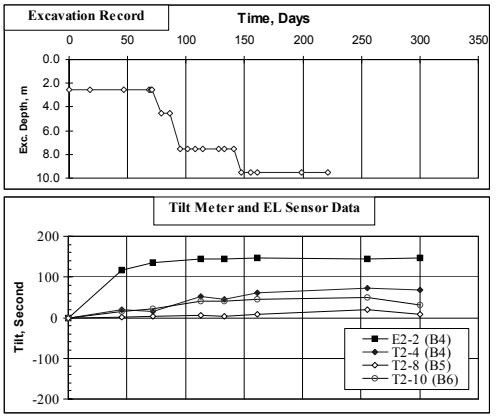
รูปที่ 18 ก. การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินของตึกที่ 1



รูปที่ 18 ข. การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินของตึกที่ 2



รูปที่ 19 ก. ผลจาก Tilt meter เทียบกับเวลาในตึกที่ 1 (Pornpot et al, 2001)



รูปที่ 19 ข. ผลจาก Tilt meter เทียบกับเวลาในตึกที่ 2 (Pornpot et al, 2001)

การก่อสร้างใช้ระบบก่อสร้างจากล่างขึ้นบน โดยใช้คานค้ำยันเหล็กชั่วคราวค้ำยันกำแพงไว้และป้องกันการเคลื่อนตัวของดินโดยการอัดน้ำหนักล่วงหน้า (Pre- Load) ไว้ในค้ำยันในขั้นตอนการขุดดินตามรูปที่ 16 ในตั้งแต่เริ่มการก่อสร้างจนก่อสร้างแล้วเสร็จได้ทำการวัดการเคลื่อนตัวของกำแพง การทรุดตัวและเอียงตัวของอาคารข้างเคียงเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่ประเมินได้จากการประเมินโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ปรากฏว่าอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแต่ประการใด

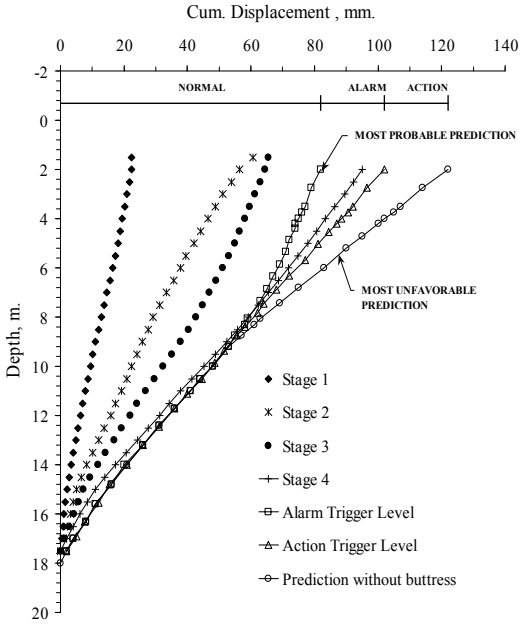
4.3. กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างฐานรากอาคารจอดรถใต้ดินลานคนเมือง

โครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินลานคนเมือง เจ้าของโครงการคือกรุงเทพมหานคร โครงการตั้งอยู่ที่ถนนดินสอในพื้นที่ประมาณ 9 ไร่เศษ สภาพที่ก่อสร้างเดิมเป็นลานเอนกประสงค์เดิม ด้านทิศเหนือเป็นศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร ด้านทิศใต้เป็นที่ตั้งของเสาชิงช้าและวัดสุทัศน์วนาราม ด้านทิศตะวันตก เป็นเทวสถาน (โบสถ์พราหมณ์) ทิศตะวันออกเป็นอาคารพานิชย์พักอาศัย โครงการเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วมีชั้นใต้ดินสองชั้นจอดรถได้รวม 704 คัน ระดับพื้นดินเป็นสถานที่สำหรับประกอบกิจกรรมต่างๆของประชาชน ตามรูปที่ 20



รูปที่ 20 อาคารจอดรถใต้ดินลานคนเมือง

เนื่องจากสถานที่ก่อสร้างอยู่ในเขตพื้นที่เกาะรัตนโกสินทร์ ที่รายรอบไปด้วยสถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์ และโบราณสถานที่ได้รับการขึ้นทะเบียนไว้กับกรมศิลปากร การออกแบบก่อสร้างจึงได้รับการพิจารณาล่วงหน้า เรื่องการป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง ในกรณีนี้จึงออกแบบระบบกำแพงกันดินเป็นชนิดกำแพง Diaphragm Wall หนา 60 ซม. ลึก ตั้งแต่ 16-25 เมตร ค้ำยันชั่วคราวระหว่างการขุดดินด้วยคานเหล็กและอัดน้ำหนัก (Pre - Load) เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินไว้ล่วงหน้า ระบบเสาเข็มรับน้ำหนักโครงสร้างออกแบบเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 ซม. จำนวนประมาณ 700 ต้น และก่อนทำการก่อสร้างได้มีการสำรวจจากกรมศิลปากรเพื่อทำบันทึกหลักฐาน ทางประวัติศาสตร์ ผลการก่อสร้างสำเร็จลุล่วงด้วยดี มลภาวะทั้งทางฝุ่น ทางเสียง และทางความสั่นสะเทือนอยู่ในระดับที่ไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมแต่อย่างใด และจากผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพง Diaphragm Wall ในระหว่างการก่อสร้างโดยกำหนดค่าความระมัดระวังไว้ 3 ระดับคือ ระดับ Normal ระดับ Alarm และระดับ Action ดังแสดงในรูปที่ 21 ผลการเคลื่อนตัวพบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและประเมินไว้ล่วงหน้าในขั้นตอนการออกแบบ



รูปที่ 21 ค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงที่วัดได้

5. บทสรุป

การก่อสร้างฐานรากใกล้เคียงกับพื้นที่ประวัติศาสตร์จะต้องมีการเตรียมงานที่ดี ผู้รับเหมาจะต้องเข้าใจขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างเป็นอย่างดีในขณะทำการก่อสร้างจะต้องทำการตรวจวัดผลกระทบต่อโครงสร้างประวัติศาสตร์ ในส่วนของการควบคุมงานจะต้องมีระดับเฝ้าระวังในการทำงาน เมื่อผลกระทบจากการทำงานนั้นเข้าใกล้ระดับเฝ้าระวังในแต่ละระดับวิศวกรจะต้องเตรียมหาทางแก้ไข เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่ประวัติศาสตร์น้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และ พรพจน์ ตันเส็ง (2543). การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, ชะอำ เพชรบุรี , หน้า GTE-115 - GTE-120
2. วันชัย เทพรักษ์ (2545). การประเมินความเสียหายจากการขุดดินลึกด้วยระบบค้ำยันเข็มพืดใกล้โครงสร้างเดิมในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น, หน้า GTE-70-GTE-79
3. DIN 4150 Part 3. (1986). Vibrations in buildings; influence on structures. Deutches Institut fur Normung.
4. O' Neill, D.B. (1971). Vibration and dynamic settlement from pile driving. Proceedings of the Conference on Behaviour of Piles, London, pp 135-140.
5. Premchitt, J., Gray, I. & Massey, J.B. (1988). Initial measurements of skin friction on some driven piles in reclamation. Hong Kong Engineer, vol. 16 no. 5 pp 25-38.
6. Pornpot, T., Z Z Aye, Chanchai, S. (2001). Monitoring of diaphragm wall displacement and associated ground movement, braced excavation adjacent to historical building at the bank of Chao Phraya river. NCCE 7. Chulalongkorn University, Bangkok, GTE 53-60
7. Williams, B.P and Waite, D. (1993).The design and construction of sheet - piled cofferdams. Construction Industry Research and Information Association (Special Publication 95), Thomas Telford Publication.

ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียก จากอดีตถึงปัจจุบัน

Design Capacity of Wet Process Bored Piles from the Past to the Present

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1]

[1] กรรมการผู้จัดการ

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ: มีการนำเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบเปียก (Wet Process Large Diameter Bored Piles) มาใช้รับน้ำหนักฐานรากในชั้นดินกรุงเทพมหานครมาเป็นเวลาประมาน 30 ปี แล้ว ในระยะแรกๆ ที่เริ่มใช้เสาเข็มระบบนี้ทั้งวิศวกรผู้ออกแบบและผู้ประกอบการต่างก็ยังใหม่กับเสาเข็มเจาะระบบนี้ วิศวกรผู้ออกแบบจึงกำหนดค่าการรับน้ำหนักออกแบบไม่สูงนัก และผู้ก่อสร้างเสาเข็มก็ยังไม่ทราบเทคนิคการก่อสร้างก่อสร้างเพื่อให้เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้น แต่ในปัจจุบันทั้งวิศวกรผู้ออกแบบและผู้ประกอบการต่างก็มีประสบการณ์ในการออกแบบและเทคนิคการก่อสร้างที่ดีกว่าในอดีตมาก จึงออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกที่มีค่าความสามารถในการรับน้ำหนักออกแบบสูงขึ้นมากกว่าในอดีตมาก

ABTRACT: Wet process large diameter bored piles have been introduced to use as the foundation piles in Bangkok subsoil for approximately 30 years ago. At the early stage of using this pile type, the design engineers and the piling contractors were new to this piling system. So the design engineers have designed the safe working load based on the conservative limit and the contractors also had no experience to install the high load capacity piles. But at present the design engineers and the piling contractors all have better experience in the design and installation technology of bored piles than the past. As a result the wet process bored piles are nowadays designed and installed with the capacity far higher than those of the past.

KEYWORD: Wet process bored pile, Load bearing capacity

For further details, contact *Mr. Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd., 26/10 Ram Intra 109 Road, Bangchan, Klong sam wah, Bangkok 10510, Tel. 0-2919-0090 Fax 0-2919-0098. e-mail: narong@seafco.co.th*

1. บทนำ

มีการนำเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบเปียก (Wet Process Large Diameter Bored Piles) มาใช้รับน้ำหนักฐานรากในชั้นดินกรุงเทพมหานครมาเป็นเวลาประมาน 30 ปี แล้ว ในระยะแรกๆ ที่เริ่มใช้เสาเข็มระบบนี้วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ประกอบการต่างก็ใหม่กับเสาเข็มเจาะระบบนี้ เนื่องจากเสาเข็มเจาะระบบเปียกเป็นผลิตภัณฑ์เสาเข็มที่ถูกก่อสร้างขึ้นภายใต้ของเหลวพยุงเสถียรภาพของหลุมเจาะ (Support fluid) ที่ไม่สามารถตรวจสอบสภาพหลุมเจาะได้ด้วยสายตา แต่ต้องอาศัยประสบการณ์และความรู้สึก (Feeling) เป็นส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ก่อสร้างเสร็จ นอกจากนั้นแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะรวมอยู่ด้วย ซึ่งผู้ก่อสร้างจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่อาจมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะในขั้นตอนขณะก่อสร้างด้วย ซึ่งปัจจัยอื่นๆที่จะมีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะระบบเปียกก่อสร้างแบบปกติ (ที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลาย) มีดังนี้ คือ

- สภาวะของชั้นดินและน้ำใต้ดินและความลึกปลายเสาเข็ม
- ประเภทของเครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม
- ชนิดของของเหลวที่ใช้ในการพยุงเสถียรภาพของหลุมเจาะ (Support fluids)
- ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม (Construction time)
- ความหนาของ Filter cake จากสารละลายเบ็นโทไนท์ที่เกิดที่ผนังหลุมเจาะในชั้นทราย

ในระยะแรกๆ วิศวกรผู้ออกแบบจึงออกแบบค่าการรับน้ำหนักออกแบบไม่สูงนัก และผู้ประกอบการเสาเข็มเจาะระบบเปียกก็ยังไม่มีเทคนิคสมัยใหม่ที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าเสาเข็มก่อสร้างแล้วจะมีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง

2. ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของ เสาเข็มเจาะระบบเปียกยุคแรกๆ ในชั้นดินกรุงเทพฯ

เสาเข็มเจาะระบบเปียกก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ในยุคแรกๆ ใช้วิธีการเจาะแบบก้านหมุนภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ (Rotary drilling under bentonite slurry displacement technique) ซึ่งมีทั้งระบบระบายน้ำกลับทาง (Reverse circulation method: RC) และระบบสว่าน (Auger and Bucket method: A&B) เริ่มมีการนำระบบ Reversed circulation เจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ ถูกนำเข้ามาใช้ในเมืองไทยครั้งแรกเมื่อประมาณ พ.ศ. 2514 ที่โครงการก่อสร้างสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้าเจาะลึก 45 เมตร และที่สะพานสาทร (สะพานสมเด็จพระเจ้าตากสิน) เจาะลึก 45 เมตร สะพานพุทธยอดฟ้าแห่งใหม่เจาะลึก 49 เมตร เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2520 และ 2525 ตามลำดับ ส่วนเครื่องมือระบบเสาเข็มเจาะระบบเปียกเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ Auger and bucket ได้มีการนำเข้ามาใช้เครื่องมือที่ใช้เป็นครั้งแรกที่โครงการก่อสร้างโรงแรมโรแยลออร์คิด ที่ถนนสี่พระยา (ปัจจุบันคือโรงแรม โรแยลออร์คิดตะวันนา) เจาะได้ลึกเพียงประมาณ 33เมตร และต่อมาที่อาคารไทปิงคอนโดมิเนี่ยม ถนนเอกมัยเจาะลึก 32 เมตร เมื่อปี 2522 และ 2523 ตามลำดับ การควบคุมคุณภาพสารละลายเบ็นโทไนท์ในขณะนั้นก็ยังไม่รัดกุม สมรรถนะการรับน้ำหนักของเสาเข็มในขณะนั้นจึงไม่สูงเช่นในปัจจุบัน เนื่องจากวิศวกรไทยในขณะนั้นยังรู้เรื่องเสาเข็มเจาะระบบเปียกและสารละลายเบ็นโทไนท์น้อย ผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศที่นำเข้ามาจึงเป็นผู้สั่งการเอง เมื่อผู้เชี่ยวชาญบอกอย่างไรวิศวกรไทยก็ทำไปตามนั้น เสาเข็มเจาะเปียกในขณะนั้นบางงานก็ออกแบบให้รับน้ำหนักออกแบบต่ำมาก บางงานก็ออกแบบไว้สูงมาก ตารางที่ 1 เป็นค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบที่ใช้กันในขณะนั้น

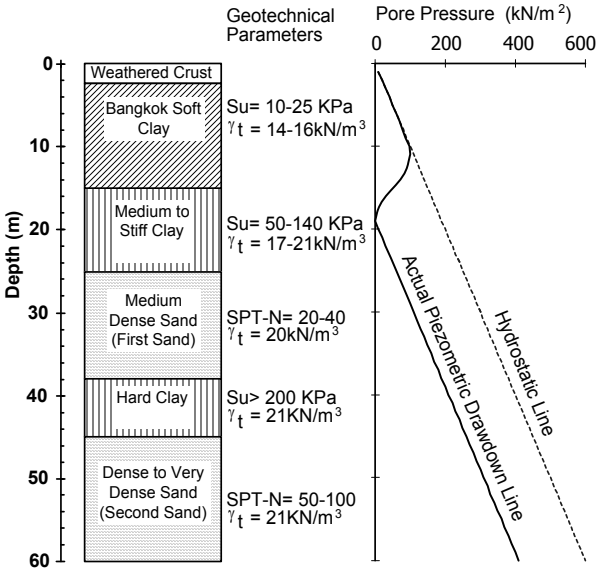
ตารางที่ 1 ค่าน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียกยุคแรกๆ ในชั้นดินกรุงเทพฯ (Ng, 1983)

โครงการ	ระบบ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึก	น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (ตัน)	ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (มม.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทดสอบ (ตัน)	ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักทดสอบ (มม.)	ค่าการทรุดตัวถาวร (มม.)
สะพานปิ่นเกล้า (2514)	RC	BP 2 Ø 1.50 เมตร ลึก 45 เมตร	410	2.20	820	5.00	0.90
สะพานสาทร (2522)	RC	BP 7 Ø 1.50 เมตร ลึก 45 เมตร	500	3.14	1200	7.76	2.50
สะพานพุทธ (2525)	RC	BP 10 Ø 1.50 เมตร ลึก 49 เมตร	550	3.14	1100	8.15	1.62
โรงแรมโรแยลฯ (2522)	A&B	Ø 1.00 เมตร ลึก 33 เมตร	320	2.30	750*	24.6	16.8
ไทปิงทาวเวอร์ (2523)	A&B	Ø 1.50 เมตร ลึก 32 เมตร และ Ø 1.00 เมตร ลึก 32 เมตร	800 300	5.18 2.64	1600 1125*	100.8 118.3	94.0 108.3

* Ultimate load of the pile

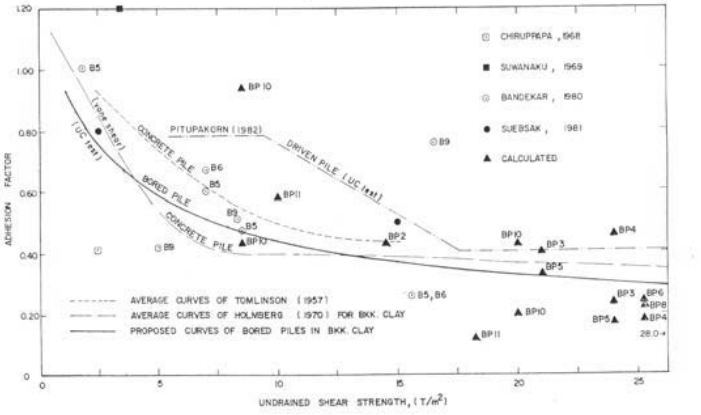
ตามตารางที่ 1 ช่วงปี พ.ศ. 2514 - 2525 เสาเข็มเจาะสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 เมตร ระบบ Reverse circulation ถูกออกแบบให้รับน้ำหนักต่ำมาก คือ 410 ตัน และเพิ่มเป็น 500 และ 550 ตัน ตามลำดับ ส่วนเสาเข็มระบบ Auger and bucket ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.50 เมตร ที่ไทปิง ทาวเวอร์ น้ำหนักบรรทุกออกแบบไว้สูง แต่มีค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดสูงเช่นกัน สาเหตุที่เสาเข็มเจาะระบบเปียกยุคแรกๆ ถูกกำหนดน้ำหนักบรรทุกออกแบบไว้ต่ำ เข้าใจว่าเมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้วการสำรวจชั้นดินกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่สำรวจกันลึกไม่เกิน 50 เมตร วิศวกรผู้ออกแบบจึงออกแบบให้ปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับไม่เกิน 50 เมตร เนื่องจากผู้เจาะสำรวจชั้นดินในขณะนั้นยังมีเครื่องมือไม่ทันสมัยและใหญ่พอต่อการเจาะสำรวจดินระดับลึกๆมาก และยังมีความรู้

เรื่องระดับน้ำใต้ดินที่ลดต่ำลงเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลไม่กว้างขวางเท่าในปัจจุบัน จึงมักจะคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากค่า Effective overburden pressure ที่ใช้ทฤษฎีระดับน้ำใต้ดินแบบ Hydrostatic line ไม่ได้ใช้ระดับน้ำใต้ดินแบบ Piezometric drawdown line (ตามรูปที่ 1) เช่นในปัจจุบันที่ให้ค่าการคำนวณการรับน้ำหนักที่สูงกว่า ต่อมาเมื่อมีผลการทดสอบมารองรับมากขึ้น วิศวกรผู้ออกแบบจึงเริ่มมั่นใจในการปรับแก้พารามิเตอร์ที่ใช้ให้รับน้ำหนักได้มากขึ้นจาก 410 ตันเป็น 550 ตัน

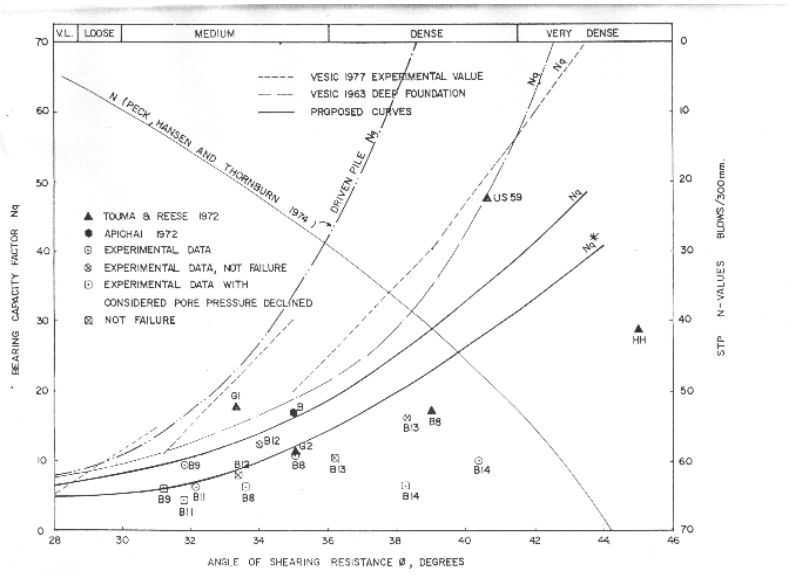


รูปที่ 1 สภาพชั้นดินโดยทั่วไปในกรุงเทพฯ ที่ระดับน้ำใต้ดินลดลงจากการสูบน้ำบาดาล

ในปี 2526 Ng, Kim Cheng (1983) ได้เสนองานวิจัย เรื่องปัญหาในการก่อสร้างและสมรรถนะของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในชั้นทรายชั้นที่สอง โดยใช้ข้อมูลส่วนใหญ่จากโครงการทดสอบเสาเข็มในโครงการตาม ตารางที่ 1 และงานวิจัย Ng (1983) ได้เสนอแนะค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (Adhesion factors for clay) ตามรูปที่ 2 และ สัมประประสิทธิ์ค่าการรับแรงแบบทานในชั้นทราย Nq* ตามรูปที่ 3



รูปที่ 2 Adhesion for clays (Ng, 1983)



รูปที่ 3 Relation between Resistance Ø, Nq and N – Value for Bored Piles (Ng, 1983)

Ng (1983) ได้สรุปเรื่องสมรรถนะของเสาเข็มเจาะเปียกปลายฝังในชั้นทรายชั้นแรกและชั้นที่สองก่อสร้างภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ จากผลการศึกษาผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มให้ทราบว่า

- แนะนำให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แนะนำไว้ในรูปที่ 2 ในการประเมินหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินเหนียว
- สำหรับการประเมินหาค่าแรงเสียดทานในชั้นทรายให้ใช้ค่า Earth pressure coefficient at rest Ko (assuming the sand is practically normally consolidated) และแนะนำให้คำนวณหาค่า effective overburden pressure: O_V โดยใช้ค่าจากค่า Pore pressure decline
- สำหรับการประเมินค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มในชั้นทรายชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง แนะนำให้ใช้ค่า Nq* ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 แต่หากว่าผลการเจาะสำรวจดินแสดงผลว่าคุณสมบัติของชั้นทรายชั้นที่สองมีดินเจือปนมาก (more clayey) ค่าที่ใช้ในการออกแบบไม่ควรเกิน 1,000 ตันต่อตารางเมตร
- ในการออกแบบให้ใช้ Overall factor of safety ขั้นต่ำเท่ากับ 2.5
- เสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ปลายเสาเข็มฝังในชั้นทรายชั้นแรก มีสมรรถนะที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นทรายที่ระดับใต้ปลายเสาเข็ม และวิธีการก่อสร้างเป็นสำคัญ
- โดยทั่วไปแล้วเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ที่ปลายเสาเข็มฝังในชั้นทรายแน่นที่มีการก่อสร้างมาดี จะมีสมรรถนะที่ดี

3. ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของ เสาเข็มเจาะระบบเปียกยุคที่สอง ในชั้นดินกรุงเทพฯ

เมื่อมีผลงานการวิจัยของ Ng, Kim Cheng (1983) มาใช้อ้างอิงได้ วิศวกรผู้ออกแบบในขณะนั้นจึงเริ่มปรับค่าการรับน้ำหนักออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียกขนาดใหญ่ให้สูงมากขึ้นกว่าเดิมโดยพิจารณาใช้ค่าพารามิเตอร์

ตามผลการวิจัยข้างต้นเป็นบรรทัดฐาน อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ผู้วิจัยท่านดังกล่าวนำมาทำวิจัยในขณะนั้นเป็นการผลการทดสอบเสาเข็มที่การก่อสร้างในช่วงเวลาที่เสาเข็มเจาะเพิ่งจะพัฒนาขึ้นในประเทศไทย และเทคนิคการก่อสร้างของผู้ประกอบการเสาเข็มเจาะในขณะนั้น ยังไม่ได้พัฒนาให้ก้าวหน้าเท่ากับปัจจุบันนี้ ดังนั้นพารามิเตอร์บางค่าที่ดูเหมาะสมในขณะนั้นอาจต้องถูกนำมาพิจารณาใช้อย่างระมัดระวังในสภาวะปัจจุบัน

ในระยะต่อมาการพัฒนาการยุคที่สองของเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯเริ่มขึ้นตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2526 ถึงประมาณปี พ.ศ. 2540 วิศวกรผู้ออกแบบอาวุโสหลายท่านได้ออกแบบให้ปลายเสาเข็มเจาะระบบเปียกรับอาคารสูงให้เจาะปลายเสาเข็มลึกหยั่งถึงชั้นทรายชั้นที่สองที่ระดับความลึกลึกประมาณ 50 เมตร จุดประสงค์เพื่อลดการทรุดตัวในระยะยาวของอาคาร

โครงการแรกของอาคารที่ใช้เสาเข็มเจาะลึกถึงชั้นทรายชั้นที่สองคือ โครงการอโศก ทาวเวอร์ ก่อสร้างที่ซอยอโศกเมื่อปี พ.ศ. 2526 พร้อมกับอาคารที่สองคืออาคารตึกทอง (ปัจจุบันคือตึก Time Square) ถนนสุขุมวิทที่ก่อสร้างในเวลาไล่เลี่ยกับโครงการอโศก ทาวเวอร์ และในปีต่อๆ มา อาคารส่วนใหญ่ก็เริ่มออกแบบให้เสาเข็มให้ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นทรายชั้นที่สองและชั้นที่สามที่ระดับความลึกต่างๆ กันตั้งแต่ 45 ถึง 75 เมตร จนดูเป็นเรื่องปกติไป และค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบได้เพิ่มสูงขึ้นกว่ายุคแรก ตามตารางที่ 2 และระบบเสาเข็มเจาะเปียกในงานอาคารล้วนแต่ใช้เป็นระบบ Auger and Bucket โดยไม่มีการนำระบบ Reverse circulation มาใช้อีก

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียกยุคที่สอง ในชั้นดินกรุงเทพฯ

ขนาดเสาเข็ม	น้ำหนักบรรทุกออกแบบโดยเฉลี่ย	ค่าการทรุดตัวโดยเฉลี่ยที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (มม.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทดสอบโดยเฉลี่ย (ตัน)	ค่าการทรุดตัวโดยเฉลี่ยที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด (มม.)	ค่าทรุดตัวถาวรโดยเฉลี่ยภายหลังปลดน้ำหนักทดสอบสูงสุด (มม.)
800 มม.	300 ตัน	3 -4	750	10 - 12	2 - 3
1000 มม.	450 ตัน	3-4	11250	12 - 18	2 – 4
1200 มม.	600 ตัน	3-5	1500	16 - 20	3 – 5
1500 มม.	950 ตัน	3-6	2250	18 - 25	3 – 6

จากข้อมูลในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกออกแบบที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นกว่าเสาเข็มในยุคแรกโดยเฉลี่ยมากกว่า 50% และจะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นจาก ตารางที่ 3 ที่มีการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักออกแบบและค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มขณะรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุดของเสาเข็มยุคแรก กับเสาเข็มยุคที่สองที่ก่อสร้างโดยมีการควบคุมที่ดี ในพื้นที่ก่อสร้างเสาเข็มที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกและผลจากการทดสอบเสาเข็มที่ก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2514 ถึง 2523 และ 2533 ถึง 2538

ปีที่ก่อสร้าง	โครงการก่อสร้าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึก (เมตร)	น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (ตัน)	น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (ตัน)	ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด (มม.)
2514	สะพานพระปิ่นเกล้า	1.5x45	410	820	5.00
2538	เซ็นทรัล พลาซ่า ปิ่นเกล้า	1.2x 45	700	1400	27.00
2523	ไทปิง ทาวเวอร์	1.0x32	300	1125	118.00
2533	อาคารสูงในถนนเอกมัย	1.0x32	390	975	23.00

อนึ่งเสาเข็มเจาะเปียกในช่วงระยะเวลายุคแรกและในที่สองนี้ เป็นเสาเข็มที่ขุดเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ หากควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ไม่ดีพอจะเกิดผลทางลบต่อความสามารถในการรับแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มที่อยู่ในชั้นทราย และจะทำให้ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักประลัยต่ำกว่าที่ควรจะเป็นได้มาก

3.1. อิทธิพลของสารละลายเบ็นโทไนท์ต่อค่าการรับน้ำหนักของเสาเข็มระบบเจาะเปียก

3.1.1 คุณลักษณะเฉพาะของสารละลายเบ็นโทไนท์

ผงเบ็นโทไนท์เมื่อถูกนำมาผสมกับน้ำสะอาดและกวนให้แตกตัวแล้วจะกลายเป็นสารละลายที่มีความหนืด (Viscous Slurry) ที่หากปล่อยให้อยู่นิ่งๆ ในระยะเวลาหนึ่ง (ที่เรียกว่า Exposure time หรือ Contact Time) ความเหนียวหนืดจะเพิ่มสูงมากขึ้น (Thick) แต่ความเหนียวหนืดนี้จะลดค่าลง (Thin) เมื่อสารละลายถูกปั่นกวน (Agitation) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าคุณสมบัติการคืนตัว (Thixotropy Characteristic) สาเหตุมาจากเมื่อสารละลายฯ อยู่นิ่งๆนั้น ประจุไฟฟ้าในอนุภาคเล็กๆของผงเบ็นโทไนท์จะดึงดูดกันและกันก่อตัวเป็นโครงสร้าง (Flocculatedก) ของอนุภาคแขวนลอยคล้ายเมือกวุ้น (Gel) เมื่อเมือกวุ้นนี้ถูกปั่นกวนจะทำให้ประจุไฟฟ้าที่ดึงดูดกันอยู่ถูกทำลายลง ทำให้โครงสร้างอนุภาคลอยแขวนที่เป็นเมือกวุ้นเกิดการแยกตัวกระจัดกระจาย (Disperse) ทำให้สารละลายกลับเป็นของเหลวใสไหลได้อีก

3.1.2 การตรวจสอบและควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์

คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์จากข้อกำหนดหลายประเทศได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ ผู้ออกแบบจึงเลือกจากมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งในตารางที่ 4 มาใช้ ซึ่งบางมาตรฐานก็ไม่เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ไม่ว่าจะใช้มาตรฐานใดในตารางที่4 ก็ต้องทำการผสมและควบคุมคุณสมบัติให้ถูกต้องในทุกขั้นตอน

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ ที่รวบรวมมาจากแหล่งต่าง ๆ

Authors	FPS (1975, 1977)	Hutchingson et al. (1975)	FDOT (1987, 1988)	Reese and O' Neil (1988)	ICE (1988)	ACI (1989)	*AASHTO (1992)	*Majano & O' Neil (1993)	*ICE & FPS (1996)
Slurry Type	Bentonite	Calcium Bentonite	Bentonite or Attapulgite	Bentonite or Attapulgite	Bentonite	Bentonite or Polymer	Bentonite or Attapulgite	Bentonite	Bentonite
Density (gm/cc)	<1.10	1.024 to 1.218	1.03 to 1.20	1.03 to 1.20	<1.10	<1.36 (bearing pile) <1.12 (firction pile) <1.02 (Polymer)	1.03 to 1.10 1.03 to 1.20	1.02 to 1.07 1.02 to 1.13	<1.10 <1.15
pH	9.5 to 12	<11.7	8 to 12	8 to 11	9.5 to 12	8 to 12	8 to 11 8 to 11	8 to 10 8 to 10	9.5 to 10.8 9.5 to 11.7
Sand Content	<6% (by weight)	<35% (by weight)	<4% (by volume)	-	-	<4% (bearing pile) <25% (friction pile) <1% (Polymer)	<4% <4% (by volume)	<4 % <10%	<2% <2%
Marsh Funnel Viscosity (sec/Qt)	30 to 90	-	28 to 40	28 to 45	30 to 90	26 to 50	28 to 45 28 to 45	32 to 60 32 to 60	30 to 70 < 90
Plastic Viscosity (cP)	<20	<20	<20	-	<20	-	-	6 to 8.5 6 to 10.0	-
Yield Point (Pa)	-	-	-	-	-	-	-	2 to 6.0 2 to 6.5	-
10 min. Gel Strength (Pa)	4 to 40	3.6 to 20	1.9 to 10	-	4 to 40	-	-	-	4 to 40 4 to 40
Differential Head (m)	>1	-	-	-	-	1.5	-	-	-
Fluid Loss (30 minute test)	-	-	-	-	-	-	-	-	< 40 <60
**Maximum Contact Time (hr.)	-	-	-	-	-	-	-	4	-

Notes : * Upper line for as supplied to pile and lower line for sample from pile prior to placing concrete
** Without agitation and sidewall cleaning

ตารางที่ 5 Test and compliance values for support fluid (ICE, 1996)

Property to be measured	Test Method and apparatus	API RP13 Section	Compliance values measured at 20 °C	
			As Supplied to pile	Sample from pile prior to placing concrete
Density	Mud balance Low temperature	1	Less than 1.10 g/ml	Less than 1.15 g/ml
Fluid loss (30 minute test)	test fluid loss	3	Less than 40 ml	Less than 60 ml
Viscosity	Marsh Cone	2	30 to 70 seconds. (27 - 50)(1)	Less than 90 sec. (Less than 60 sec.)(1)
Shear strength (10 min gel strength)	Fann Viscometer	2	4 to 40 N/m^2	4 to 40 N/m^2
Sand Content	Sand screen set	4	Less than 2%	Less than 2%
PH	(2)		9.5 - 10.8. (8 - 11)(1)	9.5 - 11.7. (<12)(1)

หมายเหตุ 1) ตัวเลขในวงเล็บเป็นความเห็นของผู้เขียน 2) วัดโดย Electrical pH meter แต่ใช้ pH paper แทนได้

รายการตรวจสอบคุณสมบัติประกอบด้วยการตรวจสอบ Density, March Cone Viscosity, pH Value, Sand Content และ Fluid Loss

การผสมสารละลายเบ็นโทไนท์ โดยทั่วไปถ้าใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง 3.5-6.0% จะได้ค่า Density ระหว่าง1.02-1.04 g/cm3 สารละลายฯ ซึ่งผสมขึ้นครั้งแรกนี้ เมื่อนำไปใช้และนำกลับมาทำความสะอาดเพื่อนำไปใช้ใหม่ ค่า Density จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่สูงกว่า 1.20 g/cm^3 จะต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติใหม่ หรือทิ้งสารละลายชุดนี้ไปตารางที่ 5 เป็นคุณสมบัติที่กำหนดโดย ICE (1996) และผู้เขียนได้ปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติบางตัวให้เหมาะสมกับการทำงานในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่มี Silt ผสมอยู่ในชั้นดิน

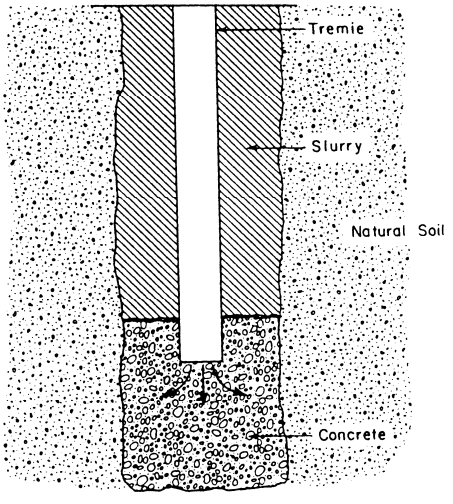
3.2. การจับตัวกันของสารละลายเบนโทไนท์ที่ผนังรูเจาะในชั้นทราย

ขณะที่สารละลายเบนโทไนท์ สร้างแรงดันต้านไม่ให้รูเจาะพังหรือเกิดการบีบตัวอยู่นั้นจะมีสารละลายเบนโทไนท์บางส่วนถูกดันไหลแทรกซึมเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายในชั้นดินทราย และเหลือแต่กากเนื้อเบ็นโทไนท์จากสารละลายฯจับตัวกันเป็นก้อน (Filter Cake) ที่ผนังรูเจาะในชั้นทราย

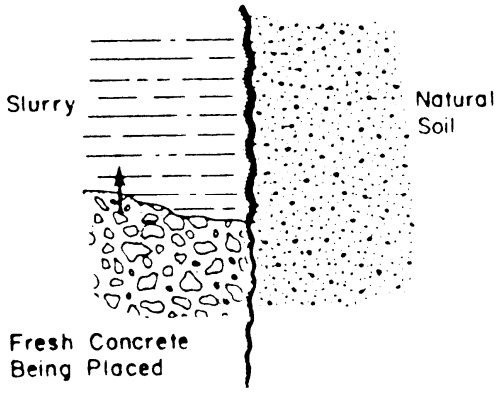
ความหนาของ Filter Cake ที่ก่อตัวขึ้นที่ผิวหลุมเจาะในชั้นทรายนี้จะเกิดต่อเนื่องตลอดเวลาที่ปริมาณสารละลายไหลหายเข้าไปในดิน เวลาผ่านไปนานมากขึ้น Filter Cake ก็จะหนามากขึ้นด้วย หากไม่สามารถขจัด Filter cake นี้ออกไปได้ในขั้นตอนการเทคอนกรีต จะทำให้ค่าแรงฝืดระหว่างผิวเสาเข็มและผนังรูเจาะลดลง

วิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกที่ดีนั้นควรทำการเทคอนกรีตให้เสร็จภายในวันเดียวกับที่เจาะเสร็จ และหลังจากเสร็จสิ้นการเจาะแล้วสารละลายฯในรูเจาะต้องได้รับการทำความสะอาดเพื่อขจัด Filter Cake ที่ผนังรูเจาะและเก็บสารละลายฯ จากก้นหลุมเจาะมาทดสอบคุณสมบัติก่อนเทคอนกรีต เสาเข็มที่มีปัญหามักจะเป็นเสาเข็มที่เก็บตัวอย่างสารละลายจากปากหลุมเจาะมาทดสอบ ซึ่งไม่ว่าจะทดสอบอย่างไรคุณสมบัติก็ผ่านตามข้อกำหนด เพราะคุณสมบัติของสารละลายฯ ที่ปากหลุมเจาะสะอาดกว่าที่ก้นหลุมเจาะหลายเท่าตัว

หากมีการควบคุมคุณสมบัติอย่างถูกต้องใช้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติดีและเทคอนกรีตผ่านท่อเทอย่างถูกวิธีแล้ว Filter Cake ที่ผิวผนังรูเจาะจะสามารถถูกขจัดออกได้ดังแสดงใน รูปที่ 4 และ 5 แต่หากกระทำผิดขั้นตอนจนทำให้ Filter Cake ตกค้างอยู่จะทำให้ค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณ Filter Cake ที่หลงเหลืออยู่ที่ผิวผนังหลุมเจาะ



รูปที่ 4 การเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะระบบเปียกต้องเทผ่านท่อ Tremie pipe (Reese et al, 1985)



รูปที่ 5 การเทคอนกรีตผ่านท่อ Tremie pipe อย่างถูกวิธีจะสามารถช่วยครูด filter cake ที่ผนังหลุมเจาะออกได้ (Reese et al, 1985)

3.3 การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อค่าการรับน้ำหนักอันเนื่องจากเวลาก่อสร้าง

เป็นที่ยอมรับกันว่าหากเวลาในการก่อสร้างเสาเข็มแต่ละต้นสั้นลงมาเท่าใดก็จะได้สมรรถนะของเสาเข็มดีขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนาน Filter Cake มีโอกาสก่อตัวได้มากขึ้นตามระยะเวลา ดังนั้นในการก่อสร้างต้องเตรียมการให้สามารถก่อสร้างได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งมีผู้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างต่อแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มไว้มากมาย ดังนี้

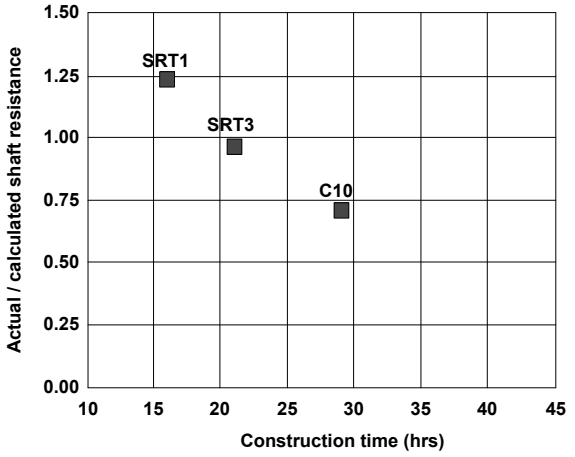
Wates & Knight (1975) วิจัยและสรุปว่า หากปล่อยให้สารละลายเบ็นโทไนท์อยู่นิ่งๆ โดยไม่ถูกรบกวน (Non Agitation) เป็นเวลานาน Filter Cake จะก่อตัวที่ผนังรูเจาะหนา

Fleming et al (1977) ที่เสนอแนะว่าให้ทำการเทคอนกรีตเสาเข็มระบบเจาะเปียกให้แล้วเสร็จภายใน 24 ชั่วโมงหลังการขุดเจาะแล้วเสร็จ ข้อเสนอแนะข้างต้นค่อนข้างตรงกับการปฏิบัติงานจริงในสนามเพราะในขณะทำการขุดเจาะสารละลายเบ็นโทไนท์จะถูกรบกวน (Agitated) ตลอดเวลา ทำให้ Filter Cake ก่อตัวช้าและน้อยหลังการขุดเจาะหรือทำความสะอาดสารละลายฯแล้วเสร็จ Filter Cake จะเริ่มก่อตัวมากเนื่องจากสารละลายฯจะอยู่นิ่งที่เรียกว่า Exposure Time หรือ Contact Time

มาตรฐาน ACI 336.1.94 แนะนำว่าไม่ควรปล่อยให้สารละลายฯในรูเจาะอยู่นิ่ง ๆ โดยไม่มีการกวน (Non Agitation) นานเกินกว่า 4 ชั่วโมง หากเวลาระหว่างการขุดเจาะแล้วเสร็จจนถึงเวลาเริ่มเทคอนกรีตนานเกิน 24 ชั่วโมง ต้องทำการขุดคว้านรูเจาะใหม่เพื่อครูด Filter Cake ให้หลุดออกแล้วทำความสะอาดสารละลายฯ จากนั้นตรวจสอบคุณสมบัติสารละลายฯที่ก้นหลุมและปรับปรุงคุณสมบัติใหม่อีกครั้งให้ตรงตามข้อกำหนดก่อนทำการเทคอนกรีตจึงจะทำให้ได้แรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มกับผิวรูเจาะดีขึ้น

สำหรับผลกระทบเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะใช้ชั้นดินกรุงเทพฯ นั้นได้มีผู้ทำการศึกษามาบ้างเช่นกัน คือ Littlechild et al (1988) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะต่อแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มในโครงการ Hopewell

ซึ่งจากผลการศึกษา Littlechild et al (1988) ได้สรุปไว้ว่า ถ้าเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเกินกว่า 24 ชั่วโมงจะทำให้กำลังรับแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะลดลง (รูปที่ 6) อีกทั้งได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของ Viscosity ต่อกำลังรับแรงเสียดทานที่ผิว ซึ่งได้สรุปไว้ว่าถ้า Viscosity มีค่ามากกว่า 35 sec/quart แล้วจะทำให้แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มลดลงเช่นกัน ในโครงการนี้จึงได้มีการกำหนดไว้ว่าเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแต่ละต้นจะต้องไม่มากกว่า 24 ชั่วโมงและ Viscosity จะต้องไม่มากกว่า 35 sec/quart ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการกล่าวถึงการคว้านรูเจาะใหม่หรือการควบคุมไม่ให้สารละลายฯ ในหลุมเจาะอยู่นิ่ง ๆ นานกว่า 4 ชั่วโมงแต่อย่างใด

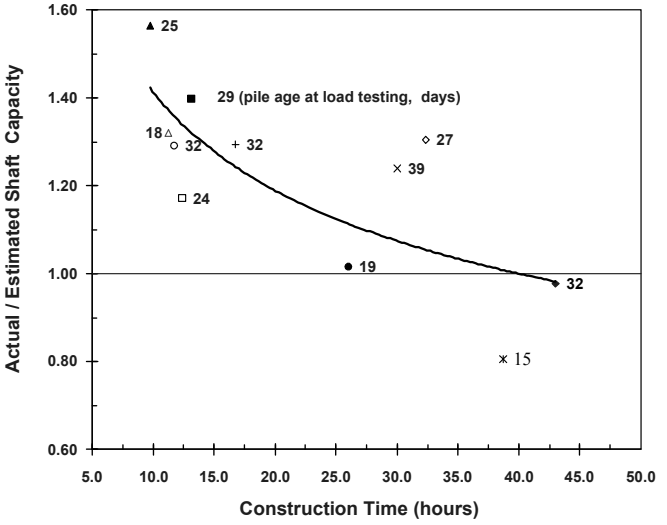


รูปที่ 6 Performance of plain bentonite piles versus construction time (Littlechild et al, 1998a)

งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งหนึ่งเป็นของทีมงานผู้เขียนบทความนี้ ที่ได้รวบรวมผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะจำนวน 11 ต้นที่ถูกก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่มีการติดอุปกรณ์วัดแรง (VWSGs และ Extensometer) มาศึกษาจนพบว่า ระยะเวลาการก่อสร้างที่ยาวนานกว่า 40 ชั่วโมง จะทำให้ค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มมีแนวโน้มลดลงกว่าที่ออกแบบไว้ ตามรูปที่ 7

และในการวิจัยดังกล่าวยังสรุปได้อีกว่าค่า Viscosity ของสารละลายฯที่ใช้หากมีค่าไม่เกิน 55 sec/quart จะไม่มีผลกระทบกับความสามารถในการรับน้ำหนักทางผิวของเสาเข็มแต่อย่างใด ซึ่งเสาเข็มเจาะทั้ง 11 ต้นที่นำมาวิจัยนี้ก่อสร้างโดยไม่มีการปล่อยให้สารละลายฯอยู่นิ่ง ๆ นานเกิน 4 ชั่วโมง หรือเมื่อเวลาก่อสร้างเกินกว่า 24 ชั่วโมง ก็จะทำการเจาะคว้านหลุมใหม่เพื่อขจัด Filter cake ก่อนการลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีต

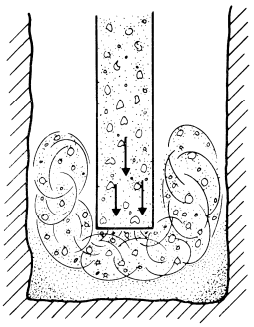
รูปที่ 7 Effect of construction time on shaft capacity of bored piles. (Thasnanipan et al, 1998)



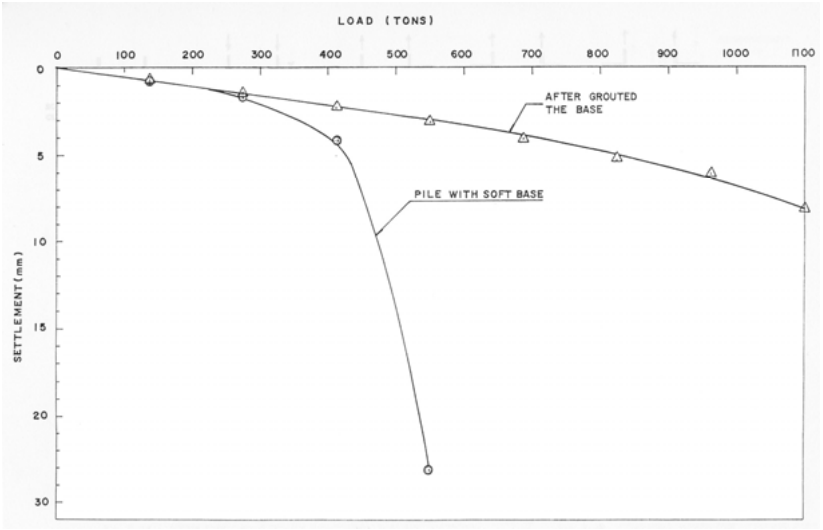
สิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่ผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงาน ควรถือเป็นเรื่องสำคัญคือ ก่อนทำการเทคอนกรีตจะต้องเก็บตัวอย่างของสารละลายเบ็นโทไนท์จากก้นหลุมเจาะขึ้นมาทดสอบทุกครั้ง หากคุณสมบัติของสารละลายฯ ที่เก็บมาทดสอบมีค่าไม่ได้ตามข้อกำหนดจะต้องทำการปรับเปลี่ยนใหม่ให้ได้ก่อนเทคอนกรีตทุกครั้ง จึงจะได้เสาเข็มที่มีสมรรถนะที่ดี

3.4 การทำความสะอาดก้นหลุมและทดสอบสารละลายฯ

การเจาะดินจะมีเศษดินและตะกอนตกสะสมที่ก้นหลุม และสารละลายฯจะข้นเหนียวไม่เหมาะที่คอนกรีตจะแทนที่ได้หมด จึงต้องทำความสะอาดก้นหลุมอาจใช้ Cleaning Bucket หรือระบบ Recycle ซึ่งอาจทำโดยวิธี Air Lift หรือการหย่อนปั๊มน้ำลงไปดูดที่ก้นหลุม เพื่อนำสารละลายฯมาแยกตะกอนดินทรายออกและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายฯที่ก้นหลุมขึ้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากเพราะหากก้นหลุมไม่สะอาดหรือสารละลายฯเหนียวหนักเกินไปคอนกรีตจะไล่แทนที่สารละลายฯได้ไม่หมด (รูปที่ 8) ทำให้แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มลดลงหรืออาจเกิด Soft toe รับน้ำหนักได้ต่ำ ผลการทดสอบเสาเข็มที่เกิด Soft toe ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9



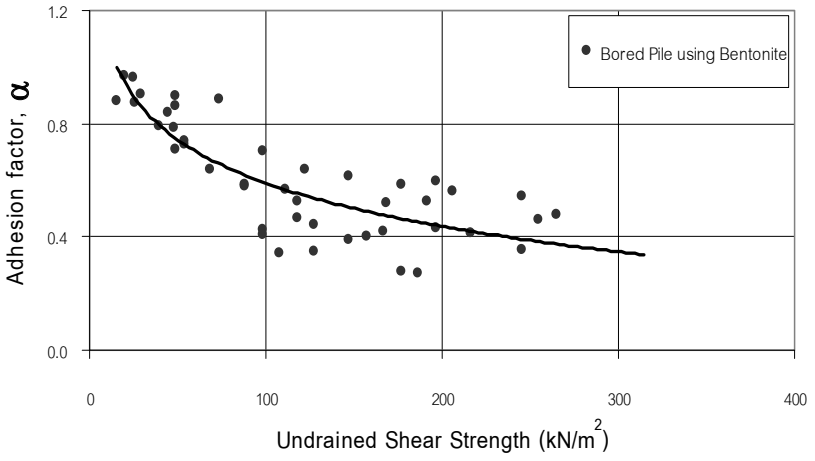
รูปที่ 8 ตะกอนก้นหลุมที่มีความหนาทำให้คอนกรีตแทนที่ไม่หมด (Fleming et al, 1977)



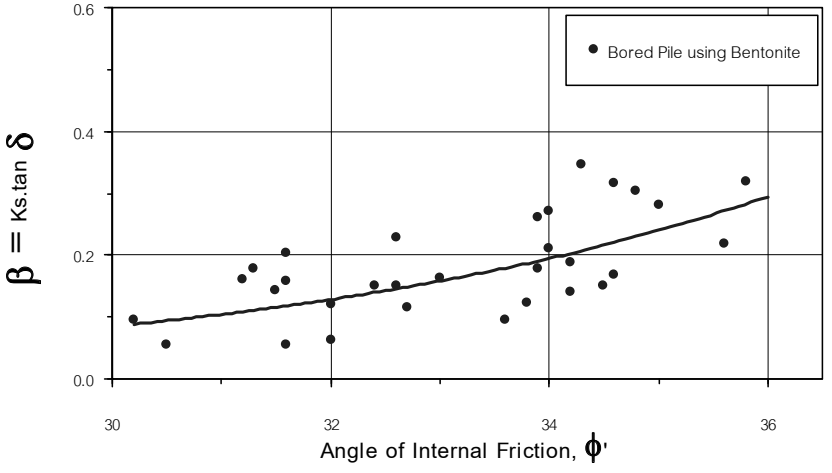
รูปที่ 9 ผลการทดสอบเสาเข็มที่มี Soft toe และหลังจากทำการ Grout ที่ base แล้ว (Ng, 1983)

3.5 สัมประสิทธิ์ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะระบบเปียกที่ใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ในยุคที่สอง

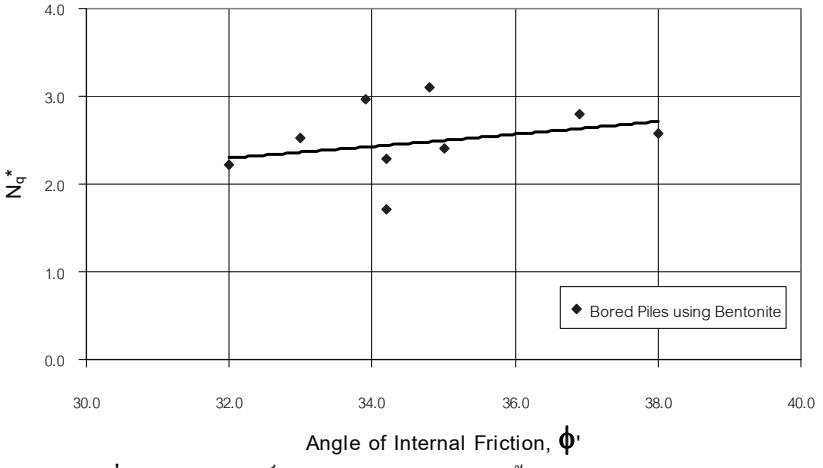
จากผลการทดสอบเสาเข็มที่ก่อสร้างด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ที่มีการควบคุมงานเป็นอย่างดี และมีเทคโนโลยีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่พัฒนาขึ้นมาก ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrument) ซึ่งจะทำให้สามารถวัดแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มได้ จากนั้นจึงนำกำลังรับแรงที่ได้มาวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานให้ชั้นดินเหนียว ชั้นทรายและสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานในชั้นทรายของเสาเข็มเจาะระบบเปียก ชาญชัย (2542) ได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 10,11 และ 12 ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯที่ก่อสร้างโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์ ซึ่งการพิจารณาค่า Effective overburden pressure พิจารณาผลของ Piezometric drawdown เข้าไปด้วย



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α), (ชาญชัย 2542)



รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β),(ชาญชัย 2542)



รูปที่ 12 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานในชั้นทราย (N_q),(ชาญชัย 2542)

4. ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของ เสาเข็มเจาะระบบเปียกยุคยุคปัจจุบันในชั้นดินกรุงเทพฯ

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ที่มีการกล่าวถึงผลกระทบของสารละลายเบ็นโทไนท์ต่อแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม กันมาก และมีผลงานวิจัยในชั้นดินกรุงเทพฯ (Littlechild et al, 1998 และ Thasnanipan et al, 1998) ออกมาสนับสนุน ผู้เขียนและทีมงานจึงได้นำสารละลายโพลีเมอร์ที่เริ่มมีการใช้กันแพร่หลายในสหรัฐอเมริกา มาใช้แทนสารละลายเบ็นโทไนท์ ซึ่งพบว่าได้ผลดี แต่ในการใช้สารละลายโพลีเมอร์ หากใช้ผงโพลีเมอร์อย่างเดียวผสมกับน้ำจะเกิดปัญหาเรื่องการไหลสูญหายของสารละลายฯ จำนวนมากในชั้นทราย ซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพของหลุมเจาะ ดังนั้นจึงยังต้องผสมผงเบ็นโทไนท์ในปริมาณน้อย (7 – 10 กิโลกรัมต่อสารละลาย 1 ลบ.ม.) ลงไปในสารละลายโพลีเมอร์ด้วย เพื่อให้เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายทำให้ลดการไหลสูญหายของสารละลายโพลีเมอร์ได้ จากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะระบบเปียกภายใต้สารละลายโพลีเมอร์ พบว่าค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด มีค่าน้อย ตามตารางที่ 6

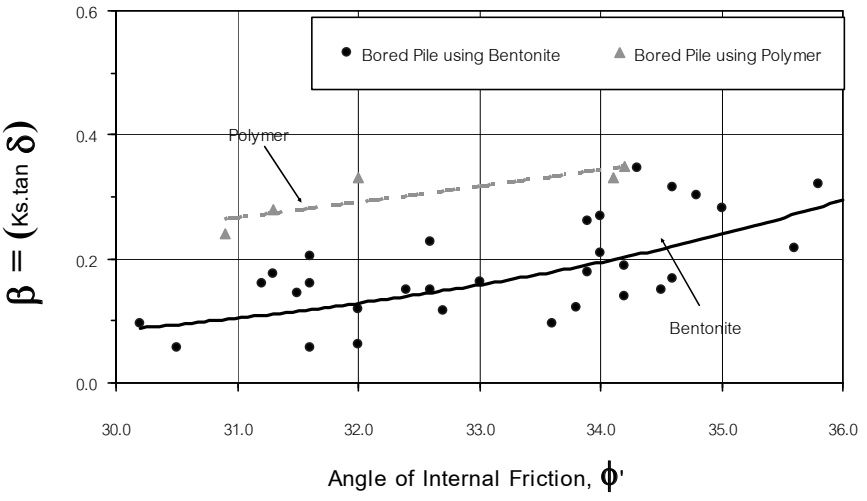
ตารางที่ 6 ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายโพลีเมอร์

ขนาดเสาเข็มและความลึก (เมตร)	น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (ตัน)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทดสอบ (ตัน)	ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักออกแบบ (มม.)	ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด (มม.)
0.80 X 49	330	990	3.90	14.95
0.80 X 50	330	990	5.20	21.05
1.20 X 51	720	1800	4.61	19.76
1.80 X 62	1100	3300	4.00	12.96
1.50 X 54	1200	3200	8.60	23.03
1.00 X 51	450	1125	2.49	9.15
1.00 X 30	260	650	1.67	5.38
0.80 X 41	330	990	2.75	11.60
0.80 X 43	330	660	4.52	11.20
0.60 X 26	100	250	1.61	4.55
0.60 X24	80	200	1.09	4.22

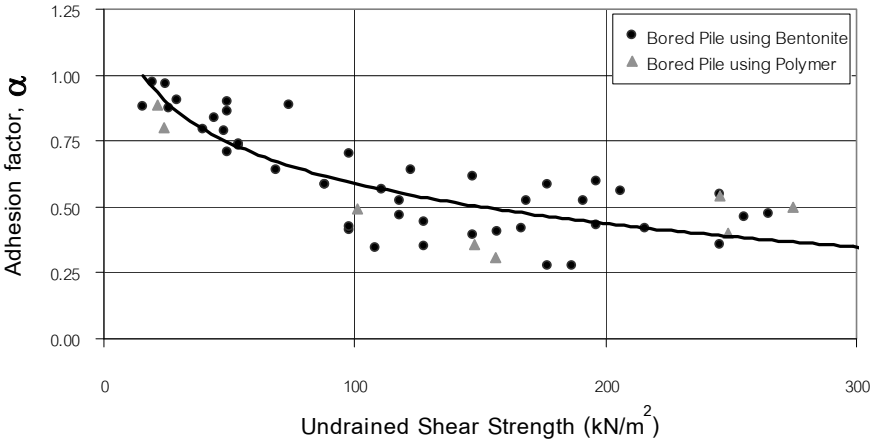
4.1 ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายโพลีเมอร์ ที่มีการติด Instruments

จากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะที่มีการก่อสร้างภายใต้สารละลายโพลีเมอร์ ในสนามโดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instruments) ไว้ในเสาเข็ม พบว่าค่า Friction Coefficient of Bangkok Sand (β-value) มีค่าสูงกว่าค่าที่วิเคราะห์จากเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์มากตามรูปที่ 13 เป็นสิ่งยืนยันว่าเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายโพลีเมอร์ให้แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นทรายสูงขึ้นกว่าการเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์เกือบเท่าตัวเนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ไม่ก่อให้เกิด Filter cake ในปริมาณมากที่ผนังหลุมเจาะจึงไม่เกิดการสูญเสียแรงเสียดทานในชั้นทราย

สำหรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวจากผลการทดสอบเสาเข็มที่มีการติด Instrument ไว้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (α) ไม่มีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าเสาเข็มที่เจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ เนื่องจากพฤติกรรมการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะทั้งโพลีเมอร์และเบ็นโทไนท์มีพฤติกรรมเหมือนกัน (Teparaksa et al, 2001) ตามรูปที่ 14



รูปที่ 13 Friction Coefficient of Bangkok Sand (β) (Teparaksa et al, 2001)



รูปที่ 14 Friction Coefficient of Bangkok Clay (α) (Teparaksa et al, 2001)

5. บทสรุป

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ สามารถสรุปได้ว่า

1. ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ ในปัจจุบัน มีค่าโดยเฉลี่ยสูงกว่าเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์เมื่อ 30 ปีที่แล้วระหว่าง 50 -100 %
2. ในปัจจุบันค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างภายใต้สารละลายโพลีเมอร์มีค่าสูงกว่าเสาเข็มเจาะภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ประมาณ 20 - 30 %
3. ผลของค่ากำลังรับน้ำหนักออกแบบที่สูงขึ้น ทำให้ต้นทุนของราคาค่าก่อสร้างเสาเข็มเจาะต่อกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบมีความประหยัดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในอดีต

เอกสารอ้างอิง

1. ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. พฤติกรรมของเสาเข็มเจาะระบบเปียกและเสาเข็มแบเร็ตที่ติดตั้งเครื่องมือวัด. วิทยานิพนธ์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2542)
2. Fleming, W.K., Sliwinski, Z.J. The Use and Influence of Bentonite in Bored Pile Construction. CIRIA Report PG3. London. (1977)
3. Institution of Civil Engineers (ICE). Specification for Piling and Embedded Walls. Thomas Telford, London. (1996)
4. Ng, K.C. The Construction Problems and Performance of Large Bored Piles in Second Sand Layer. Master's Thesis, GT-82-26 Asian Institute of Technology, Bangkok. (1983)
5. Littlechild, B. and Plumbridge, G. Effect of Construction Technique on the Behavior of Plain Bored Cast In Situ Piles Constructed under Bentonite Slurry. 7th Intl. Conf. and Exhibition on Piling and Deep Foundation. Vienna Pp. 1.6.1-1.6.8 (1998)
6. Reese, L.C. and Tucker, K.L. Bentonite Slurry in Construction Drill Piers. Drilled Piers and Caisson II. ASCE Convention., Denver, Colorado, USA. (1985)
7. Teparaksa, W. and Boonyarak, T. Performance and Behavior of Polymer Slurry in Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoils. 14th KKNN Seminar on Civil Engineering Kyoto, Japan. (2001)
8. Thasnanipan, N., Baskaran, G. and Anwar, M.A. Effect of Construction Time and Bentonite Viscosity on Shaft Capacity of Bored Piles. 3rd Intl. Seminar Deep Foundation on Bored and Auger Piles., Ghent, Belgium. Pp 171-177. (1998)

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่มากสำหรับสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา โครงการถนนวงแหวนรอบนอกตอนใต้

EXPERIENCE IN CONSTRUCTION OF LARGEST DIAMETER DEEP –SEATED BORED PILES AT THE BANK OF CHAOPRAYA RIVER

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

เฉลิมพล มโนสุทธิสาร (Chalermpol Manosuthisan)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

จักรกฤษณ์ จันจัด (Chakkrit Chanchad)[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]ผู้จัดการโครงการ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอภาพรวมของงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่เพื่อเป็นฐานรากสะพานแขวนข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการถนนวงแหวนรอบนอกตอนใต้ ฐานรากของ Pylon และ Back span เป็นเสาเข็มเจาะระบบเปียกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ม. มีความลึกตั้งแต่ 60 ถึง 65 ม. โดยทำการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม เสาเข็มของโครงการนี้ถือว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกที่มากที่สุดในประเทศไทยเท่าที่เคยมีการก่อสร้างมา ในโครงการมีเสาเข็มทดสอบนอกผังที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดหน่วยแรงในแต่ละชั้นดินจำนวน 4 ต้นโดยทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเป็น 2 แบบคือ แบบแรกใส่น้ำหนักบนหัวเสาเข็มทดสอบโดยใช้เสาเข็มสมอรั้ง แบบที่สองคือใส่แรงลงในตัวเสาเข็มทดสอบแบบสองทิศทาง และทดสอบน้ำหนักทดสอบสูงสุดถึง 5,400 ตัน ซึ่งเป็นน้ำหนักทดสอบแบบ Static สำหรับเสาเข็ม ที่มีน้ำหนักบรรทุกมากที่สุดในประเทศไทย จากผลการทดสอบและหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยพบว่า เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยได้สูงมากกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบคือ 1,600 ตัน

ABSTRACT : The wet-processed bored piles of diameter 2.0m founded 60 to 65m below existing ground level were designed for foundation of pylon and back-span structures of cable-stayed bridge across the Chaophaya river in Bangkok. Bored piles were constructed by rotary drilling method under polymer-based slurry. Construction experience of the deepest and largest diameter wet-processed bored piles ever constructed in multi-layered soil of Bangkok is highlighted in this paper. Four instrumented bored piles were tested. The maximum load tested was 5,400 ton which marked the highest static pile load test conducted on single circular-shape bored pile. Results obtained from both conventional static load test and bi-directional load test are presented. Load transfer mechanism of this largest diameter deep-seated bored pile is discussed. Ultimate capacity of bored pile derived from the load test results are compared with those obtained from empirical formula. Apparently, from the test result, the pile could carry a significantly higher load than the original pre-defined safe design load of 1,600 ton.

KEYWORDS : Wet-process bored pile, Bi-directional load test, Ultimate pile capacity, Instrumented bored piles testing

1. บทนำ

สะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณถนนปู่เจ้า-สมิงพรายเป็นส่วนหนึ่งของโครงการถนนวงแหวนรอบนอกตอนใต้ มีรูปแบบโครงสร้างเป็นสะพานแขวนที่มีไพลอน (Pylon) 2 เสาและมีโครงสร้างยึดรั้ง (Back Span) ฐานรากของโครงสร้างดังกล่าวเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ม. ซึ่งถือว่าเป็นขนาดใหญ่ที่สุดที่เคยมีการก่อสร้างในประเทศไทย โดยมีความลึกของปลายเสาเข็มระหว่าง 60 ถึง 65 ม. ที่ปลายเสาเข็มได้ทำการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม ในโครงการนี้มีเสาเข็มทั้งหมด 160 ต้น (รวมเสาเข็มทดสอบและเสาเข็มสมอนอกผัง) โดยลักษณะของชั้นดินแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะชั้นดินโดยทั่วไปของโครงการ

Elevation	Soil type	Unit weigt (t/m^3)	Su (t/m^2)	SPT (blow/ft)
0.0-3.0	Fill	1.80	-	
3.0-10.0	Soft clay, CH	1.60	1.0-2.5	
10.0-15.0	Medium clay, CH	1.75	2.5-5.0	
15.0-36.0	Stiff to very stiff clay, CL	1.85		14-35
36.0-44.0	Dense to very dense sand, SM	1.80		31->60
44.0-54.0	Hard clay, CL	1.85		28-57
54.0-61.0	Very dense sand, SM	1.95		47->60

2. การก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยทั่วไปในโครงการนี้มีขั้นตอนหลักๆ คือ กดปลอกเหล็กชั่วคราวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.05 ม. เพื่อป้องกันหลุมพังในชั้นดินอ่อนซึ่งมีความยาวถึง 18.0 ม. ทำการเจาะดินด้วยสว่าน (Auger) โดยระบบแห้งจนถึงระดับปลายปลอกเหล็ก เปลี่ยนหัวเจาะเป็นแบบถังหมุน (Drilling bucket) แล้วเติมสารละลายขุดเจาะ (Supporting fluid) จนถึงความลึกปลายเสาเข็มระหว่าง 60 ถึง 65 ม. ทำความสะอาดหลุมเจาะโดยใช้ถังเก็บตะกอน (Cleaning bucket) หลังจากปล่อยหลุมเจาะให้เกิดการตกตะกอนตามข้อกำหนดแล้ว หย่อนโครงเหล็กเสริมพร้อมท่ออัดฉีดน้ำปูนซึ่งใช้เป็นท่อทดสอบคุณภาพคอนกรีตด้วย (Sonic logging test) เทคอนกรีตผ่านท่อเท (Tremie pipe) และถอนปลอกเหล็กชั่วคราว



ภาพที่ 1 การหย่อนโครงเหล็กเสริมพร้อมท่ออัดฉีดน้ำปูนซึ่งใช้เป็นท่อทดสอบคุณภาพคอนกรีต

ในโครงการนี้มีข้อกำหนดให้ทำการอัดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มเพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มและช่วยในการลดปัญหาดินหลวมที่ปลายเสาเข็ม (Soft toe punching failure) ซึ่งการอัดน้ำปูนใช้วิธีฝังท่ออัดน้ำปูนลงไปในเสาเข็มเจาะ (Tube-a-manchette grouting) ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 การฝังท่ออัดฉีดน้ำปูนลงไปในเสาเข็มเจาะ (Tube-a-manchette grouting)

ขั้นตอนแรกต้องทำการเปิดปลายเสาเข็มก่อนด้วยการอัดน้ำแรงดันสูงผ่านรูในท่ออัดน้ำปูนหลังจากเทคอนกรีตเสร็จประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นที่ประมาณ 20 วันในทำการอัดน้ำปูนผ่านท่อลงไปที่ปลายเสาเข็มที่เปิดปลายไว้แล้ว โดยที่การอัดน้ำปูนจะเสร็จสิ้นเมื่อแรงดันน้ำปูนสูงถึง 30 bar เป็นเวลา 5 นาที หรือมีปริมาณน้ำปูนถึง 2200 ลิตร อย่างใดอย่างหนึ่ง และต้องทำ

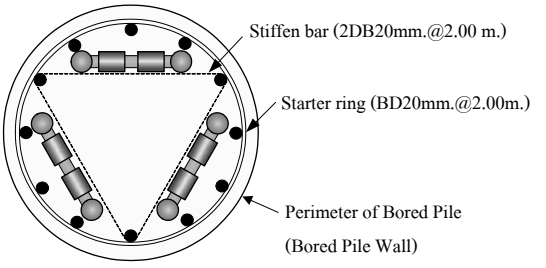
การทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างน้ำปูนซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 170 ksc ที่ 28 วัน

3. เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในโครงการ

เนื่องจากเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ม. มีขนาดใหญ่กว่าเสาเข็มเจาะขนาดปกติที่ทำการก่อสร้างมาก (โดยทั่วไปเสาเข็มเจาะมีขนาดระหว่าง 0.6 ถึง 1.80 ม.) ต้องมีการพิจารณาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติมนอกเหนือจากข้อกำหนดปกติ ดังแสดงต่อไปนี้

ปัจจัยแรกคือเสถียรภาพของหลุมเจาะ เนื่องจากเสาเข็มมีขนาดใหญ่จึงมีรัศมีความโค้งสูงกว่าเสาเข็มทั่วไป ดังนั้นเสถียรภาพของหลุมเจาะจากการถ่ายแรงอัดผ่านส่วนโค้ง (Compression hoop) จึงต่ำกว่าเสาเข็มขนาดเล็กกว่า การรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะในส่วนชั้นดินเหนียวอ่อนให้กดปลอกเหล็กลงไป 18.0 ม.เนื่องจากชั้นดินเหนียวอ่อนในส่วนนี้มีความหนามาก ส่วนใต้ปลอกเหล็กชั่วคราวต้องทำโดยใช้สารละลายรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ ซึ่งใช้สารละลายโพลีเมอร์เป็นหลัก (Polymer based supporting fluid) โดยสารละลายนี้จะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำเปล่าและมีปริมาณเบนโทไนท์ผสมเพียงเล็กน้อย สัดส่วนในการผสมโพลีเมอร์กับเบนโทไนท์มีความจำเป็นต้องพิจารณา 2 ส่วนคือต้องมีปริมาณเบนโทไนท์เพียงพอในการป้องกันหลุมพังหรือบีบตัวเข้ามา และต้องจำกัดปริมาณเบนโทไนท์ไม่ให้สูงเกินที่จะเกิดเยื่อบุทึบน้ำ (Filter cake) ที่มีความหนามากเกินไป อันจะส่งผลในการลดกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นทรายอีกด้วย [1] สำหรับโครงการนี้พบว่าสัดส่วนสารละลายที่ใช้มีความเหมาะสมโดยจะเห็นได้ว่าหลุมเจาะไม่เกิดการพังทลายจากผลการทดสอบสภาพหลุมเจาะ (Sonic caliper test) และกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มก็ไม่ลดลงจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

ปัจจัยที่สองคือความแข็งแรงของโครงเหล็กเสริมและตำแหน่งในการต่อเหล็กเสริม โดยทั่วไปการก่อสร้างเสาเข็มเจาะจะต้องหย่อนโครงเหล็กเสริม ลงในหลุมเจาะที่ละโครงแล้วทำการต่อโครงเหล็กที่หน้าหลุมเจาะ ความแข็งแรงของโครงเหล็กจึงมีความสำคัญเพื่อไม่ให้โครงเหล็กเสริมเกิดการผิดรูป ตำแหน่งหรือหลุดออกจากกันขณะขนย้ายและหย่อนลงหลุมเจาะ ในโครงการนี้ได้มีการเสริมเหล็กคาด (Stiffen bar) และเหล็กตั้งโครง (Starter ring) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งการเสริมความแข็งแรงโครงเหล็กในขนาดอื่นจะมีเพียงเหล็กตั้งโครงเท่านั้น นอกจากนี้เหล็กเสริมต้องรับแรงดึงและเหล็กเสริมในหน้าตัดมีจำนวนมาก การต่อเหล็กจะต้องมีระยะเหลื่อมกัน 50% ของจำนวนเหล็กทั้งหมดในหน้าตัด ซึ่งต้องใช้นั่งร้าน 2 ชั้นในการต่อโครงเหล็กเสริม



ภาพที่ 3 การเสริมเหล็กคาด (Stiffen bar) และเหล็กตั้งโครง (Starter ring) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงเหล็กเสริม

ปัจจัยที่สามคือการก่อสร้างเสาเข็มเจาะติดแม่น้ำเจ้าพระยา แรงดันจากแม่น้ำจะสูงมากซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพของหลุมเจาะและแรงดันน้ำใต้ดินที่จะเข้าไปในหลุมเจาะ จึงต้องมีการสร้างกำแพงกันน้ำ (Cofferdam) ตามภาพที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยกำแพงเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) ยาว 16.0 ม. จำนวน 2 แถว โดยระหว่างกำแพงได้ทำการถมดิน เพื่อสร้างเสถียรภาพกับงานขุดดินรวมทั้งงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะ



ภาพที่ 4 การใช้กำแพงเข็มพืดเหล็กก่อสร้างกำแพงกันน้ำชั่วคราว (Temporary cofferdam)

4. การทดสอบความสมบูรณ์เสาเข็มเจาะและกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะโครงการนี้ประกอบไปด้วยหลายๆส่วนได้แก่ การตรวจสอบขนาดและความดิ่งของเสาเข็มเจาะ การตรวจสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีต และการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

4.1 การทดสอบขนาดและความดิ่ง

วิธีการ Sonic caliper test หรือ Koden test โดยควบคุมการขุดเจาะเสาเข็มให้หลุมเจาะมีแนวดิ่ง เอียงได้ไม่เกิน 1:100

4.2 การทดสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีต [2]

วิธีการ Sonic logging test เป็นการตรวจสอบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับตัวเข็มโดยพิจารณาจากความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงผ่านคอนกรีต ที่จะแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ (Homogenous concrete) ตลอดทั้งต้นหรือไม่

ในโครงการได้ทดสอบเสาเข็มเจาะ จำนวน 160 ต้น โดยติดตั้งท่อเหล็กหรือ manchette เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มม. จำนวน 6 ท่อตลอดความยาวเสาเข็มเจาะ การตรวจสอบแบบไม่ทำลายนี้สามารถบอกตำแหน่งของความผิดปกติได้โดยประมาณ ทำให้สามารถทำการตรวจสอบแบบละเอียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจใช้วิธีเจาะเก็บตัวอย่างหรือสังเกตุด้วยตาตามตำแหน่งที่พบความผิดปกติ เพื่อนำไปสู่การซ่อมแซมเสาเข็ม

4.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ

วิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะในโครงการมีการทดสอบ 2 วิธีคือ การทดสอบด้วยวิธีสถิตย์ศาสตร์ (Static load test) และการทดสอบด้วยวิธี Osterberg load test (Bi-directional load test) ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 4,800 ตัน และ 4,000 ตัน ตามลำดับ

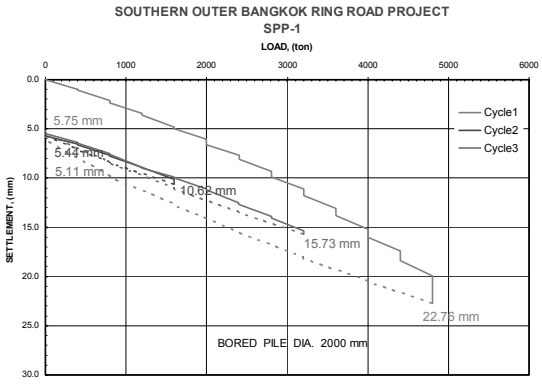
4.3.1 การทดสอบด้วยวิธีสถิตย์ศาสตร์ (Static load test)

เป็นการทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำต่อเสาเข็มโดยตรงแล้วประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้นๆ จากพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม

เสาเข็มที่ใช้ทดสอบเป็นเสาเข็มเจาะϕ 2.00 ม. ยาว 62 ม. รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 1600 ตัน โดยทำการทดสอบที่ 3.0 เท่าของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยคือ 4,800 ตัน

โดยจะทำการขึ้นน้ำหนักบรรทุกที่ 3.0 , 1.0 และ 2.0 เท่าตามลำดับ

ภาพที่ 6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load settlement curve ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มเจาะ SPP-1



ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่าง Load settlement curve ของเสาเข็ม SPP-1 [3]

4.3.2 การทดสอบด้วยวิธี Osterberg Load Test (Bi-directional load test)[4]

โดยขั้นตอนการทดสอบ Osterberg Load Test ใช้เสาเข็มเจาะ ϕ 2.00 ม. ยาว 63.5 ม. รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 1600 ตัน ทำการทดสอบที่ 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยและจะกระทำเมื่อคอนกรีตของเสาเข็มมีกำลังถึง 350 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอนตามภาพที่ 8 ดังนี้

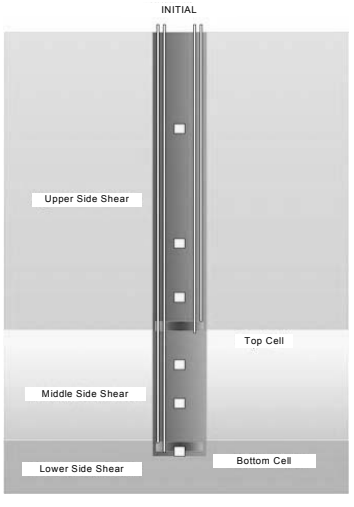
ขั้นตอนที่ 1 เพิ่มแรงดันให้แม่แรงไฮดรอลิกชุดล่างอย่างต่อเนื่องไปที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กำหนดไว้ เมื่อเพิ่มแรงดันให้แก่แม่เหล็กไฮดรอลิค จะเกิดแรงดันขึ้นกระทำต่อเสาเข็มเท่ากับแรงต้านปลายเสาเข็ม (End bearing) ซึ่งจะมีผลทำให้เสาเข็มยกตัวลอยขึ้นในขณะที่ดินใต้เสาเข็ม (ใต้ O-cell) ถูกกดให้ต่ำลงซึ่งการเคลื่อนที่ทั้ง 2 นี้จะถูกวัดอย่างละเอียดด้วย Dial gauge ที่หัวเสาเข็ม และ Telltale ที่ชุด O-cell ตามลำดับ ค่าที่วัดได้จะใช้วิเคราะห์แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

ขั้นตอนที่ 2 เพิ่มแรงดันให้แม่แรงไฮดรอลิกชุดบนอย่างต่อเนื่องไปที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กำหนดโดยปล่อยแม่แรงไฮดรอริกชุดล่างขยับตัวได้อิสระเพื่อให้มีการถ่ายแรงไปยังดินที่ปลายเสาเข็ม ในขั้นตอนนี้จะวัดค่าการเคลื่อนตัวของแม่แรงไฮ

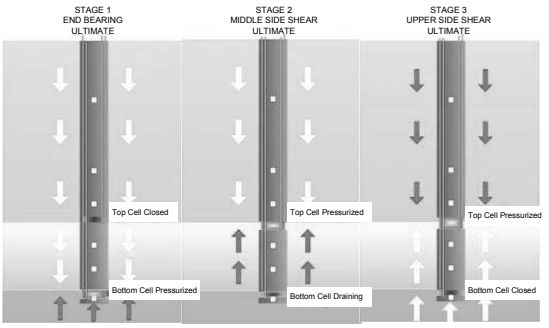
ดรอลิกชุดบนและเสาเข็ม ค่าที่วัดจะใช้วิเคราะห์หาแรงเสียดทานของเสาเข็มในท่อนล่าง

ขั้นตอนที่ 3 จะกระทำเมื่อเสาเข็มท่อนล่างเคลื่อนตัวจนถึงค่ากำลังรับแรงเสียดทานสูงสุด โดยเพิ่มแรงดันในแม่แรงไฮดรอลิกชุดบนอย่างต่อเนื่อง และปิดแม่แรงชุดล่างให้เคลื่อนตัวไปด้วยกันทำให้มีการถ่ายแรงไปยังดินที่ปลายเสาเข็มได้ ในขั้นตอนนี้จะวัดค่าการเคลื่อนตัวของแม่แรงไฮดรอลิกชุดบนและเสาเข็ม ค่าที่วัดได้จะใช้วิเคราะห์หาแรงเสียดทานเ สาเข็มในท่อนบน

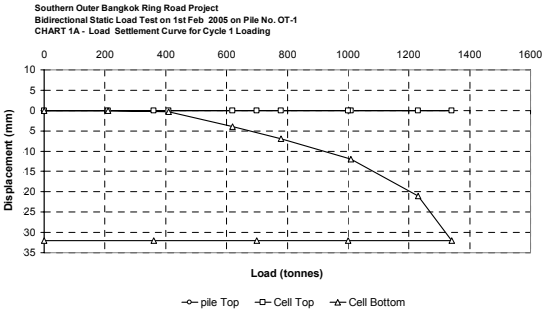
ผลการทดสอบ Osterberg load test นั้นมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในเสาเข็มระหว่างการทดสอบอยู่ 2 ส่วนคือ การเคลื่อนตัวขึ้น (Upward movement) ของหัวเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวลง (Downward movement) ด้านล่าง O-Cell (ปลายเข็ม) ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load-settlement curve ได้ เมื่อทำการทดสอบต่อไปเรื่อยๆ ตามขั้นตอนจนถึงจุดวิบัติของแรงต้านปลายเสาเข็มก็ได้ จากนั้นนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load-settlement curve ของ Cycle 1 และ Cycle 2 ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาพที่ 10 มารวมกันให้อยู่ในรูป Load-settlement curve เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดสอบ Static load test ซึ่งสามารถทำได้ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Top down equivalent curve โดยนำค่าแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ณ จุดที่มีการเคลื่อนตัวเท่ากันมารวมกันแล้วเขียนเป็นกราฟ Load settlement curve ใหม่ดังแสดงดังภาพที่ 11



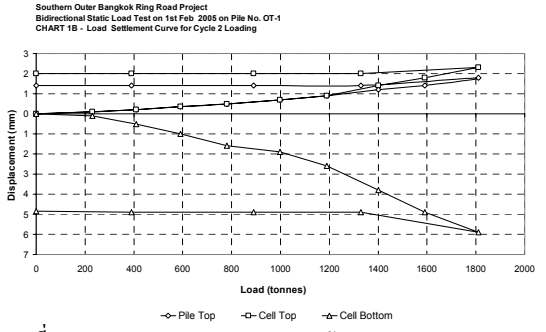
ภาพที่ 7 แสดงการแบ่งเสาเข็มเจาะตามขั้นตอนการทดสอบ Osterberg load test



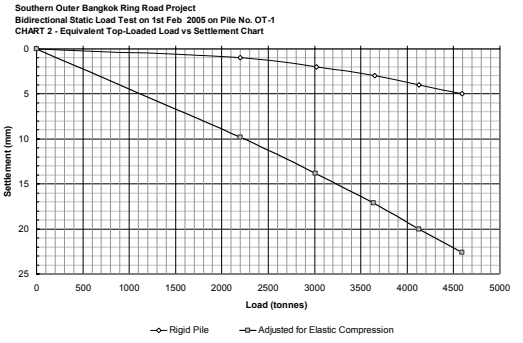
ภาพที่ 8 แสดงขั้นตอนการทดสอบ Osterberg load test



ภาพที่ 9 แสดง Load-settlement curve สำหรับ Cycle 1 (Stage 1)[5]



ภาพที่ 10 แสดง Load-settlement curve สำหรับ Cycle 2 (Stage 2 และ Stage 3)[5]



ภาพที่ 11 กราฟแสดง Equivalent top-loaded vs. Settlement [5]

4.3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

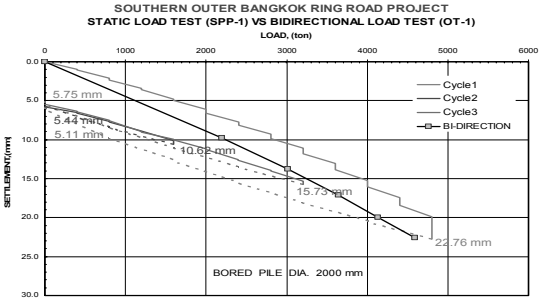
ทำการเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบคือ เปรียบเทียบผลของแรงเสียดทานเสาเข็ม (Skin friction) ที่ได้มาจากการแปลผลของ Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) ที่นำมาติดกับโครงเหล็กของเสาเข็มดังแสดงในตารางที่ 3 และผลการทดสอบ Load settlement curve ที่เปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดสอบเสาเข็ม SPP-1 และ OT-1 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 10

จากภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load-settlement สามารถสรุปได้ว่า เสาเข็ม SPP-1 มีการทรุดตัวที่ 10.62 มม.ที่น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 1,600 ตันและมีการทรุดตัวที่ 22.76 มม. ที่น้ำหนักบรรทุก 4,800 ตัน ในส่วนของเสาเข็ม OT-1 มีการทรุดตัวที่ 7.2 มม.ที่น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย และมีการทรุดตัวที่ 19.2 มม. ที่น้ำหนักบรรทุก 4,000 ตัน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการทดสอบของเสาเข็ม SPP-1 และ OT-1

สภาพชั้นดิน	ความลึก (ม.)	แรงเสียดทาน (ตัน/ม^2)	
		Static Load Test	Bi-D 90% of Test load
Soft Clay	0-12	0.0	-
Stiff Clay	12-29	7.5	7.2
Medium Clay	29-37	14.0	5.9*
Hard Clay	37-47	9.0	29.7-11.5
Dense Sand	47-56	30.0*	23.1
Dense Sand	56-58.5	>40.0*	-

Note *not fully mobilized



ภาพที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างเสาเข็ม SPP-1 และ OT-1

5. บทสรุป

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่มีขนาดใหญ่และมีความลึกมาก น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแต่ละต้นมีค่าสูง เพื่อให้คุณภาพของเสาเข็มเจาะเป็นไปตามที่กำหนด การก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่มากมีเทคนิคที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมจากงานเสาเข็มเจาะทั่วไปคือ

1. เสถียรภาพของหลุมเจาะเนื่องจากมีรัศมีความโค้งสูง ต้องออกแบบสัดส่วนของสารละลายที่ใช้ให้เหมาะสม ซึ่งต้องมีคุณสมบัติพอเพียงทำให้หลุมเจาะไม่เกิดการพังทลาย แล้วตรวจสภาพหลุมเจาะจากผลการทดสอบด้วยเครื่อง Koden test

2. ความแข็งแรงของโครงเหล็กเสริมที่มีน้ำหนักมากและตำแหน่งในการต่อเหล็กเสริมต้องมีการเสริมเหล็กคาด (Stiffen bar) และเหล็กตั้งโครง (Starter bar) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงเหล็ก ส่วนตำแหน่งในการต่อเหล็กเสริมต้องมีระยะเหลื่อมกัน 50% ของจำนวนเหล็กทั้งหมดในหน้าตัด

ส่วนการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ พบว่าเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ม. สามารถรับน้ำหนักปลอดภัยได้สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในการออกแบบ คือ 1,600 ตัน เมื่อวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Mazurkiewicz's Method)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ธยานันท์ บุณยรักษ์, 2544. พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] บริษัท เอสทีเอส อินสตรูเมนต์ จำกัด, 2548. รายงานผลการทดสอบ Sonic Logging Test โครงการทางพิเศษสายบางพลี-สุขสวัสดิ์ ถนนกาญจนาภิเษก, สมุทรปราการ

[3] บริษัท เอสทีเอส อินสตรูเมนต์ จำกัด, 2548. รายงานผลการทดสอบ Static Pile Load Test โครงการทางพิเศษสายบางพลี-สุขสวัสดิ์ ถนนกาญจนาภิเษก, สมุทรปราการ

[4] พัฒนพงศ์ ทองสุข. การทดสอบเสาเข็มแบบ Osterberg Load Cell Test. กรมทางหลวง

[5] บริษัท เอสทีเอส อินสตรูเมนต์ จำกัด, 2548. รายงานผลการทดสอบ Bidirectional Load Test โครงการทางพิเศษสายบางพลี-สุขสวัสดิ์ ถนนกาญจนาภิเษก, สมุทรปราการ

การพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะลึกขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ

REVIEW OF THE STATIC LOAD TEST RESULTS OF DEEP-SEATED LARGE DIAMETER BORED PILES IN BANGKOK

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

ซอว์ ซอว์ เอย์ (Zaw Zaw Aye)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ (Chanchai Submaneewong)[4]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) zaw@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) thayanan@seafco.co.th

[4]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) chanchai@seafco.co.th

บทคัดย่อ : บทความนี้เสนอการพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะลึกขนาดใหญ่ที่ก่อสร้างในกรุงเทพฯ เป็นระยะเวลากว่า 30 ปี ได้มีการวิเคราะห์หลักการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะในชั้นดินในแต่ละประเภท การวิเคราะห์ใช้วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยเปรียบเทียบกับขนาดของเสาเข็มที่แต่ละระดับความลึกของดิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอเป็นแนวทาง หรือข้อมูลอ้างอิงในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในวงการอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศไทย

ABSTRACT : This paper presents a review of the static load test results of deep-seated large diameter bored piles conducted in Bangkok in past 30 years. Load-transfer mechanism of large diameter bored piles in multi-layered soil is discussed. Safe design loads of different pile sizes in relation to different pile tip levels applied in various projects are summarized. Information present in this paper is aimed to serve as source of reference for practicing engineers in construction industry of Thailand.

KEYWORDS : Large diameter bored pile, Load bearing capacity, Load transfer mechanism

1. บทนำ

ฐานรากเสาเข็มเจาะลึกขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพฯ มีความเหมาะสมในการใช้ในงานเนื่องจาก เสาเข็มมีกำลังรับน้ำหนักต่อต้นสูง สามารถก่อสร้างฐานรากในพื้นที่จำกัด ไม่เกิดการเคลื่อนตัวของดินระหว่างการก่อสร้าง การควบคุมคุณภาพงานและการตรวจสอบคุณภาพของเสาเข็มสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในอดีตการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะจะใช้วิธีคำนวณเชิงประสบการณ์ (Empirical formula) โดยที่พารามิเตอร์ในการคำนวณยังให้ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ไม่แน่นอน ประกอบกับเทคโนโลยีในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะและเทคโนโลยีการตรวจวัดกำลังรับน้ำหนักในอดีตยังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก ดังนั้นการออกแบบเสาเข็มเจาะในอดีตจึงมีการกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนักที่ต่ำกว่าในปัจจุบัน โดยทั่วไปปัจจัยหลายๆด้านมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะเช่น

ลักษณะชั้นดิน ขนาดและความยาวของเสาเข็มเจาะ สารละลายรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ ระยะเวลาที่ใช้ในการเจาะ เครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะดิน เทคนิคและประสบการณ์ในการก่อสร้าง เป็นต้น

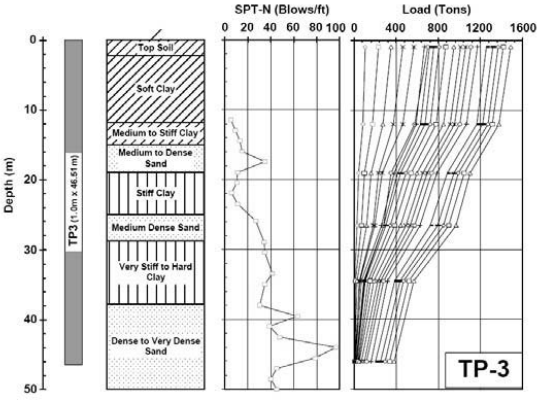
2. พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกในเสาเข็มแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ในกรุงเทพฯ กำลังรับน้ำหนักส่วนใหญ่ของเสาเข็มเจาะมาจากแรงเสียดทานของเสาเข็ม สมมุติฐานของการถ่ายแรงในเสาเข็มนั้น เสาเข็มจะรับน้ำหนักจากด้านบนส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวลงล่าง เมื่อเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวจะเกิดแรงเสียดทานด้านข้างโดยที่ดินชั้นบนจะเกิดแรงเสียดทานก่อนดินด้านล่าง แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนตัวที่ปลายเสาเข็ม การตรวจวัดพฤติกรรมการถ่ายแรงของเสาเข็มสามารถใช้เครื่องมือวัดหน่วยความเครียดที่ติดตั้งในเสาเข็มเจาะ (VWSG) ดังแสดงในภาพที่ 1

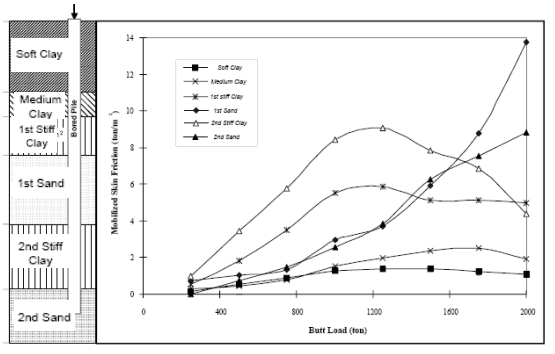


ภาพที่ 1 เครื่องมือวัดหน่วยความเครียดติดตั้งในเสาเข็มเจาะ Vibrating Wire Strain Gauge

เมื่อสามารถวัดหน่วยความเครียดในแต่ละชั้นดินก็สามารถแปลงออกมาเป็นแรงในแต่ละชั้นของเสาเข็มจึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ของการถ่ายแรงจากชั้นดินด้านบนลงสู่ชั้นล่างได้ที่น้ำหนักทดสอบต่างๆ ตามภาพที่ 2 นอกจากนี้เครื่องมือวัดแรงในเสาเข็มสามารถแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินเปรียบเทียบกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแต่ละชั้น โดยทั่วไปแล้วชั้นดินเหนียวแข็งจะพัฒนากำลังรับแรงเสียดทานถึงจุดสูงสุดที่ระดับการเคลื่อนตัวที่ต่ำ มีจุด Peak unit friction ที่ชัดเจน มีลักษณะแบบ Brittle failureในขณะที่ชั้นทรายที่มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ซึ่งในจุดที่ชั้นทรายมีการพัฒนาหน่วยแรงเสียดทานที่สูง หน่วยแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวแข็งจะมีค่าลดลงมาอยู่ที่ Residual unit friction รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกับการพัฒนากำลังรับแรงเสียดทานนี้แสดงอยู่ในภาพที่ 3



ภาพที่ 2 การถ่ายแรงของเสาเข็มในแต่ละชั้นดินที่น้ำหนักทดสอบต่างๆ ของเสาเข็มเจาะ [1]



ภาพที่ 3 การพัฒนาหน่วยแรงเสียดทานที่ระดับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นดิน [1]

3. การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากสมการเชิงประสบการณ์

การคำนวณแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียวส่วนใหญ่จะใช้ทฤษฎี Total stress analysis ในชั้นทรายจะใช้ทฤษฎี Effective stress analysis ใช้คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่วัดได้จากการเจาะสำรวจดิน และค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณที่ใช้จะได้จากทั้งค่าตามทฤษฎีและค่าจากการวิเคราะห์กลับ (Back analysis) จากการทดสอบเสาเข็มที่ติดตั้งเครื่องมือวัด

3.1 แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

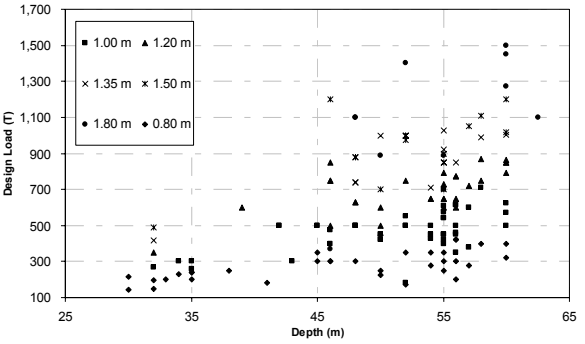
แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะพิจารณาตามลักษณะชั้นดินที่เสาเข็มฝังอยู่ตลอดความยาว ในชั้นดินเหนียวมักใช้วิธี α-Method ตามสมการ $f_s = \alpha . S_u$ และใช้ β-Method ตามสมการ $f_s = \beta.\sigma'_{vi}$ หรือ $K_s.\tan\delta.\sigma'_{vi}$ โดยที่ค่า α เป็นพารามิเตอร์ที่แปรผกผันกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (S_u) และ β เป็นพารามิเตอร์ของแรงเสียดทานในชั้นทรายซึ่งเป็นผลของ พารามิเตอร์ K_s ในส่วนของสัมประสิทธิ์ที่แปลงหน่วยแรงในแนวดิ่งเข้ามาในแนวราบและ $\tan\delta$ ที่เป็นสัมประสิทธิ์ของมุมเสียดทานระหว่างชั้นทรายกับผิวเสาเข็มซึ่งเป็นฟังค์ชันของมุมเสียดทานภายในของทราย ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้ได้จากการวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะที่ติดเครื่องมือวัดหน่วยแรง

3.2 แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

การคิดแรงต้านที่ปลายเข็มต้องพิจราณาชั้นดินที่ปลายเข็มว่าเป็นดินชนิดใดและวิธีการ ก่อสร้างเสาเข็มที่ต่างกันก็จะมีผลต่อแรงต้านที่ปลายเข็มด้วย ซึ่งสมการที่คำนวณแรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียวจะใช้สมการ $S_u.N_c$ โดยที่ค่า N_c คือ สัมประสิทธิกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวมีค่าเท่ากับ 9 สำหรับชั้นทรายจะใช้สมการ $\sigma'_{vi} . N_q^*$ เมื่อค่า N_q^* เป็นสัมประสิทธิกำลังรับแรงแบกทานปลายเสาเข็ม โดยที่ค่า N_q^* จะมีความสัมพันธ์กับมุมเสียดทานภายในของชั้นทราย

4. ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ

พฤติกรรมการรับแรงในเสาเข็มเจาะสามารถตรวจสอบได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์ ทั้งแบบติดตั้งเครื่องมือวัดหน่วยแรงและไม่ได้ติดตั้งเครื่องมือวัดหน่วยแรง เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักออกแบบ ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ความลึกเสาเข็มเจาะ น้ำหนักออกแบบของเสาเข็มเจาะ ที่ได้จากการรวบรวมจากตัวอย่างเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างระหว่างปี พ.ศ. 2545 – 2550 จากเสาเข็มเจาะระบบเปียก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.80 – 1.80 ม.



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ความลึกเสาเข็มเจาะ กับน้ำหนักออกแบบของเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ

ในเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด ได้มีการเก็บข้อมูลหน่วยแรงเสียดทานที่วัดได้แต่ละชั้นดิน โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆตามลักษณะชั้นดิน โดยบันทึกค่าเป็นหน่วยแรงสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละชั้น ดังตารางที่ 1 แสดงค่าหน่วยแรงจากการทดสอบเสาเข็มเจาะที่ติดตั้งเครื่องมือวัดหน่วยแรงในกรุงเทพฯ ก่อสร้างโดยทั้งสารละลายโพลีเมอร์และเบนโทไนท์ โดยไม่ใช้วิธีอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

ตารางที่ 1 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบเสาเข็มเจาะที่ติดตั้งเครื่องมือวัดในกรุงเทพฯ [2]

ชั้นดิน	ช่วงกำลังรับแรงเสียดทานสูงสุดที่น้ำหนักทดสอบ (kN/m^2)
Soft Clay	17 ถึง 22
Medium Clay	40 ถึง60
Stiff to Very Stiff Clay	75 ถึง120
Hard Clay	110 ถึง135
Dense to very dense Sand	(80*) ถึง 140-220

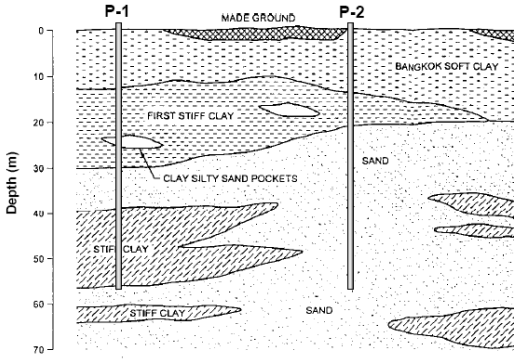
หมายเหตุ: * กำลังรับแรงเสียดทานยังพัฒนาไม่ถึงจุดสูงสุดเนื่องจากการถ่ายแรงน้ำหนักจากด้านบนถ่ายลงมาที่ระดับทรายชั้นที่สองเพียงบางส่วน

5. ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะที่ขนาดและความลึกที่เท่ากันอาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านการก่อสร้างเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่

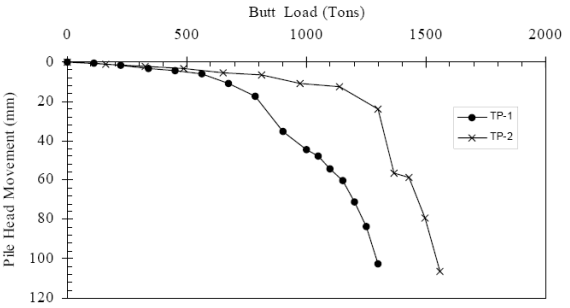
5.1 ลักษณะชั้นดิน

ชั้นดินในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกันออกไป คุณสมบัติทางกายภาพ ประเภทของดิน ความหนาของชั้นดินอ่อน ระดับความลึกของชั้นดินแน่น ความแน่นหรือความแข็งของชั้นดิน และลักษณะชั้นดินที่ปลายเสาเข็มฝังอยู่ ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะ นอกจากนี้การที่ชั้นดินที่ปลายเสาเข็มฝังในดินที่ไม่แน่นหรือไม่แข็งพอ หรือมีชั้นดินอ่อนอยู่ด้านล่างของปลายเสาเข็มจะส่งผลให้เกิดการรูดลงของปลายเสาเข็ม (Plunging failure) ตัวอย่างเสาเข็มทดสอบจากภาพที่ 5 แสดงถึงเสาเข็มที่มีขนาดและความลึกเท่ากัน มีตำแหน่งห่างกันประมาณ 4.5 กม. ในกรุงเทพฯ เสาเข็มต้นหมายเลข P1 ฝังในชั้นดินที่มีดินเหนียวแข็งที่มีความหนามาก ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายโดยมีชั้นดินเหนียวอยู่ข้างใต้ ส่วนเสาเข็มหมายเลข P2 ฝังอยู่ในชั้นทรายที่มีความหนาต่อเนื่องโดยไม่มีชั้นดินเหนียวอยู่ที่ปลายเสาเข็ม เมื่อทำการทดสอบเสาเข็มทั้งสองต้นพบว่ากำลังรับแรงประลัยของเสาเข็มเจาะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ภาพที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม P1 และ P2 เสาเข็มหมายเลข P1 เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่ 800 ตัน และเกิด Plunging failure ทำให้กำลังรับแรงเสียดทานแต่ละชั้นมีค่าลดลงไปด้วยเนื่องจากการเคลื่อนตัวที่สูงของปลายเสาเข็มทำให้หน่วยแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวแข็งมีค่าลดลงต่ำกว่า Peak unit friction



ภาพที่ 5 ลักษณะชั้นดินของเสาเข็มทดสอบ 2 ต้นที่มีขนาดและความลึกเท่ากัน แต่วางในลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกันในกรุงเทพฯ [1]

ในขณะที่เสาเข็มหมายเลข P2 รับน้ำหนักได้ถึง 1400 ตัน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวที่เห็นได้ชัดเจน



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ 2 ต้นที่มีขนาดและความลึกเท่ากัน แต่วางในลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกันในกรุงเทพฯ [1]

5.2 วิธีการก่อสร้าง

จากผลการทดสอบเสาเข็มที่ใช้วิธีการก่อสร้างแบบระบบระบายน้ำกลับทาง (Reverse Circulation, RC) (Ng, 1983) [3] ซึ่งใช้เวลาในการก่อสร้างนานกว่าการใช้การเจาะแบบสว่านและถังเจาะ (Auger and Bucket, AB) ทำให้สารละลายเบนโทไนท์ก่อตัวกันเป็นแผ่นฟิล์มกันน้ำ (Filter cake) ที่มีความหนามากตามไปด้วย นอกจากนี้การใช้วิธีการก่อสร้างแบบ Reverse circulation จะไม่มีการครูดแผ่นฟิล์มกันน้ำออก แตกต่างกับการใช้วิธี Auger & Bucket ถึงแม้ว่าจะใช้สารละลายเบนโทไนท์เหมือนกันแต่ตัวถังเจาะ Bucket ยังมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้แผ่นฟิล์มกันน้ำไม่สามารถก่อตัวได้อย่างต่อเนื่อง (ลดพฤติกรรม Thixotropy) และยังถูกครูดออกไปบ้างด้วยถังเจาะ ส่งผลให้กำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่ก่อสร้างด้วยวิธี Reverse circulation มีค่าต่ำกว่าการก่อสร้างด้วยระบบ Auger & Bucket ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักในการออกแบบของเสาเข็มมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ตารางที่ 2 ทำการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักออกแบบ ขนาดและความลึกของเสาเข็มและค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักทดสอบของเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างด้วยระบบ Reverse circulation ในกรุงเทพฯ ระหว่างปี พ.ศ. 2514 -2525 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับน้ำหนักออกแบบของเสาเข็มในช่วงนั้นมีค่าไม่สูงมากเนื่องจาก เสาเข็มเจาะระบบเปียกยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่สำหรับวิศวกรไทย และความรู้ด้านการควบคุมคุณภาพของสารละลายเบนโทไนท์ และการควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะยังไม่แพร่หลายมากในเวลานั้น ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกออกแบบเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างด้วยวิธี Auger & Bucket โดยใช้สารละลายเบนโทไนท์แสดงอยู่ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยวิธีการก่อสร้างแบบ Reverse circulation (Ng, 1983) [3]

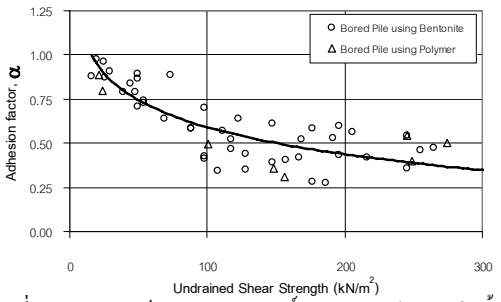
โครงการ	ระบบ	ขนาดและความลึก	นน.บรรทุกออกแบบ (ตัน)	นน.บรรทุกทดสอบสูงสุด (ตัน)	ค่าทรุดตัวที่นน.ทดสอบ (มม.)
สะพานปิ่นเกล้า	RC	Ø 1.50x45 ม.	410	820	5.00
สะพานสาทร	RC	Ø 1.50x45 ม.	500	1200	7.76
สะพานพุทธ	RC	Ø 1.50x49 ม.	550	1100	8.15

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักบรรทุกออกแบบเฉลี่ยของเสาเข็มเจาะระบบเปียกในที่ก่อสร้างโดยสารละลายเบนโทไนท์ [4]

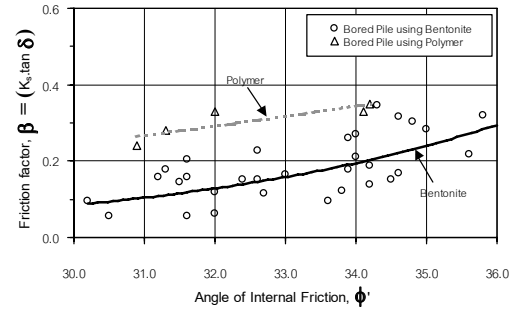
ขนาดเสาเข็มเจาะ	น้ำหนักบรรทุกออกแบบโดยเฉลี่ย	ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยที่น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (มม.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทดสอบโดยเฉลี่ย (ตัน)	ค่าการทรุดตัวโดยเฉลี่ยที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด (มม.)
800 มม.	300 ตัน	3-4	750	10 - 12
1000 มม.	450 ตัน	3-4	11250	12 - 18
1200 มม.	600 ตัน	3-5	1500	16 - 20
1500 มม.	950 ตัน	3-6	2250	18 - 25

5.3 สารละลายในการขุดเจาะ

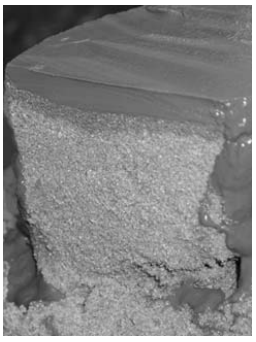
ใช้ช่วงแรกของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก สารละลายที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะใช้สารละลาย เบนโทไนท์ ซึ่งเป็นโคลนสังเคราะห์ มีความหนืดและค่าหน่วยน้ำหนักสูงกว่าน้ำ ทำให้การป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะสูงกว่าน้ำ และยังมีความประหยัดเนื่องจากสารละลายมีการซึมหายไปในชั้นทรายต่ำกว่าการใช้น้ำเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายเบนโทไนท์จะก่อให้เกิดแผ่นฟิล์มกันน้ำ (Filter cake) ในชั้นทราย ทำให้กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายของเสาเข็มที่ใช้เบนโทไนท์มีค่าต่ำกว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์ ตามภาพที่ 7 และ 8 (ชาญชัย, 2542 [5], และธยานันท์, 2545 [6]) ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) และชั้นทราย (β) พบว่า ในชั้นดินเหนียวค่ากำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มจากการก่อสร้างโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์ และสารละลายโพลีเมอร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายพบว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยใช้สารละลายเบนโทไนท์มีค่าต่ำกว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างโดยสารละลายโพลีเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์เมื่อมีการซึมผ่านเข้าไปในชั้นทรายตัวสารละลายที่เป็นโคลนจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายกลายเป็นแผ่นฟิล์มกันน้ำ (Filter cake) ทำให้การซึมผ่านในชั้นทรายลดลง เมื่อปล่อยให้สารละลายซึมผ่านเป็นระยะเวลานานแผ่นฟิล์มกันน้ำจะมีความหนามากขึ้น ภาพที่ 9 (ก) [6] ทำให้ผิวเสาเข็มไม่สัมผัสกับเม็ดทรายโดยตรง แรงเสียดทานในชั้นทรายจึงลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cernak (1976) [7] ที่ทดสอบเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างด้วยสารละลายเบนโทไนท์ แล้วทิ้งหลุมเจาะหลายวัน เป็นระยะเวลาต่างกันทำให้กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายลดลงตามระยะเวลาที่ทิ้งสารละลายไว้ในหลุมเจาะ ในขณะที่การใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่ทำให้เกิดแผ่นฟิล์มกันน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 9 (ข) (ธยานันท์, 2545 [6]) ผิวเสาเข็มจึงสัมผัสกับเม็ดทรายโดยตรง ในการทำงานก่อสร้างจริงได้มีการผสมสารละลายเบนโทไนท์ลงไปเล็กน้อย ประมาณ 1.0-1.5% โดยน้ำหนักเพื่อลดการสูญเสียสารละลายในปริมาณที่สูงเกินไปในชั้นทราย



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) กับกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว (S_u)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) กับมุมต้านทานภายในของทราย (ϕ')



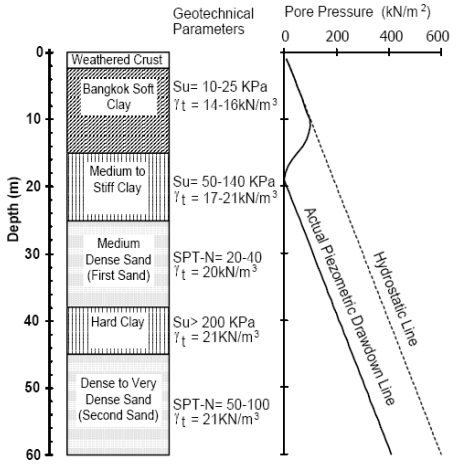
ภาพที่ 9 (ก) ความหนาของฟิล์มกันน้ำที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์



ภาพที่ 9 (ข) ผิวหน้าทรายเมื่อผ่านสารละลายโพลีเมอร์

5.4 ระดับน้ำใต้ดิน

เนื่องจากในอดีตมีการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯมากทำให้ระดับน้ำใต้ดินมีค่าต่ำกว่าระดับ Hydro static water pressure โดยผลจากการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินเมื่อปี พ.ศ. 2542 [2] พบว่าระดับน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯอยู่ที่ประมาณ 20 ม. จากผิวดิน ตามภาพที่ 10 ซึ่งในการวิเคราะห์กลับหาพารามิเตอร์ β และ N_q ในชั้นทรายเพื่อหาค่าแรงเสียดทานและกำลังรับแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะพิจารณา Effective overburden stress (σ'_v) ตามแรงดันน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นจริง ทำให้ค่า β และ N_q มีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น และค่าพารามิเตอร์ข้างต้นนี้เวลาการคำนวณออกแบบจะพิจารณาระดับน้ำใต้ดินแบบ Hydro static water pressure ทำให้หน่วยแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นทรายที่ได้มีค่า Conservative



ภาพที่ 10 ระดับน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อปี พ.ศ. 2542 [2]

สรุป

การออกแบบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะระบบเปียกในกรุงเทพฯ จะต้องพิจารณาจากปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ลักษณะชั้นดินที่เสาเข็มวางตัว วิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ สารละลายที่ใช้ในการขุดเจาะ ระดับน้ำใต้ดิน สมการที่ใช้ในการคำนวณ และสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณ ทั้งนี้ควรเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกำลังรับน้ำหนักที่ได้กับข้อมูลโครงการที่ผ่านมา รวมทั้งพิจารณาความเป็นไปได้ของหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินและหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มว่ามีความเหมาะสมเพียงใด นอกจากนี้จะต้องมีข้อกำหนดงานก่อสร้างเสาเข็มที่มีความเหมาะสมเพื่อให้เสาเข็มเจาะมีคุณภาพตรงตามสมมุติฐานในการออกแบบและมีกำลังรับน้ำหนักทดสอบใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

บรรณานุกรม

[1] Thasnanipan N, Anwar M.A., Maung A.W.. Failure mechanism of long bored piles in layered soils of Bangkok. Civil and Environmental Engineering Conference New Frontiers and Challenges. Bangkok.1999.

[2] Thasnanipan N, Aye Z.Z, Submaneewong C and Teparaksa W. Performance of Wet-Process Bored Piles Constructed with Polymer-Based Slurry in Bangkok Subsoil. Deep Foundations 2002. Orlando. 2002

[3] Ng, K.C., The Construction Problems and Performance of Large Bored Piles in Second Sand Layer. Master's Thesis, GT-82-26 Asian Institute of Technology, Bangkok, 1983.

[4] ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. พัฒนาการของการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในประเทศไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9. เพชรบุรี. 2547

[5] ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, พฤติกรรมของเสาเข็มแบเร็ตและเสาเข็มเจาะที่ติดเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

[6] ธยานันท์ บุณยรักษ์, พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

[7] Cernak, B. The Time Effect of Suspension on the Behavior of Piers. Proceedings, Sixth European Conference on Soil Mechanics and Found. Eng., 1.1, Vienna. March. 1976.

การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเนื่องจากการก่อสร้างฐานรากในชั้นดินกรุงเทพฯ

Pile Movement Induced by Basement Construction in Bangkok Sub-soils

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

ซอว์ ซอว์ เอย์ (Zaw Zaw Aye)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) zaw@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพีอาวุโส บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ : ปัจจุบันงานก่อสร้างเสาเข็มในพื้นที่กรุงเทพฯ กับงานอาคารขนาดใหญ่หรือโครงสร้างสาธารณูปโภคต่างๆมักมีระดับตัดหัวเสาเข็มใช้งานต่ำกว่าระดับดินเดิม การขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน ฐานรากหรือโครงสร้างใต้ดินบริเวณใกล้เสาเข็มเนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีค่าการเคลื่อนตัวที่สูงเมื่อรับแรงที่เกิดขึ้นจากการขุดดิน จึงต้องมีการป้องกันการเคลื่อนตัวของดินที่แข็งแรงเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันดินผลักเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวในระหว่างการขุดดินได้ บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมของเสาเข็มเมื่อรับแรงดันดินที่เกิดขึ้นจากการขุดดิน โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite element และเก็บข้อมูลจากหน่วยงานก่อสร้างที่มีการขุดดินลึกตั้งแต่ 4-15 ม. โดยพิจารณาการเคลื่อนตัวของกำแพงจากเครื่องมือวัดและพิจารณารูปแบบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ระดับตัดหัวเสาเข็มใช้งาน รวมทั้งได้เสนอแนวทางป้องกันเพื่อใช้ในงานขุดดินลึกกับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ABSTRACT : Piles with cut-off level deeper than existing ground level are widely used for large buildings or infrastructures in Bangkok subsoils. Excavation work adjacent to piles for basement or footing construction can cause large soil movement due to low soil stiffness of Bangkok soft clay. For this reason, appropriate soil protection system is required to pile movement induced by excavation work. This paper presents theoretical behavior of pile movement caused by excavation work and analysis of pile movement by finite element program and data collecting from site with excavation depth from 4-15 m deep. Pile movement data can be collected by indirect calculation from retaining wall movement and observe the movement direction as well as magnitude at pile cut-off level. Recommended preventive measure of excavation induced pile movement is also presented.

KEYWORDS : Pile movement, Soil and structure stiffness, Soil-structure interaction, Excavation induced soil movement

1. บทนำ

เสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่มักมีระดับตัดหัวเสาเข็มใช้งานต่ำกว่าระดับดินเดิม การก่อสร้างฐานรากหรือห้องใต้ดินจึงต้องทำการขุดดินลงไปเพื่อทำการตัดหัวเสาเข็ม ขั้นตอนดังกล่าวส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งมีความไวต่อการเคลื่อนตัวสูงมาก และมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ การพังทลายเฉพาะจุด (Local failure) ของดินเหนียวอ่อนอาจเกิดขึ้นได้หากการขุดดินมีความลาดชันมากเกินกว่าแรงต้านของดิน การเคลื่อนตัวหรือการพังทลายของดินนี้จะส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่ฝังในดินได้แก่ เสาเข็ม อุโมงค์ หรือระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ ผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้สามารถส่งผลให้

เกิดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะออกไปจากตำแหน่งเดิม ไปจนถึงการแตกร้าวหรือเสาเข็มหักในกรณีที่การเคลื่อนตัวของดินมีค่าสูงมาก ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 1 จะเห็นได้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวอย่างเป็นระบบตามทิศทางการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเข้าหาบ่อขุดดิน โดยเสาเข็มเจาะที่ใกล้กับกำแพงกันดินจะเคลื่อนตัวมากกว่าเสาเข็มด้านใน

ประจิต (2538) [1] ได้ทำการศึกษางานขุดห้องใต้ดินด้วยกำแพงเข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile) ในชั้นดินกรุงเทพฯ พบว่าเสาเข็มบริเวณใกล้เคียงแนวเข็มพืด เคลื่อนสู่ภายในอย่างมีระบบ และพบว่าเสาเข็มบางต้นมีรอยแตกร้าว

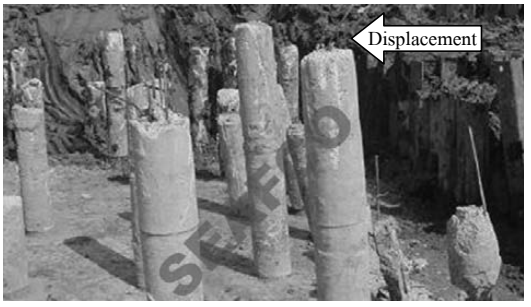
ได้มีงานวิจัยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยใช้ Finite element เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในสนามโดย Poulos & Chen (1997) [2] ได้ทำการศึกษางานขุดดินบริเวณเสาเข็มในชั้นดินเหนียวและได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ลักษณะชั้นดิน ระดับความลึกในการขุด ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน ความแข็งแรงของกำแพงกันดินและระบบค้ำยัน

Phienwej and Kanoknukulchai (1989) [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มตอกเพื่อก่อสร้างฐานรากอาคาร พบว่างานขุดดินทำให้เสาเข็มจำนวนมากเกิดความเสียหายทั้งจากกิจกรรมการก่อสร้างและการไหลของดิน

Phienwej et al. (1996) [4] ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพงแบบต่างๆ ได้แก่ กำแพงเสาเข็มพืดเหล็ก กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง และกำแพงพืดแบบขุดหล่อในที่ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite element และได้นำเสนอรูปแบบความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของกำแพงกับความแข็งของกำแพง โดยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกำแพงแบบอ่อน (Flexible wall) กับแบบแข็ง (Rigid wall) โดยที่การเคลื่อนตัวของกำแพงแบบแข็งมีประมาณ δ_{max}/H =0.2-0.7 % ในขณะที่การเคลื่อนตัวของกำแพงอ่อนมีค่า δ_{max}/H =0.5-1.5 %

Thasnanipan et al (1998) [5] ได้รวบรวมผลการทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มด้วยวิธี Sonic integrity testing ของเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ จำนวน 8,629 ต้น และวิเคราะห์ผลหาสาเหตุของความไม่สมบูรณ์ของเสาเข็ม พบว่าความบกพร่องดังกล่าวและรอยร้าวเกิดจากขั้นตอนการขุดดินฐานรากและสกัดหัวเสาเข็มมีสัดส่วนคิดเป็น 2.2%

จากข้อมูลในงานวิจัยข้างต้นทำให้สามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มได้หลายปัจจัย รวมทั้งหาแนวทางในการป้องกันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะจากการขุดดินก่อสร้างฐานราก



ภาพที่ 1 การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะอย่างเป็นระบบเข้าหาบ่อขุดดิน

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะ

ขนาดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่างซึ่งสามารถจำแนกออกได้ดังต่อไปนี้

2.1 ลักษณะชั้นดิน

ดินบริเวณระดับตัดหัวเสาเข็มจะทำหน้าที่บีบรัดเสาเข็มและต้านการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม หากชั้นดินบริเวณหัวเสาเข็มมีลักษณะอ่อนเสาเข็มก็สามารถเคลื่อนตัวได้ง่าย ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นดินที่ตกตะกอนในทะเล (Marine deposit) มีสีเทา มีความหนาโดยประมาณ 12-18 ม. ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากทะเล มีค่า Liquid limit ประมาณ 70-96% โดยที่ปริมาณน้ำในดินเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 60-70% กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าอยู่ระหว่าง 6-20 kPa มีค่าโมดูลัส E_{50} ในช่วง 150-500S_u ซึ่งขึ้นอยู่กับการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ความลึกที่ดินมีกำลังรับแรงและโมดูลัสอิลาสติกต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 6-10 ม.

เนื่องจากระดับตัดหัวเสาเข็มใช้งานทั่วไปจะอยู่ในช่วง 3-15 ม. ซึ่งอยู่ในช่วงดินเหนียวอ่อนพอดี ดังนั้นแรงต้านการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้โอกาสในการเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีค่าสูงตามไปด้วย

2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ

เสาเข็มเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์ขนาดใหญ่กว่าจะมีค่าความแข็ง (Stiffness) มากกว่าตามสมการที่ (1)

$$EI = E\frac{\pi D^4}{64} \quad (1)$$

จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งของเสาเข็มเพิ่มขึ้น เช่น เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 m มีค่า EI = 51,200 $T.m^2$ แต่เสาเข็มขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง

1.0 m มีค่า EI = 124,900 T.m^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าเสาเข็ม 0.8 m ถึง 240% โดยที่ขนาดเสาเข็มเพิ่มขึ้น 25% ดังนั้นการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจึงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับขนาดของเสาเข็มเจาะดังสมการที่ (2)

$$\Delta x = f\left(\frac{M}{EI}\right) \quad (2)$$

จากข้อมูลการเยื้องศูนย์ของเสาเข็มในหลายๆโครงการพบว่าเสาเข็มที่มีการเคลื่อนตัวไปจากตำแหน่งที่ออกมาที่พบบ่อยที่สุดและมีระยะการเคลื่อนตัวมากที่สุดเป็นเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.0 ม. ลงมา

2.3 ความแข็งของกำแพงกันดิน

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีผลต่อดินในส่วนที่ติดกับกำแพงกันดินและมีผลต่อเสาเข็มในบริเวณนั้นโดยตรง จากการเก็บรวบรวมการเคลื่อนตัวกำแพงของ Phienwej et al. [4] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงและความลึกของงานขุดดินดังเสนอไว้ข้างต้น

ความแข็งของกำแพงพิจารณาจาก EI นอกจากนี้ลักษณะของกำแพงยังเป็นตัวกำหนดปริมาณการเคลื่อนตัวและขนาดการเคลื่อนตัวของดินในกำแพงอีกด้วย จากข้อมูลข้างต้นพบว่ากำแพงลักษณะอ่อน (Flexible wall) ได้แก่ กำแพงเข็มพืดเหล็ก (Sheet pile wall) แม้จะสามารถป้องกันการพังทลายของดินได้ แต่การเคลื่อนตัวของดินบริเวณใกล้กำแพงก็มีค่าสูงมากกว่ากำแพงแบบแข็ง (Rigid wall)

2.4 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน

เช่นเดียวกับการเคลื่อนตัวของดินใกล้กับกำแพงกันดิน เสาเข็มที่อยู่ใกล้กับกำแพงย่อมมีการเคลื่อนตัวจากการขุดดินมากกว่า เนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลดินบริเวณใกล้กำแพงมีค่ามากกว่าจึงเกิดแรงผลักมาที่เสาเข็มต้นที่อยู่ใกล้มากกว่าเสาเข็มด้านใน การคำนวณการเคลื่อนตัวของเสาเข็มนั้นจะให้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริงเมื่อใช้วิธีคำนวณโดยโปรแกรม Finite element เพื่อให้สามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มได้

2.5 ความแข็งแรงของระบบค้ำยัน

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจะถูกควบคุมด้วยความแข็งแรงและการจัดวางของระบบค้ำยัน ระบบค้ำยันที่มีความแข็งเช่นการใช้พื้นคอนกรีตเป็นระบบค้ำยันจะทำให้กำแพงมีการเคลื่อนตัวน้อย ดังนั้นเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวสอดคล้องกับกำแพงกันดิน กรณีนี้มักจะพบได้ในกรณีการเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างขุดดินโดยระบบ Bottom-up กับระบบ Top-down โดยทั่วไปการขุดดินด้วยระบบ Top-down จะเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงน้อยกว่าระบบ Bottom-up เนื่องจากความแข็งแรงของระบบค้ำยัน

2.6 เทคนิคการขุดดิน

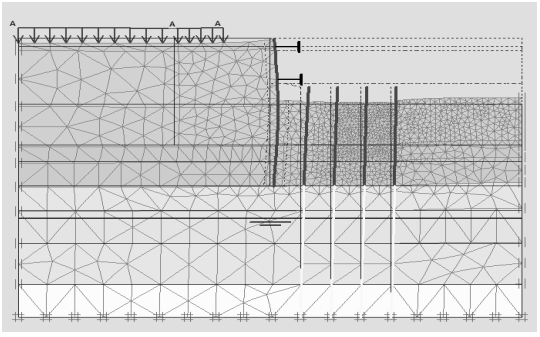
วิธีการขุดดินที่ถูกต้องควรจะต้องขุดดินออกเป็นชั้นๆ ทั่วทั้งบริเวณการก่อสร้าง ไปจนถึงระดับความลึกสุดท้าย การขุดดินด้วยวิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดแรงผลักเฉพาะจุดไปยังเสาเข็มมากนัก แต่ในทางปฏิบัติการขุดดินมักขุดในบริเวณเดียวให้ได้ความลึกมากที่สุดเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการขนดินออก และง่ายต่อการบริหารพื้นที่ทำงาน แต่วิธีการดังกล่าวทำให้ดินในพื้นที่ก่อสร้างมีความสูงไม่เท่ากัน ก่อให้เกิดแรงผลักโดยตรงต่อเสาเข็ม นอกจากนี้โดยทั่วไปเสาเข็มมักมีการหล่อคอนกรีตขึ้นมาเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มประมาณ 1.5-3.0 ม. (Overcast concrete) ซึ่งดินรอบๆหัวเสาเข็มบริเวณนี้สามารถผลักให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวได้ ปัจจัยเรื่องการขุดดินนี้มักเป็นปัจจัยที่ผู้ทำการขุดดินละเลยเนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดในแบบและระยะเวลาในการก่อสร้างที่จำกัดทำให้การขุดดินส่วนใหญ่มักไม่ขุดดินออกเป็นชั้นๆทั่วทั้งพื้นที่

3. การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มด้วย FEM

จากหัวข้อที่ 2 จะเห็นได้ว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวในขั้นตอนการขุดดิน การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite element ในเชิงเปรียบเทียบจะช่วยให้สามารถพิจารณาผลของปัจจัยแต่ละส่วนถึงปริมาณการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะจากการขุดดิน

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มใช้โปรแกรม PLAXIS version 7.1 ทำการจำลองการขุดดินเพื่อหาผลกระทบจากการเคลื่อนตัว ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Plane strain จำลองเสาเข็มด้วยวิธี Equivalent pile สำหรับเสาเข็มภายในพื้นที่ขุดดินซึ่งใช้ค่า EI เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างเสาเข็มและดินกับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม โดยเลือกตัวแปรควบคุมเป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ม. มีกำแพงกันดินเป็น Diaphragm wall หนา 0.8 ม. ลึก -18.0 ม. ความลึกในการขุดดิน -8.0 ม. มีค้ำยันชั่วคราว 2 ชั้น ที่ระดับ -1.0 ม. และ -5.0 ม. เป็นเหล็กรูปพรรณ H 400x400-172

kg/m ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดินเท่ากับ 3.0 ม. c/c ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นดินเหนียวอ่อนความลึก 0-13 ม. จากนั้นเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง ดินเหนียวแข็ง ดินเหนียวแข็งมาก ทรายแน่น ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 2 ได้มีการทดสอบผลของปัจจัยต่างที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงกรณีการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวของปัจจัยต่างๆเทียบกับตัวแปรควบคุม



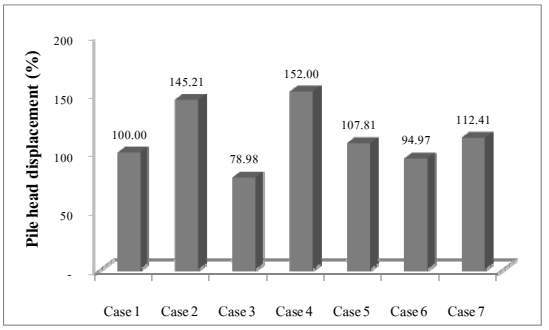
ภาพที่ 2 แบบจำลองการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเนื่องจากการขุดดินในกรณีต่างๆ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มกรณีต่างๆ

Item	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Pile Dia. (m)	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Wall type$_1$	DW	DW	DW	SP	DW	DW	DW
Dist. (m)$_2$	3.0	3.0	3.0	3.0	1.0	3.0	3.0
Bracing$_3$	2L Steel	2L Steel	2L Steel	3L Steel	2L Steel	2L RC	2L Steel
Soil layer$_4$	Soft	Soft	Stiff	Soft	Soft	Soft	Soft
Excavation$_5$	Eq.	Eq.	Eq.	Eq.	Eq.	Eq.	Uneq.
Excavation depth (m)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

Note: 1. ประเภทของกำแพง DW = Diaphragm wall หนา 0.8 m ลึก -18.0 m, SP = Sheet pile wall, type IV ลึก -18.0 m

2. Dist. = ระยะห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงกำแพง (c/c)
3. Bracing: 2L = 2-layer bracing, Steel = H400x400-172 kg/m, RC = Reinforced concrete slab, 0.3 m thk
4. Soil layer: Soft = Bangkok Soil layer, Stiff = Assumed medium to stiff clay layer in top part
5. Excavation: Eq.= การขุดดินเป็นชั้นๆทั้งโครงการ, Uneq. = การขุดดินมีความลึกไม่เท่ากันในพื้นที่ก่อสร้าง โดยมีความลึกต่างกัน > 2 m



ภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มเนื่องจากการขุดดินในกรณีต่างๆ เทียบกับกรณีควบคุม (กรณีที่ 1)

ผลการวิเคราะห์กรณีต่างๆด้วย FEM แสดงผลดังภาพที่ 3 ค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มยึดค่าของกรณีที่ 1 เป็นตัวแปรควบคุม ถือว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเท่ากับ 100% จากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัวจากการขุดดินมากที่สุดคือประเภทของกำแพงกันดิน (กรณีที่ 4) จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของกำแพงจาก Diaphragm wall หนา 0.8 ม. มาเป็นกำแพงเข็มพืดเหล็ก Type IV โดยที่เพิ่มค้ำยันจาก 2 ชั้น มาเป็น 3 ชั้น การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเพิ่มเป็น 152% ซึ่งสอดคล้องกับประจิต (2538) [1] เนื่องจากกำแพงเข็มพืดเหล็กมีลักษณะยืดหยุ่น (Flexible) ทำให้เกิดการแอ่นตัวเมื่อรับแรงดันดิน ส่งผลให้ดินในกำแพงเกิดการเคลื่อนตัวสูงตามกำแพงและเกิดแรงผลักสู่เสาเข็มตามมาด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อเสาเข็มรองลงมาได้แก่ ขนาดของเสาเข็ม (กรณีที่ 2) เนื่องจากความต้านทานการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแปรผันตามขนาดของเสาเข็ม แม้จะรับแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของดินในปริมาณเดียวกันเสาเข็มที่มีขนาดเล็กจะมีความต้านทานการเคลื่อนตัวต่ำกว่าเสาเข็มขนาดใหญ่กว่า ซึ่งการวิเคราะห์นี้มักจะสอดคล้องกับข้อมูลเสาเข็มเคลื่อนตัวในหน่วยงานก่อสร้างที่เสาเข็มขนาดเล็กมักมีการเคลื่อนตัวมากกว่าเสาเข็มขนาดใหญ่

ในกรณีที่การขุดดินไม่ได้ทำการขุดเป็นชั้นๆอย่างทั่วถึงทั้งพื้นที่และมีความแตกต่างของความลึกการขุดดินประมาณ 2 ม. (กรณีที่ 7) จะทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัวประมาณ 112% เมื่อเทียบกับตัวแปรควบคุม เนื่องจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำและมีค่าความไวสูง ทำให้แรงดันของดินสู่เสาเข็มมีค่าสูงตามมาด้วย ประกอบกับเสาเข็มเจาะระบบเปียกทั่วไปจะต้องมีการเทคอนกรีตให้สูงกว่าระดับตัดหัวเสาเข็มใช้งาน เพื่อไล่

คอนกรีตคุณภาพต่ำ ซึ่งคอนกรีตในส่วนนี้จะกลายเป็นพื้นที่ในการรับแรงดันดินเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มหากไม่ขุดดินออกเป็นชั้นๆทั้งโครงการ หากความแตกต่างของดินมีค่ามาก (มากกว่า 2.0 ม.) และมีค่าความชันมาก ดินเหนียวอ่อนอาจเกิดการไหล (Sliding) ซึ่งสามารถส่งผลให้เสาเข็มหักหรือแตกร้าวได้ [5]

ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกำแพงกันดินก็มีผลให้การเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีความแตกต่าง ในกรณีที่ 5 แบบจำลองกำหนดให้เสาเข็มอยู่ห่างจากกำแพง 1.0 ม. ในขณะที่ตัวแปรควบคุมมีระยะห่าง 3.0 ม. ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มที่อยู่ใกล้กว่ามีการเคลื่อนตัว 107% เทียบกับเสาเข็มที่อยู่ห่างจากกำแพง 3.0 ม. เนื่องจากมวลดินติดกำแพงจะส่งแรงให้เสาเข็มโดยตรง ในขณะเสาเข็มที่อยู่ไกลออกไป ดินจะเกิดการเคลื่อนตัวในหลายทิศทางทำให้แรงผลักต่อเสาเข็มที่อยู่ไกลกว่าเกิดขึ้นน้อยกว่า

กรณีที่ 6 ทำการจำลองระบบค้ำยันที่ใช้พื้นหนา 0.3 ม. ซึ่งใช้ในระบบการก่อสร้างขุดดินแบบ Top-down เป็นค้ำยัน เทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งใช้ค้ำยันชั่วคราวเหล็ก จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในกรณีที่ 6 เกิดขึ้น 95% เทียบกับกลุ่มควบคุม เนื่องจากระบบค้ำยันมีความแข็งแรงมากกว่าทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงน้อยกว่า เช่นเดียวกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ระบบค้ำยันที่มีความแข็งและมีจำนวนชั้นมากจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินรวมทั้งการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะด้วย

สำหรับในกรณีที่ 3 ได้จำลองชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางและดินเหนียวแข็ง แทนที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เพื่อจำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะจากการขุดดินในชั้นดินแข็งกว่าในต่างจังหวัด จะเห็นได้ว่าชั้นดินที่แข็งทำให้กำแพงกันดินและเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวจากการขุดดินน้อยลง (79% เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม) สาเหตุจากดินบริเวณหัวเสาเข็มที่มีความแข็งมากกว่าทำหน้าที่บีบรัดเสาเข็มไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัว และดินมีค่าการเคลื่อนตัวน้อยกว่าและยังส่งแรงดันดินไปที่เสาเข็มต่ำกว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ อยู่แล้ว ลักษณะเช่นนี้สามารถประยุกต์ใช้การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ (Soil improvement) บริเวณหัวเสาเข็มเจาะเพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและเสาเข็มเจาะด้วยเช่นกัน ดังเช่น ฉรงค์และคณะ (2550) [6] ใช้การปรับปรุงดินติดกับกำแพงกันดิน Diaphragm wall เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินบริเวณติดกับอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

4. กรณีศึกษาการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากโครงการก่อสร้าง

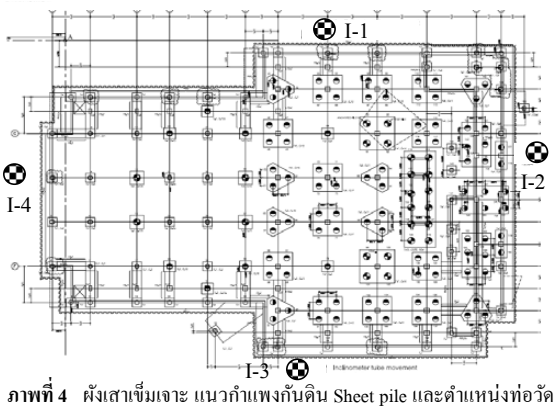
ข้อมูลการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในโครงการก่อสร้างที่เกิดจากการขุดดินมักจะไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัดความเอียง ซึ่งตามปกติจะไม่มีการติดตั้งไว้ในเสาเข็มเจาะ การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะจึงทำได้โดยการเปรียบเทียบทิศทางและขนาดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกับผลการเคลื่อนตัวด้านข้างจากเครื่องมือวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน (Inclinometer) แต่หากไม่มีการวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแล้ว จะต้องพิจารณาทิศทางการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มเทียบกับการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเป็นหลัก โดยใช้หลักในการพิจารณาว่าเสาเข็มนั้นมีการเคลื่อนตัวสอดคล้องหรือเป็นระบบเมื่อเปรียบเทียบกับกำแพงกันดินหรือไม่ โดยหาค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินได้จากการวิเคราะห์ด้วย Finite element และทำการเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินลักษณะเดียวกัน มีความลึกในการขุดดิน ระบบค้ำยัน และสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ในกรณีของการใช้กำแพงกันดินแบบแข็ง เช่น D-wall พบว่าการเยื้องศูนย์ของเสาเข็มเจาะไม่มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน กรณีศึกษาด้านล่างนี้ นำเสนอข้อมูลการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่เป็นระบบตามลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ในชั้นดินกรุงเทพฯ เมื่อใช้กำแพงพืดเหล็ก

กรณีศึกษาโครงการนี้ทำการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8-1.20 ม. จำนวน 183 ต้น มีระดับตัดหัวเสาเข็มอยู่ระหว่าง 8.00 ถึง 10.30 ม. ใช้ระบบป้องกันดินพังเป็นกำแพงพืดเหล็ก type IV มีค้ำยันเหล็กรูปพรรณชั่วคราว 3 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 4 โครงการนี้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดความเอียงของกำแพง (Inclinometer) จำนวน 4 จุด รอบโครงการซึ่งมีค่าการเคลื่อนตัวแสดงในตารางที่ 2 มีเสาเข็มเจาะจำนวน 46 ต้นที่อยู่ติดกับกำแพงกันดิน เป็นเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 ม. 35 ต้น และเป็นขนาด 1.0 ม. จำนวน 11 ต้น

ตารางที่ 2 การเคลื่อนตัวของ Sheet pile จากเครื่องมือวัด Inclinometer

ท่อ Inclinometer	การเคลื่อนตัวด้านข้าง สูงสุด (มม.)	ระดับที่เกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด (ม.)
I-1	150	7.50
I-2	128	8.50
I-3	75	8.00
I-4	159	8.50



ภาพที่ 4 ผังเสาเข็มเจาะ แนวกำแพงกันดิน Sheet pile และตำแหน่งท่อวัดการเคลื่อนตัวของกำแพง

เสาเข็มด้านที่ติดกำแพงเสาเข็มพืดเหล็กในมีทิศทางการเคลื่อนตัวไปในทางเดียวกับกำแพงจำนวน 41 ต้น คิดเป็น 89% จากเสาเข็ม 46 ต้น โดยเสาเข็มขนาด 0.80 ม. มีระยะเยื้องศูนย์ระหว่าง 20-200 มม. และเสาเข็มขนาด 1.0 ม. มีระยะเยื้องศูนย์ระหว่าง 30-70 มม. ซึ่งระยะเยื้องศูนย์ของเสาเข็มนี้สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของกำแพงพืดเหล็กที่อยู่ระหว่าง 75-159 มม. และจะเห็นได้ว่าเสาเข็มขนาดใหญ่มีค่าการเยื้องศูนย์น้อยกว่าเสาเข็มขนาดเล็กกว่า

5. แนวทางการป้องกันหรือการลดผลกระทบจากขุดดิน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเนื่องจากการขุดดินมากที่สุดคือลักษณะของกำแพงกันดิน เมื่อการขุดดินมีความลึกมาก ควรใช้กำแพงกันดินแบบแข็ง เพื่อลดปัญหาการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ บริเวณ พื้นที่ข้างเคียง การทรุดตัวและทำให้การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเกิดขึ้นน้อยมาก ประเด็นที่สอง เสาเข็มบริเวณใกล้กำแพงหากต้องออกแบบให้มีขนาดไม่ใหญ่มาก (ϕ 0.80–1.00 ม.) อาจต้องเตรียมโครงสร้างไว้รองรับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม เช่น คานรัดหัวเสาเข็ม ออกแบบเป็นเสาเข็มกลุ่มเพื่อลดปัญหาจากการรับแรงดัดร่วมกับแรงอัด หรือเสริมความแข็งแรงในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มเจาะ นอกจากนี้การขุดดินควรให้มีการขุดดินออกเป็นชั้นๆ ทั่วทั้งโครงการเพื่อลดปัญหาดินดันหัวเสาเข็มที่เทเกินระดับตัดหัว เสาเข็มควรมีระยะห่างจากกำแพงพอสมควรที่จะลดผลกระทบจากการแอ่นตัวของกำแพงกันดิน หรือหากมีความจำเป็น การใช้การปรับปรุงดินด้านในกำแพงบริเวณหัวเสาเข็มเจาะสามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มเจาะบริเวณใกล้กำแพงกันดินจากการขุดดินได้

6. บทสรุป

เนื่องจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ สามารถไหลหรือเคลื่อนตัวได้ง่าย การขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานรากหรือโครงสร้างใต้ดินจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยรอบด้านที่จะมีผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเจาะ ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุด 2 ปัจจัย ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทาง FEM และจากการเก็บข้อมูลในพื้นที่ก่อสร้างได้แก่ ประเภทของกำแพง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ การเลือกใช้กำแพงกันดินแบบแข็ง ได้แก่ กำแพง Diaphragm wall และกำแพงเสาเข็มเจาะ (Contiguous pile wall) จะช่วยให้การเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการขุดดินเกิดขึ้นน้อยมาก แต่หากงานก่อสร้างมีความจำเป็นต้องใช้กำแพงพืดเหล็ก และเสาเข็มบริเวณติดกำแพงมีขนาดไม่ใหญ่มาก จะต้องทำการขุดดินอย่างระมัดระวัง ระบบค้ำยันควรมีการออกแบบให้ดี และอาจต้องพิจารณาเสริมกำลังรับแรงดัดของเสาเข็มเพื่อป้องกันการแตกหักหรือร้าวด้วย เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นภายหลังจากการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม

7. บรรณานุกรม

[1] ประจิต จิรัปปภา, 2538. กรณีศึกษาการวิบัติของเข็มฐานรากเนื่องจากการโก่งแอ่นตัวด้านข้างของกำแพงเข็มพืดเหล็กมีค้ำยันภายในระหว่างขุดห้องใต้ดิน. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2538 , วสท.

[2] H.G. Poulos and L.T. Chen, 1996. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement. Can. Geotech Journal Vol. 33 , pp 670-677

[3] N. Phienwej and W. Kanoknukulchai, 1989. Excavation induced pile movement & damage- A case history in Bangkok. Piletalk international 1989, Kuala Lumpur.

[4] N. Phienwej, K. Akawanlop, and A.S. Balasubramaniam, 1995. Comparative Evaluation of Ground Movements Associated with Braced - Excavation in Bangkok Soft Clay, 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Beijing, 1995. pp 341-344

[5] N. Thasnanipan, A.W. Maung, P. Tanseng and Z.Z. Aye, 1998. Damage to Piles Associated with Excavation Works in Bangkok Soft Clay, 6th International Conference on Problem of Pile Foundation Engineering, Russia, pp 91-98

[6] ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมืองและ ธยานันท์ บุณยรักษ์, 2550. การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึก, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก

กำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดินกรุงเทพ : ความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นและการป้องกัน

Diaphragm Walls Construction in Bangkok Subsoils: Possible Defects and Their Control.

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และกมล สิงห์โตแก้ว

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

61/141 ถนนพระราม 9 ห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10320

โทร 6439561-72, 2472290-4, โทรสาร 2462177

Home Page: www.seafco.co.th.

E-mail: seafco@seafco.co.th.

บทคัดย่อ

สิ่งก่อสร้างใต้ดินเช่นห้องใต้ดินลึก (Deep Basements) , สถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน (Subway Stations) ฯลฯ ในกรุงเทพฯ ได้รับความนิยมและกำลังทำการก่อสร้างหลายโครงการ ซึ่งสิ่งก่อสร้างใต้ดินเหล่านี้มีระดับดินขุดลึกค่อนข้างมากจากผิวดิน (15.00-30.00 เมตร) โดยกำแพงรับแรงดันของดินจะถูกออกแบบเป็นชนิดขุดเจาะหล่อคอนกรีตในชั้นดิน (Diaphragm Wall) กำแพงชนิดนี้จะทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดินชั่วคราวในระหว่างขุดดินและปรับเปลี่ยนให้เป็นส่วนของโครงสร้างกำแพงถาวรเมื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินแล้วเสร็จ กำแพงที่ออกแบบและก่อสร้างขึ้นมาจึงต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่แตกร้าว, เหมาะสมกับการใช้งาน, ผิวผนังมีความเรียบร้อย, ได้รูปได้แนวตามแบบและรอยต่อของแผงกำแพงสามารถกันน้ำรั่วได้ (Water Tightness) บทความนี้จะกล่าวถึงการควบคุมคุณภาพงานและการป้องกันข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ ในงานก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall ในชั้นดินกรุงเทพฯ

Abstract

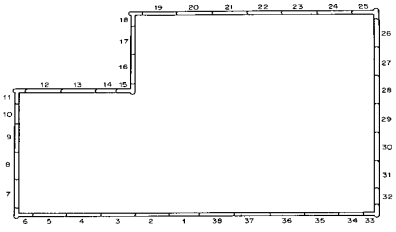
Underground Construction for deep basements like car parks, subway Stations, etc., comes to be found considerably frequently in various projects in Bangkok. Common excavation level for these underground structures is about 15.00 – 30.00 m below ground level. Cast-In-Situ concrete diaphragm walls, a type of earth retaining walls, are designed to be temporary wall during underground construction stage and be modified to be part of permanent structures later. Therefore, these walls should have strength as design, smooth surface and good alignment. Subsequently, the wall's surface and panel joints connections need to be watertight. This paper presents quality control and avoidance of possible wall defects in diaphragm wall construction in Bangkok subsoil.

1. บทนำ (Introduction)

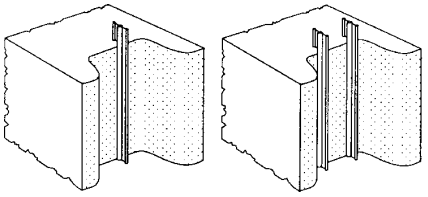
กำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กขุดเจาะหล่อในดิน (Cast-In-Situ Reinforce Concrete Diaphragm Wall) ได้รับความนิยมสำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึก (Deep Basement Construction) ในกรุงเทพฯ มาเป็นเวลากว่า 10 ปีแล้วเพราะกำแพงระบบนี้สามารถออกแบบก่อสร้างห้องใต้ดินได้ลึกมากกว่าการก่อสร้างแบบระบบเก่าที่ใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile Wall) นอกจากนั้นปัญหาความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงในระหว่างการก่อสร้างก็น้อยมากหรือไม่เสียหายเลย แม้ว่าระบบจะดีแต่หากการควบคุมระหว่างก่อสร้างไม่ดี คุณภาพของกำแพงอาจจะมีข้อบกพร่องได้ เนื่องจากบุคลากรขาดประสบการณ์, ขาดความชำนาญงานและไม่เอาใจใส่ในขั้นตอนการก่อสร้างต้องซ่อมแซมในภายหลังทำให้เสียทั้งค่าใช้จ่ายและเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาป้องกันตั้งแต่ในขั้นตอนการก่อสร้างโดยควบคุมงานอย่างใกล้ชิดทุกขั้นตอน

2. กำแพงกันดินแบบขุดเจาะหล่อคอนกรีตในดิน (Cast-In-Situ Reinforced Concrete Diaphragm Wall)

กำแพงกันดินแบบขุดเจาะหล่อในดิน (Diaphragm Wall) จะทำการก่อสร้างเป็นแผง (Panels) ต่อเนื่องติดต่อกันไป (รูปที่ 1) รอยต่อของแต่ละแผง(Joint)สามารถออกแบบใช้ได้หลายชนิด (Xanthakos 1994) การก่อสร้าง Diaphragm Wall ในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยทั่วไปจะเลือกใช้แบบมีแผ่นยางกันน้ำรั่ว (Water Stop) ตรงรอยต่อ (รูปที่ 2)



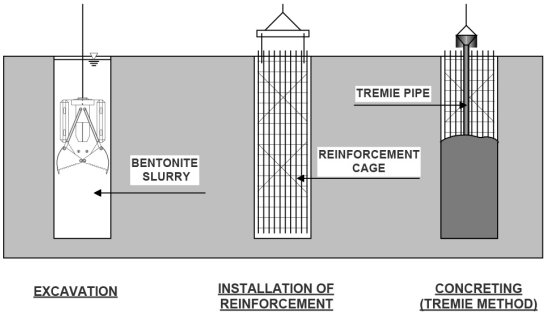
รูปที่ 1 แผนผังของ Diaphragm Wall Panels (Xanthakos, 1994)



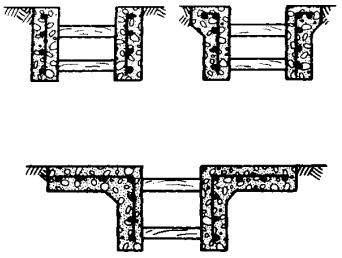
รูปที่ 2 รอยต่อแบบใส่ยางกันน้ำรั่วซึม (Xanthakos, 1994)

3. วิธีการก่อสร้าง (Construction Method)

เนื่องจาก Diaphragm Wall (รูปที่ 3) เป็นการก่อสร้างโดยตรงในชั้นดิน ไม่มีปลอกเหล็กป้องกันดินพัง เหมือนการทำเสาเข็มเจาะจึงต้องทำคานคู่บังคับแนวกำแพงและความตรงดิ่งของหัวเจาะ โดยทั่วไปคานนี้จะมีความลึกประมาณ 1.50-2.00 เมตร (รูปที่ 4) ผนังของ Guide Wall ต้องเรียบและได้แนวดิ่งโดยเอียงจากแนวดิ่งไม่เกิน 1:200



รูปที่ 3 ขั้นตอนการก่อสร้าง Diaphragm Wall



รูปที่ 4 แบบต่างๆ ของ Guide Walls

3.1. การขุดเจาะโดยทั่วไปใช้หัวเจาะแบบ Cable Hang Grab (รูปที่ 5) อาจเป็นแบบ Mechanical หรือHydraulic การเจาะใช้ Grab ขุดดินในร่อง Guide Wall ออกจนถึงระดับใต้ Guide Wall แล้ว จึงเติมสารละลายเบ็นโทไนท์ (Bentonite Slurry) ลงไปในร่องให้ด้านแรงดันของดินมิให้บีบตัวหรือพังเข้ามา การเติมสารละลายต้องให้สูงกว่าระดับใต้ Guide Wall ตลอดเวลา คุณสมบัติของสารละลายที่เติมลงไปต้องมีคุณสมบัติดีพอที่จะต้านแรงดันของดินมิให้บีบตัวหรือพังทะลายเข้ามาในร่องที่เจาะไว้โดยต้องตรวจสอบทุกขั้นตอนคือ (ก) เมื่อผสมใหม่ (ข) ตอนกำลังขุดเจาะ และ (ค) ตอนก่อนเทคอนกรีตโดยเก็บจากก้นหลุมมาทดสอบ



รูปที่ 5 เครื่องมือขุดเจาะ Diaphragm Wall แบบ Cable Hang Grab

3.2. เมื่อเจาะร่องกำแพงได้ความยาวและความลึกที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ต้องทำความสะอาดสารละลายเบ็นโทไนท์ในหลุมเจาะโดยการ Recycle Bentonite Slurry จนกว่าคุณสมบัติของสารละลายที่ก้นหลุมเจาะมาทดสอบ จะได้ตามรายการจึงทำการติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต (Stop End Plates) ที่ปลายร่องขุด (รูปที่ 6ก และ 6ข) จากนั้นทำการหย่อนโครงเหล็กที่ผูกเตรียมล่วงหน้าไว้แล้ว ลงในหลุมเจาะ (รูปที่ 7) หากโครงเหล็กหนักและยาวเกินกว่าที่จะยกได้ในครั้งๆเดียวโดยไม่เกิดการบิดเบี้ยวหรือโค้งงอ ก็อาจผูกเป็น 2-3 ท่อน แล้วต่อที่ปากหลุมเจาะก็ได้ การลงเหล็กเสริมต้องจัดให้ได้ระดับและตรงตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้



รูปที่ 6ก Stop End Plates ก่อนการติดตั้ง



รูปที่ 6ข การติดตั้ง Stop End Plate ที่ปลายร่องขุด



รูปที่ 7 การลงเหล็กเสริม

3.3. หลังจากลงโครงเหล็กเรียบร้อยแล้ว จึงทำการใส่ท่อเทคอนกรีตสำหรับเทคอนกรีตใต้น้ำ (Tremie Concrete) แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายเบ็นโทไนท์จากก้นหลุมมาทดสอบคุณสมบัติให้ได้ตามรายการก่อนทำการเทคอนกรีต หากไม่ได้ตามข้อกำหนดต้อง Recycle เพิ่มเติมจนกว่าคุณสมบัติของสารละลายจะได้ตามรายการ การใส่ท่อเทอาจใส่ท่อเดียวหรือมากกว่าก็ได้ ขึ้นอยู่กับความยาวของร่องที่ขุด โดยทั่วไป หากร่องขุดยาวเกิน 3.50 เมตร ควรจะใส่ 2 ท่อ (รูปที่ 8) เพื่อให้คอนกรีตที่เทลงไปได้คุณภาพสม่ำเสมอ สารละลายเบ็นโทไนท์ที่ถูกแทนที่โดยคอนกรีตจะไหลล้นและถูกดูดไปทำความสะอาดโดย Desander & Desilter Unit (รูปที่ 9) เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำอีก และในระหว่างเทคอนกรีตปลายของท่อเทคอนกรีตจะต้องฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีตไม่น้อยกว่า 1.50 เมตรตลอดเวลา แต่ไม่ควรฝังปลายท่อในคอนกรีตลึกเกินไป (ณรงค์และคณะ, 2542) และต้องควบคุมเวลานับหลังจากทำความสะอาดสารหลุมเจาะแล้วเสร็จจนถึงเริ่มเทคอนกรีตให้สั้นที่สุด Martin (1996) แนะนำอย่าให้เกิน 5 ชั่วโมง



รูปที่ 8 การเทคอนกรีตใต้น้ำ (Tremie concreting)

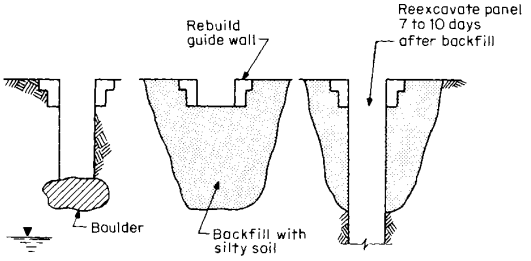


รูปที่ 9 Sand และ Silt ในสารละลายที่ถูกแยกโดย Desander&Desilter unit

4. สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องและไม่เรียบร้อยขึ้นในงาน Diaphragm Wall (Causes of Defects)

4.1. ปัญหาจากชั้นดินและอุปสรรคใต้ดินในหน่วยงานก่อสร้าง

ชั้นดินของกรุงเทพระดับ 20 เมตรแรกส่วนมากจะเป็นชั้นดินเหนียว โดยในระดับ 0-15 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อน ระดับต่ำลงไปเป็นดินเหนียวแข็ง หากมีการควบคุมสารละลายอย่างถูกขั้นตอนแล้วจะไม่พบว่าผนังดินของร่องเจาะเกิดการพังทลาย แต่หากเจาะในชั้นดินทรายหรือกรวดโดยเฉพาะชั้นทรายหลวม อาจมีโอกาสที่ร่องขุดพังเนื่องจากสารละลายซึมหายเข้าไปในดินเร็วทำให้ระดับสารละลายลดต่ำลง (Fluid Loss) หรือในอีกกรณีหนึ่งที่เจาะลงไปแล้ว มีฐานรากเก่าขวางอยู่ เมื่อขุดรื้อออกเป็นบริเวณกว้างและถมดินใหม่ลงไปแทนที่ (รูปที่ 10) ถ้าหากดินที่ถมใหม่ไม่สามารถคงรูปได้ จะมีบางส่วนพังลงมา เมื่อเทคอนกรีต ผนังจะบวมปูดเข้าไปในดินส่วนที่พัง (รูปที่ 11)



รูปที่ 10 วิธีการแก้ปัญหาเมื่อพบสิ่งกีดขวางใต้ร่องขุด (Xanthakos, 1994)



รูปที่ 11 ผนังบวมปูดที่ใต้ระดับ Guide Wall

4.2. ปัญหาอันเนื่องมาจากก่อสร้าง Guide Wall ไม่เหมาะสมเพียงพอ

Guide Wall ที่ออกแบบไว้เป็นแบบมาตรฐาน ไม่สามารถนำไปใช้ได้ทุกหน่วยงาน การกำหนดความลึกและเหล็กเสริมใน Guide wall ขึ้นอยู่กับสภาพดินใต้ระดับ Guide Wall จึงต้องพิจารณาเป็นงานๆไปหาก

ออกแบบ Guide Wall ให้มีความลึกไม่เพียงพอ อาจทำให้ร่องใต้ Guide Wallบิบตัวหรือพังได้หรือที่หล่อไว้แตกหักในระหว่างการขุดเจาะทำให้ผนังที่หล่อผิดแนว ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องทำให้รอยต่อระหว่างแผงไม่สนิท เกิดน้ำรั่วซึมได้ง่ายหรือก่อสร้าง Guide Wall ไว้ไม่ได้ดิ่ง ทำให้ร่องเจาะเอียงตามไม่ได้ดิ่งไปด้วย

4.3. ปัญหาอันเนื่องมาจากการจัดเหล็กเสริม Diaphragm Wall ไม่เหมาะสม

Diaphragm Wall ต้องเทคอนกรีตระบบใต้น้ำ ซึ่งจะไม่สามารถทำให้แน่นหรือไหลโดยวิธีการใช้หัวจี้คอนกรีตได้ แต่คอนกรีตจะไหลไปเองจากปลายท่อเทคอนกรีตด้วย Gravity Action หากเหล็กเสริมมีปริมาณมาก หลังจากจัดวางในตำแหน่งแล้วถี่หรือแน่นจนเกินไป คอนกรีตอาจจะไหลออกไปไม่เต็มร่องขุด ทำให้คอนกรีตไม่หุ้มเหล็กเสริม (รูปที่ 12), กำแพงไม่แข็งแรงและน้ำรั่วซึมได้ง่าย การจัดเหล็กเสริมควรมีระยะห่างของเหล็ก จากผิวถึงผิวของเหล็กเส้นไม่น้อยกว่า 10 ซม. และความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแต่ละด้าน ไม่ควรน้อยกว่า 7.5 ซม.



รูปที่ 12 เหล็กไม่มีคอนกรีตหุ้ม

4.4. ปัญหาอันเนื่องมาจากสารละลายเบ็นโทไนท์

สารละลายเบ็นโทไนท์ที่ผสมใหม่ (Fresh Mixed Slurry) หรือสารละลายที่นำกลับมาใช้ซ้ำ (Reused Slurry) หากควบคุมคุณภาพไม่ดีพอ จะทำให้เกิดปัญหาเช่น ผิวกำแพงดูไม่เรียบร้อย , รอยต่อรั่ว (รูปที่ 13)



รูปที่ 13 รอยต่อกำแพงรั่ว

สารละลายเบ็นโทไนท์ผสมใหม่จะใช้ส่วนผสมของผงเบ็นโทไนท์ประมาณ 3-6 % โดยน้ำหนักของปริมาตรสารละลาย 1 ลูกบาศก์เมตร ในบางกรณีอาจเติมสารเคมีบางชนิด (Chemical Additive) เพิ่มเข้าไป เช่น Caroxymethyl Cellulose, CMC ฯลฯ วัตถุประสงค์หลักของสารละลายเบ็นโทไนท์คือ

ก) ก่อเยื่อบุทึบน้ำบางๆขึ้นที่ผิวของผนังดินร่องขุด (Impermeable Filter Cake) เพื่อไม่ให้น้ำในดินไหลเข้ามาขณะเดียวกันก็ป้องกันไม่ให้สารละลายไหลซึมออกไปโดยง่าย

ข) เพื่อสร้างแรงต้านแรงดันดินไม่ให้ผังร่องขุดบิบตัวหรือพังทลายเข้ามา

ค) เพื่ออุ้มตะกอนเล็กๆที่เกิดจากการขุดเจาะให้ลอยแขวนตัวอยู่ในสารละลายฯได้โดยไม่ตกตะกอนเร็วเกินไป คุณภาพของสารละลายเบ็นโทไนท์ เมื่อนำมาใช้แล้ว คุณภาพจะเสื่อมลง (Contaminated) อันเนื่องมาจากผสมกับตะกอนดินเล็กๆ, ผสมกับน้ำใต้ดิน หรือผสมกับซีเมนต์ในคอนกรีตที่เทลงไป ซึ่งสารละลายที่เสื่อมนี้จะมีผลกระทบทางอ้อมต่อความเรียบร้อยของผนังกำแพงทั้งหมดว่ามีความสมบูรณ์หรือเกิดบกพร่องด้วย

จุดบกพร่องในผนังคอนกรีตส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากปัญหาการควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ไม่ดีพอเพราะละเลยการทดสอบและปรับปรุงคุณภาพของสารละลายเบ็นโทไนท์ให้เป็นไปตามขั้นตอน คุณสมบัติของสารละลายฯจะสามารถทราบได้โดยการทดสอบหาค่า Density, Viscosity, pH Value, Sand Content และ Filter Loss เมื่อใดพบว่าค่าต่างๆ ที่ทดสอบไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด จะต้องปรับปรุงใหม่ หรือเมื่อพบว่าค่าที่ทดสอบได้ต่ำจากมาตรฐานมากๆ ไม่ควรนำมาปรับปรุงใช้อีก ก็ควรทิ้งเสีย Woo et al, (1993) รายงานว่าเมื่อนำสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ผสมใหม่มาใช้ขุดเจาะค่าpH Value โดยเก็บตัวอย่างมาจากที่หลายระดับความลึกของร่องที่ขุดพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยตลอดคือ ประมาณ 8-9 ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากก่อนเติมลงในร่องขุดมากนัก (7.5-9) แต่เมื่อทำการเทคอนกรีตลงในหลุมเจาะเดียวกันนี้ ค่า pH Value เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเพิ่มสูงถึง 12 โดยเฉพาะที่ระดับใกล้ผิวหน้าคอนกรีต สาเหตุมาจากซีเมนต์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตลอยขึ้นมาผสมกับสารละลายเบ็นโทไนท์ซึ่งมีตะกอนดินทราย เล็ก ๆ ลอยแขวนอยู่ นอกจากนั้นยังพบว่าซีเมนต์ได้จับตัวกับสารละลายซึ่งมีตะกอนลอยแขวนทำให้เกิดรวมตัวกันเป็นก้อน (Flocculated of Slurry Mud) เมื่อเทคอนกรีตได้ระดับมากขึ้น การรวมตัวดังกล่าวก็สะสมเพิ่มมากขึ้นทุกขณะบนผิวหน้าของคอนกรีตซึ่งวัดความหนาได้ถึง3.50 เมตร บนผิวหน้าของคอนกรีตส่วนบน

ส่วนสารละลายในระดับบนๆซึ่งอยู่ห่างจากผิวหน้าของคอนกรีตมาก และตะกอนลอยแขวนได้ตกลงทับบนผิวหน้าคอนกรีตด้านล่างเกือบหมดแล้วนั้น ค่า pH และ Viscosity จะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก

และเมื่อเทคอนกรีตจนเหลือระยะอีกเพียง 3 เมตร ก็จะถึงระดับตัดที่ต้องการ สารละลายในส่วนที่เหลืออยู่นี้จะเรียกว่า "Cement Contaminated Zone" ค่า pH, Viscosity และ Density จะเพิ่มขึ้นสูงมาก ทั้งนี้เพราะสารละลายส่วนนี้เคยอยู่ในส่วนที่ลึกๆมาก่อน และถูกดันขึ้นมาเพราะถูกแทนที่โดยคอนกรีตที่เทลงไป ผู้ทำการรวบรวมผลทดสอบครั้งนี้แนะนำว่าสารละลายเบ็นโทไนท์ 3 เมตรสุดท้าย ไม่ควรนำมาปรับปรุงและใช้ซ้ำอีก นอกจากนั้นในการทำงานปริมาณสารละลายเบ็นโทไนท์ที่เตรียมไว้ควรมีปริมาณไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของปริมาณที่ใช้ในการเจาะแต่ละแผง (รูปที่ 14) เพราะหากมีปริมาณน้อยกว่านี้อาจไม่พอหมุนเวียนในการทำความสะอาดสารละลายเพื่อให้มี Sand Content ในสารละลายลดลงไม่เกิน 2% ก่อนทำการเทคอนกรีต



รูปที่ 14 ภาชนะสำหรับเก็บสารละลายควรมีปริมาณไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของปริมาณที่ใช้เจาะ

4.5. ปัญหาจากการเทคอนกรีต

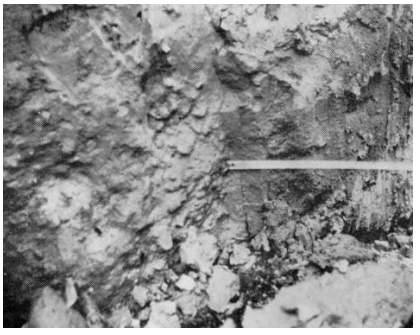
การเทคอนกรีตหล่อผนังให้งานสำเร็จเพื่อใช้เป็นโครงสร้างเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และมีหลายจุดที่จะต้องพิจารณา อันดับแรกจะต้องเลือกคุณภาพของคอนกรีตให้เหมาะสมกับงานเทคอนกรีตใต้น้ำ กล่าวคือต้องเลือกคอนกรีตที่มีการไหล (Flowability) ที่ดี, Slump ที่พอเหมาะอยู่ในช่วงประมาณ 17.5 ซม.-20 ซม., ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ไม่น้อยกว่า 6 ซม., ส่วนผสมของซีเมนต์ (Cement Content) ไม่น้อยกว่า 400 กก.ต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดมวลหยาบไม่ควรเกิน 20 มม. และมวลหยาบอย่าใช้ Flakie Shape นอกเหนือจากนั้นวิธีการเทคอนกรีตผ่านท่อเทคอนกรีตใต้น้ำจะต้องได้รับการตรวจสอบตลอดเวลาที่เทว่าดำเนินการอย่างถูกต้อง จุดที่ควรต้องพิจารณามีหลากหลายประการคือ

4.5.1 การวางตำแหน่งท่อเท (Tremies) หากร่องกำแพงมีความยาวเกิน 3.50 เมตร แต่ไม่เกิน 6.00 เมตร ควรใช้ท่อเท 2 ชุด เพื่อให้คอนกรีตไหลทั่วถึงโดยสม่ำเสมอ ไม่เกิดโพรง

4.5.2 การเทคอนกรีตชุดแรก ต้องระมัดระวังไม่ให้คอนกรีตทะลุผ่าน Plug หากเททะลุ Plug คอนกรีตจะเกิดการแยกตัว (รูปที่ 15) ทำให้กำแพงเกิดการรั่ว, ไม่แข็งแรงและผิวผนังไม่เรียบร้อยขรุขระแลดูน่าเกลียด (รูปที่ 16)

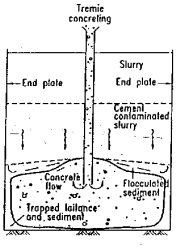


รูปที่ 15 คอนกรีตเกิดการแยกตัว



รูปที่ 16 ผิวผนังขรุขระ

4.5.3 ก่อนเทคอนกรีตต้องทำก้นหลุมให้สะอาดหากมีตะกอนตกค้างที่ก้นหลุม เมื่อเทคอนกรีตชุดแรกลงไปจะผสมกับตะกอน ทำให้คุณภาพคอนกรีตต่ำตะกอนอาจผสมหรือแทรกตัวเข้าในคอนกรีตได้และตะกอนถูกคอนกรีตไล่ไปฝังตัวที่รอยต่อกำแพงตามรูปที่ 17 ทำให้ผิวกำแพงและรอยต่อเกิดความไม่สมบูรณ์น้ำรั่วซึมได้ง่าย



รูปที่ 17 ตะกอนก้นหลุมถูกไล่ไม่หมด (Xanthakos, 1994)

4.5.4 ก่อนเทคอนกรีตต้องทำความสะอาดสารละลายให้ Sand Content ของสารละลายที่เก็บจากก้นหลุมมีปริมาณไม่เกิน 2% หากปริมาณ Sand Content เกิน 2% ที่ผิวกำแพงจะมีเม็ดทรายเกาะขรุขระดูน่า

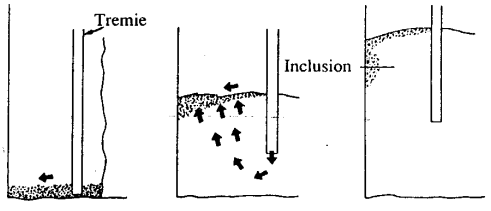
เกลียดและคอนกรีตอาจไล่และแทนที่สารละลายไม่หมดทำให้เกิดโพรงได้ (รูปที่ 18) และทรายฝังตัวในรอยต่อกำแพงน้ำรั่วซึมได้ง่าย



รูปที่ 18 คอนกรีตเป็นโพรง (Puller, 1996)

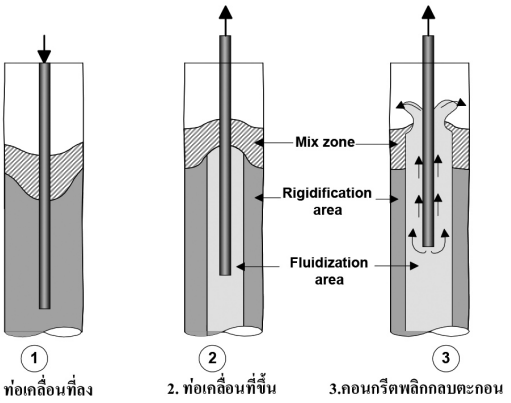
4.5.5 การเทคอนกรีต ควรเทให้สูงกว่าระดับ Cut Off ประมาณ 1.00เมตร เนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถทำให้แน่นด้วยเครื่องจี้ จึงต้องอาศัยน้ำหนักของคอนกรีตส่วนเกินกดทับให้แน่น จากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่าในกรณีที่ Cut Off อยู่สูงใกล้ระดับผิวดิน และเทคอนกรีตเผื่อไว้เพียง 30-40 ซม. เมื่อสกัดถึงระดับ Cut Off Concrete ยังมีสภาพไม่ดีพอ

4.5.6 ในการเทคอนกรีตแผงที่ติดกับแผงที่เทคอนกรีตไว้เรียบร้อยแล้ว (Primary Panel) หากตำแหน่งท่อเทห่างจากรอยต่อกำแพงมาก แรงดันคอนกรีตจากปลายท่อเทอาจครูดตะกอนที่จับตัวติดกับผิวคอนกรีตรอยต่อกำแพงแผง Primary และที่ตกค้างก้นหลุมออกไม่หมดดังแสดงในรูปที่ 19 ทำให้รอยต่อรั่วได้ง่าย ดังนั้นควรจัดตำแหน่งของท่อเทให้เหมาะสมที่จะครูดสิ่งสกปรกออกหมดได้ นอกจากนั้น เมื่อเจาะเสร็จ ควรจะทำความสะอาดรอยต่อของ Primary Panel เพื่อให้สิ่งสกปรกที่รอยต่อหลุดออกไปก่อนด้วย



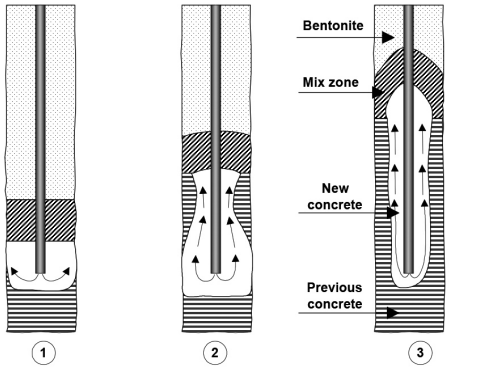
รูปที่ 19 การวางที่อเทคอนกรีตห่างปลายร่องขุดมากเกินไป (Fuchberger, 1994)

4.5.7 ในระหว่างการเทคอนกรีต ต้องให้ปลายท่อเทฝังอยู่ในคอนกรีตตลอดเวลาไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร หากปลายท่อเทยกขึ้นพ้นผิวหน้าจะทำให้คอนกรีตเกิดการไม่ต่อเนื่อง ทำให้มีปัญหาในความมั่นคงแข็งแรง นอกจากนั้น ในระหว่างการเทควรหลีกเลี่ยงการชักท่อขึ้นๆลงๆ (Jaring) เพราะสารละลายอาจแทรกเข้าผสมในคอนกรีต ทำให้หินและซีเมนต์ในคอนกรีตมีโอกาสแยกตัวออกจากกันได้ และทำให้คอนกรีตพลิกกลบตะกอน (รูปที่ 20)



รูปที่ 20 การชักท่อขึ้นๆ ลงๆ ทำให้คอนกรีตกลบตะกอน

4.5.8 ปลายท่อเท (Tremie Pipe) นอกจากต้องควบคุมให้ฝังในเนื้อคอนกรีตตลอดเวลาแล้ว ยังต้องควบคุมไม่ให้ปลายท่อเทฝังตัวในเนื้อคอนกรีตมากเกินไปด้วย ต้องคอยตัดให้สั้นลงเป็นระยะๆ สัมพันธ์กับคอนกรีตที่เทเพิ่มลงไป หากปลายท่อเทฝังในคอนกรีตลึกเกินไปแล้ว คอนกรีตที่ไหลออกจากปลายท่อจะดันขึ้นมาไม่เต็มหน้าตัดหลุมเจาะแต่จะแทรกขึ้นมาตามข้างท่อ (รูปที่ 21) ทำให้คอนกรีตไม่สามารถครูดสารละลายที่จับตัวเป็นก้อนที่ผนังรูเจาะ (Filter Cake) ออกได้ทำให้มี Filter Cake หนาและคอนกรีตไม่หุ้มเหล็ก และการฝังปลายท่อเทลึกเกินไปยังอาจดันให้โครงเหล็กขยับลอยขึ้นได้ด้วยทำให้ตำแหน่ง Dowels ที่ฝังไว้คลาดเคลื่อน



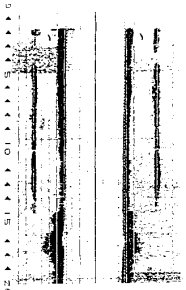
รูปที่ 21 การเทคอนกรีตฝังปลายท่อเทลึกมากไป

4.6. ปัญหาจากการขุดเจาะ

4.6.1. ถึงแม้ว่าจะทำการก่อสร้าง Guide Wall ได้ดีแล้ว หากผู้ควบคุมหัวเจาะไม่ชำนาญเพียงพอ เมื่อเจาะพ้นระดับใต้ Guide Wall แล้วไม่ควบคุมให้ดี ร่องเจาะอาจเบี่ยงเบนจากแนวดิ่งได้ ซึ่งจะมีผลให้ลง

เหล็กเสริมไม่ได้ดี ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กไม่เพียงพอและรอยต่อระหว่างแผงกำแพงไม่สนิท น้ำรั่วซึมได้ง่ายในการก่อสร้างควรทำการตรวจสอบความดิ่งของรูเจาะด้วยเครื่อง Drilling Monitor ทุกแผง (รูปที่ 22)





(ก) Drilling monitoring (ข) Trench Profile

รูปที่ 22 การตรวจความดิ่งของรูเจาะ

4.6.2 การขุดเจาะร่องกำแพงยาวเกินไป โดยทั่วไปร่องที่ขุดเพื่อก่อสร้างกำแพงจะมีความยาว ประมาณ 2.5 ถึง 6.0 เมตร ขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดิน และความเหมาะสมของงาน แต่การขุดร่องกำแพงยาวกว่า 5.0 เมตร จะต้องใช้ความระมัดระวังและมีการควบคุมอย่างใกล้ชิด เพราะร่องขุดอาจมีเสถียรภาพไม่เพียงพอ ดินข้างๆร่องที่ขุดไว้อาจบีบตัวเข้าหากันทำให้เหล็กมีคอนกรีตหุ้มไม่เพียงพอ หรืออาจเกิดการพังทลายของร่องที่กำลังเจาะได้ ดินในกรุงเทพฯ ไม่ควรเจาะยาวเกิน 5.00 เมตร

4.7. ปัญหาจากบุคลากร

จากปัญหาต่างๆที่บรรยายมาแล้วสามารถแก้ไขได้หากบุคลากรผู้เกี่ยวข้องมีประสบการณ์ในงานประเภทดีนี้และมีความตั้งใจในการทำงาน ปัญหาที่พบในการก่อสร้างกำแพงชนิดนี้ในกรุงเทพฯกว่า50% จะเกิดจากบุคลากรโดยเฉพาะกรณีต้องใช้บุคลากรชาวต่างชาติเข้ามาทำงานชนิดนี้แทนคนไทย (เนื่องจากปัจจุบันยังมีบุคลากรชาวไทยที่ชำนาญงานประเภทนี้น้อยไม่พอเพียง) บุคคลต่างชาติเหล่านี้มักจะมาทำงานเฉพาะโครงการช่วงสั้นๆ ระยะเวลาเพียงไม่กี่เดือน เมื่อเข้ามาแล้วมักจะปฏิบัติตนเหมือนมาพักผ่อนมากกว่ามาทำงานและไม่เอาใจใส่งาน จึงทำให้เกิดข้อบกพร่องอย่างที่ไม่น่าจะเกิดเนื่องจากบุคลากรเหล่านี้จะไม่สนใจปัญหาที่จะพบเห็นได้ในภายหลัง เพราะกว่าจะขุดดินเปิดเห็นผิวกำแพงเขาก็จะกลับไปทำงานในประเทศอื่นแล้ว

4.8 จากที่บรรยายมาข้างต้นจะสามารถสรุปถึงสาเหตุที่อาจทำให้งาน Diaphragm Wall เกิดความบกพร่อง ดังที่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปสาเหตุที่อาจทำให้งาน Diaphragm Wall เกิดความบกพร่อง

สาเหตุที่ 1 มาจากการการจัด LAY OUT การทำงานในสนามไม่เหมาะสม

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
1.1 ถังเก็บสารละลายเบนโทไนท์ไม่เพียงพอ	1.1 ทำให้การควบคุมคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากจะทำให้ เบนโทไนท์ที่เสียไม่มีที่เก็บแยกต่างหากและปริมาณไม่พอหมุนเวียนทำความสะอาด
1.2 ปล่อยให้มีเครื่องจักร หรือรถบรรทุกวิ่งใกล้กับร่องขุด	1.2 ทำให้ร่องขุดมีโอกาสพัง
1.3 ร่องขุดยาวเกินไป	1.3 ทำให้ร่องขุดมีโอกาสพัง (ไม่ควรยาวเกิน 5.00 เมตร)
1.4 ร่องขุดสั้นเกินไป	1.4 หัวเจาะติดขัดในหลุมเจาะ

สาเหตุที่ 2 มาจากสภาพชั้นดินที่จะก่อสร้าง

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
2.1 ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำใต้ดิน	2.1 ทำให้การควบคุมสารละลายเบนโทไนท์ไม่ได้ดี เนื่องจากน้ำใต้ดินอาจมีสภาพความเป็นกรดหรือด่าง
2.2. คุณสมบัติ (Sensitivity) ของชั้นดินอ่อนเปลี่ยนแปลงขณะเจาะ	2.2 ทำให้ร่องขุดพังง่าย หรือทำให้ร่องขุดเกิดการบีบตัวแคบลง
2.3 ชั้นทรายหลวม (Loose Sand)	2.3 ทำให้ร่องขุดพังง่าย หรือทำให้ร่องขุดเกิดการบีบตัวแคบลง

สาเหตุที่ 3 มาจากการเตรียมงานไม่ดี

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
3.1 Surcharge มากไปข้างร่องขุด	3.1 จะทำให้ Guide Wall และร่องขุดพังได้ง่าย
3.2 มีแรงสั่นสะเทือนกระทบร่องขุดมากไป	3.2 จะทำให้ Guide Wall และร่องขุดพังได้ง่าย
3.3 มีน้ำผิวดินไหลซึมลงในชั้นดินใกล้ร่องที่ขุด	3.3 จะทำให้ Guide Wall และร่องขุดพังได้ง่าย

สาเหตุที่ 4 การก่อสร้าง Guide Wall ไม่ดีพอ

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
4.1 ความลึกของ Guide Wall ไม่เพียงพอ	4.1 ทำให้ร่องขุดใต้ Guide Wall บีบตัวได้ และร่องขุดอาจพังลง
4.2 Guide Wall สร้างไม่ได้ดิ่ง	4.2 ทำให้ร่องขุดเอียงไม่ได้ดิ่ง และทำให้ลงโครงเหล็กลำบาก
4.3 ดินใต้และหลัง Guide Wall บดอัดไม่แน่นพอ	4.3 ทำให้ Guide Wall พัง หรือบิดเบี้ยวได้ง่าย ทำให้ร่องขุดไม่ตรง, และไม่ได้แนว

สาเหตุที่ 5 มาจากการขุด

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
5.1 ขุดร่องไม่ได้ดิ่ง	5.1 ทำให้ลงโครงเหล็กไม่ได้ และทำให้รอยต่อระหว่างแผงไม่สนิททำให้น้ำรั่ว และกำแพงโย้ไปมาไม่ได้แนว
5.2 ผนังร่องขุดไม่เรียบ, ขรุขระ	5.2 ทำให้ผังคอนกรีตไม่เรียบร้อย และทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กไม่เพียงพอ
5.3 รอยต่อแผงร่องขุดไม่สะอาดพอก่อนเทคอนกรีต	5.3 ทำให้เกิดโพรงที่รอยต่อ และทำให้มีน้ำรั่วที่รอยต่อ

สาเหตุที่ 6 การควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
6.1 ใช้สารละลายเบนโทไนท์ที่สกปรกมากเกินไป (ใช้หลายครั้งเกินไป) มีปริมาณไม่พอหมุนเวียน	6.1 อาจทำให้ร่องขุดบีบตัวหรือพังได้โดยง่าย ผิวผนังไม่เรียบดูน่าเกลียดและน้ำรั่วซึมได้ง่ายทั้งที่ผิวและรอยต่อ
6.2 มีตะกอนของเบนโทไนท์มากเกินไป (Flocculated Sediment)	6.2 ทำให้คุณภาพคอนกรีตที่เทลงไปคุณภาพต่ำ, และตะกอนจะแทรกตัวในเนื้อคอนกรีต, รอยต่อรั่วได้ง่าย
6.3 ตะกอนและปริมาณทรายมาก	6.3 คอนกรีตผสมตะกอน, ผิวกำแพงขรุขระน้ำรั่วซึมได้ง่าย

สาเหตุที่ 7 เกิดจากโครงเหล็กเสริม

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
7.1 ระยะห่างของเหล็กแคบเกินไป	7.1 ทำให้คอนกรีตมีรูพรุน, มีโพรงและคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่พอได้
7.2 โครงเหล็กโค้งตัวขณะยกลง และไม่คืนกลับ	7.2 ทำให้ลงไม่ได้ หรือลงลำบาก, ทำให้คอนกรีตหุ้มบางส่วนของโครงเหล็กไม่เพียงพอ
7.3 แช่โครงเหล็กในร่องเจาะนานเกินไปและสารละลายไม่อยู่นิ่งๆ (Non Agitation)	7.3 ทำให้ตะกอนเกาะติดเหล็ก, ทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง
7.4 วางไม่ได้ระดับตามที่ออกแบบไว้	7.4 ทำให้เหล็ก Dowel ที่เผื่อไว้เชื่อมกับพื้น หรือฐานรากผิดตำแหน่งไป
7.5 Box Out ในโครงเหล็ก	7.5 คอนกรีตผสมกับเบนโทไนท์ได้ง่ายตรงบริเวณที่ Box Out

สาเหตุที่ 8 เกิดจากการเทคอนกรีตใต้น้ำ

สาเหตุ	ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น
8.1 Slump ต่ำเกินไป	8.1 เกิดรูพรุน, เป็นโพรง, หรือ Slime แทรกตัวในคอนกรีตได้
8.2 Slump มากเกินไป	8.2 เกิดการแยกตัวของคอนกรีตขณะเท
8.3 การวางท่อ Tremie ห่างเกินไป	8.3 ทำให้คุณภาพของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ
8.4 การชักท่อ Tremie ขึ้น-ลงบ่อย ๆ	8.4 มีโอกาสทำให้เบนโทไนท์แทรกตัวฝังในเนื้อคอนกรีต
8.5 การวางท่อ Tremie ห่างรอยต่อแผงมากเกินไป	8.5 ทำให้คอนกรีตไม่สามารถครูดสิ่งสกปรกบริเวณรอยต่อแผงออกหมดทำให้รอยต่อรั่ว
8.6 การยกท่อ Tremie พ้นระดับคอนกรีต	8.6 ทำให้คอนกรีตขาดตอน
8.7 เทคอนกรีตดันแรกทะลุโฟม (Plug)	8.7 ทำให้คอนกรีตพรุน, เป็นโพรง, แยกตัวผสมกับสารละลายและตะกอน, ท่อเทคอนกรีตอาจอุดตันได้ (Blockage)
8.8 ฝังปลายท่อเทลึกเกินไป	8.8 คอนกรีตไม่สามารถครูด Filter Cake ออกทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กไม่พอและผนังกำแพงขรุขระ, รั่วซึม

5. บทสรุป

กำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กขุดเจาะหล่อในดิน (Cast-In-Situ Reinforce Concrete Diaphragm Wall) วัตถุประสงค์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวขณะก่อสร้างห้องใต้ดิน และส่วนใหญ่จะออกแบบให้ปรับเปลี่ยนให้เป็นส่วนของโครงสร้างถาวรหลังการก่อสร้างห้องใต้ดินเสร็จแล้ว จึงต้องเป็นกำแพงที่มีความแข็งแรง, มีความเรียบร้อยและสามารถป้องกันน้ำใต้ดินรั่วเข้ามาด้วย

การก่อสร้างผนังชนิดนี้ให้มีความสมบูรณ์เรียบร้อย สามารถทำได้โดยไม่ยากหากมีการเตรียมการที่ดีตั้งแต่ต้น เช่นออกแบบให้เหมาะสม, มีข้อมูลชั้นดินที่เพียงพอ, จัดเครื่องมือและอุปกรณ์ให้เหมาะกับงานและจัดทีมงานที่มีประสบการณ์และชำนาญเพียงพอ หากไม่เอาใจใส่และไม่ควบคุมและก่อสร้างตามขั้นตอนก็จะเกิดข้อบกพร่องได้อันจะเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมในภายหลัง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ร่วมงานบริษัท ซีฟโก้ จำกัดทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการพิมพ์และจัดเรียงหน้าสำหรับบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Construction Industry Research and Information Association (1995), Water─Resisting Basement Construction-A Guide, CIRIA Report 139, Thomas Telford.

2. Fleming, W.G.K., Sliwinski, Z. J. (1977, Reprinted 1991), The Use and Influence of Bentonite in Bored Pile Construction, CIRIA Report PG.3
3. Fuchberger. M. (1994), Improvement in Diaphragm Wall Execution-Possible Defects and Their Control, XIII ICSMFE. New Delhi, India, Volume 5 pp. 315-316
4. Hutchinson, M. T., Daw, G. P., Shotton, P.G., and James, A. N. (1974), The Properties of Bentonite Slurries used in Diaphragm Walling and Their Control. Diaphragm Wall and Anchorage. ICE, London. pp 33-39.
5. Martin, W. S. (1996), Site Guide to Foundation Construction, CIRIA Special Publication 136.
6. Puller M. (1996), Deep Excavations; a practical manual, Thomas Telford.
7. Sliwinski, Z. J. and Fleming, W. G. K. (1974), Principle Considerations Affecting the Construction of Diaphragm Walls & Anchorages. ICE. London. Pp. 1-10.
8. Teparaksa W., Thasananipan N., Muang A., and Wei S. (1998): Prediction and performances of short embeded cast in-situ diaphragm wall for deep excavation in Bangkok subsoils, Proc. 4th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, USA.
9. Thasnanipan, N., Maung A. W., Tanseng P. and Wei S. H. (1998). Performance of a braced excavation in Bangkok clay, diaphragm wall subject to unbalanced loading conditions. Thirteenth Southeast Asian Geotechnical Conference, 16-20 November,1998, Taipei, Taiwan. pp. 655-660.
10. The Institution of Civil Engineers. (1996), Specification for Piling and Embedded Retaining Walls. Thomas Telford, pp. 65-74.
11. Woo, S. M., Lee, K. S. and Hsieh, K. J. (1993), The Caused of Cast-In-Situ Diaphragm Wall Defects, Eleventh Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore. Pp.793-798
12. Xanthakos. P. P. (1994), Slurry Walls as Structural Systems, McGraw-Hill INC.
13. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ กมล สิงห์โตแก้ว (2539), การก่อสร้างกำแพงไดอะแฟรมวอลล์และเสาเข็มเจาะโครงการสาธรคอมเพล็กซ์, การบรรยายทางวิศวกรรมและทัศนศึกษา เรื่องการก่อห้องใต้ดินลึกด้วยกำแพงไดอะแฟรมวอลล์สั้นมากในกรุงเทพ, จัดโดย วสท. ณ. โรงแรมสุโขทัย
14. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์ (2542), สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพ, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2542, จัดโดย วสท.

บทเรียนจากการวิบัติของบ่อบำบัดน้ำเสียยานนาวา

Lessons from the collapse of Yannawa Inlet Pumping Station

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1]

[1] *บริษัท ซีฟโก้ จำกัด*

บทคัดย่อ: เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2540 ได้เกิดการวิบัติของบ่อบำบัดน้ำเสียยานนาวา ผลของการวิบัติทำให้ผนังบ่อชนิดขุดและหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กในดิน (Cast-In-Situ R.C. Diaphragm Wall) หนา 1.00 ม. ด้านตะวันตกพังล้มคว่ำเข้าหาตัวบ่อและดินอ่อนได้ไหลพาเอาบ้านเรือนข้างเคียงพร้อมรถปั้นจั่น (Crane) ขนาด 40 ตันที่ขอบบ่อไหลลงกลบทับรถขุดสองคันที่จอดอยู่ก้นบ่อ การวิบัติครั้งนี้ไม่มีผู้ใดถึงแก่ชีวิต เนื่องจากก่อนการวิบัติได้มีเสียงลั่นจากระบบค้ำยันอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไม่มีผู้ใดลงไปทำงานในบ่อ บทความนี้กล่าวย้อนให้เห็นถึงเหตุการณ์หลายอย่างที่ถูกพบเห็นก่อนบ่อจะวิบัติเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวินิจฉัยให้มีความสมบูรณ์และเกิดจิตสำนึกเป็นบทเรียนไว้ป้องกันปัญหาในอนาคตดังที่ เอกสิทธิ์ (2536) ได้เคยเสนอว่าถึงเวลาแล้วที่วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องจะต้องเรียนรู้จากความวิบัติต่างๆ มาวินิจฉัยแล้วให้เกิดเป็นแนวทางป้องกันและแก้ไขที่ถูกจุด บทความนี้ยังได้รายงานถึงผลการวิเคราะห์ถึงชนวนเป็นสาเหตุของการวิบัติในครั้งนี้ไว้ด้วย

ABSTRACT: On 17 th August 1997, An Inlet Pumping Station of Yannawa Waste Water Plant collapsed. Results of the caused western part of the diaphragm wall 1.00 m. in thickness broken and fell down into the pit. Also,soil mass caved in and several adjacent wooden houses and one 40 tons crawler crane standing next to the pit slipped down. The soil mass slided and buried the collapsed wall and two backhoes used for excavation in the pit. No human casualties in the incident were reported as loud noise from bracing system prior to the collapse alarmed people not to work. This paper reports the occurances which were discovered before the collapse, which can be useful information for preventing the similar incident or calamity happening in the future. Ekasit (1993) suggested that now, it is the time for all engineers and involved parties to learn and analyze all the past collapse in order to find out proper prevention in the future. In addition, this report presents the results of investigation on the collapse.

KEYWORDS: Soil Excavation, Temporary Bracing and Soil Instrumentation

---

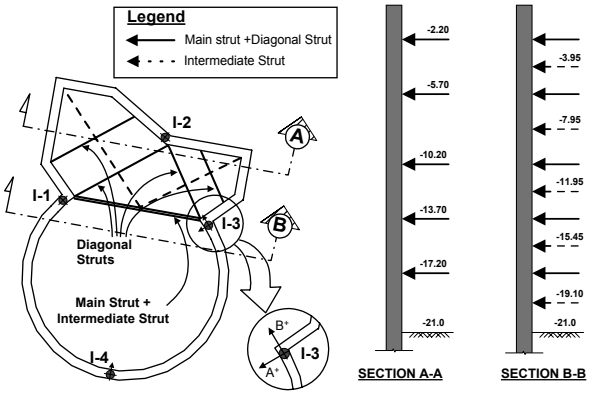
For further details, contact *Mr. Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd. 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangkok 10510,Thailand.*

1. บทนำ

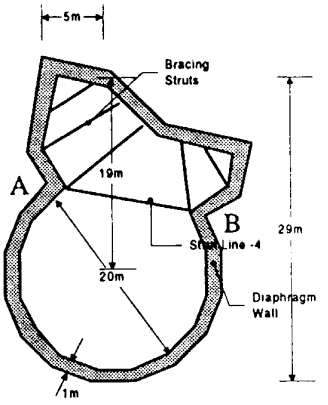
โรงบำบัดน้ำเสียยานนาวาตั้งอยู่ระหว่างถนนพระรามที่ 3 กับแม่น้ำเจ้าพระยา โครงการนี้เป็น Turnkey Project ที่ผู้รับเหมาหลักจะเป็นผู้ออกแบบและก่อสร้าง (Design & Build Contract) ในงานก่อสร้างบ่อ Inlet Pumpings Stations (IPS) นี้ ผู้รับเหมาหลักได้แยกว่าจ้างผู้รับเหมาช่วงก่อสร้างกำแพงผนังบ่อชนิดขุด และหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กในดิน (Deaphragm Wall) และติดตั้ง Inclinometers จำนวน 4 จุด เป็นรายแรก และผู้รับเหมาช่วงงานขุดดินและติดตั้งระบบค้ำยันชั่วคราวภายในบ่อ (Sail Excavation & Installation of Temporaly Bracing System) เป็นรายที่สองและการวิบัติเกิดในขั้นตอนการก่อสร้างของผู้รับเหมาช่วงรายที่สองนี้ จากผลการวิบัติของบ่อได้มีดินอ่อนและบ้านเรือนข้างเคียงไหลกลบหลักฐานและข้อมูลในบ่อจนหมดสิ้น หลังการวิบัติได้มีการประชุมร่วมผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายเพื่อหาสาเหตุจากผู้อยู่ใกล้กับเหตุการณ์วิบัตินี้ ได้มีรายงานจากผู้กำลังทำงานในขณะนั้นให้ที่ประชุมทราบเป็นข้อมูลเบื้องต้นว่า บ่อบำบัดเกิดการวิบัติในขณะที่มีการติดตั้งค้ำยันชั่วคราวและขุดดินภายในอย่างเป็นขั้นตอนลงไปได้ความลึก 18.00 เมตร และขณะเกิดวิบัติได้เห็นว่าปลายกำแพงบ่อ (Toe) ได้เคลื่อนตัวเข้ามาก่อน และส่วนอื่น ๆ เกิดการวิบัติตามมา แต่ต่อมาผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายพบว่ารายงานดังกล่าวขัดแย้งกับภาพถ่ายเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2540 ซึ่งในภาพแสดงให้เห็นว่ามีการขุดดินลงไปถึงระดับสุดท้าย คือ 22.00 เมตร แล้ว แต่ติดตั้งค้ำยันชั่วคราวน้อยกว่าแบบไปจำนวน 3 ระดับ บทความนี้จะนำเสนอข้อมูลย้อนหลังที่เกิดขึ้นก่อนการวิบัติซึ่งคาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องกับงานขุดและติดตั้งค้ำยันที่สามารถนำข้อมูลนี้ไปวินิจฉัยให้เกิดจิตสำนึกและเป็นอุทาหรณ์จนสามารถใช้ป้องกันปัญหาในอนาคตได้ นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวยังอาจเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะเกี่ยวข้องกับโครงการในลักษณะ Design & Build Contract ที่ควรตระหนักถึงจุดอ่อนของงานประเภทนี้ ดังที่ Wood (1998) ซึ่งเป็นนักนิติวิศวกร (Forensic Engineer) ได้กล่าวจากประสบการณ์ 35 ปี ในการสืบสวนการวิบัติของงานด้านวิศวกรรมว่ามีการวิบัติจำนวนมากถูกพบในโครงการก่อสร้างระบบ Design & Build Contract อันเนื่องมาจากผู้รับผิดชอบงานได้รับการฝึกหรือมีประสบการณ์ที่ไม่พอเพียงต่อการทำงานทั้งออกแบบและก่อสร้างควบคู่กันไป

2. รายละเอียดเกี่ยวกับงานบ่อ IPS

บ่อบำบัด IPS ออกแบบโดยบริษัทออกแบบจากประเทศอังกฤษ บ่อได้แบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วนคือ Inlet Chamber ใช้กำแพงกันดินรูปเส้นตรง และ Pumping Chamber ใช้กำแพงกันดินรูปโค้งของส่วนวงกลมพื้นที่ผ่าศูนย์กลาง 20.30 เมตร และระดับขุดลึก 20.20 เมตร ผนังกำแพงบ่อใช้ Diaphragm Wall คอนกรีตเสริมเหล็กหนา 1.00 เมตรลึกประมาณ 25 เมตรจากระดับดิน ผู้ออกแบบได้กำหนดค้ำยันหลัก 5 ชั้นยันในส่วน Inlet Pumping Chamber ซึ่งเป็นแนวกำแพงเส้นตรงและให้ใส่ค้ำยันรอง (Intermediate Strut) อีก 5 ชั้นตรงรอยต่อกำแพงส่วนโค้งบรรจบกับกำแพงส่วนตรงดังรูปที่ 1 และติดตั้ง Inclinometer 4 จุดในผนังเพื่อใช้วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงขณะขุดดินภายในบ่อ ในการก่อสร้างระบบค้ำยันจริงมีการลดคานยึดโยง (Lacing Beam) ซึ่งออกแบบไว้สำหรับยึดโยงโครงคานขวางและ King Post ไม่ให้เกิดการแกว่งไกว (Sway) ในแนวระนาบตามที่แสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 1 ออก เหลือตามเส้นประในรูปที่ 2 ซึ่งทำให้คานขวางตามแนว I-1 ถึง I-3 มี (A ─ B) Effective Length ในแนวระนาบยาวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของที่ออกแบบไว้



รูปที่ 1 แบบค้ำยันชั่วคราว (การออกแบบในครั้งแรก)



รูปที่ 2 แบบค้ำยันชั่วคราว (ที่ก่อสร้างจริง)

3. ความเสี่ยงในงานขุดดินโดยระบบค้ำยันและเหตุที่อาจทำให้เกิดวิบัติ

เป็นที่ยอมรับกันว่างานขุดดินเป็นงานที่มีความเสี่ยงภัยสูงอยู่ในตัวเอง ในประเทศอังกฤษซึ่งการก่อสร้างมีการพัฒนาไปไกลกว่าประเทศไทยมากก็ยังมีผู้บาดเจ็บและเสียชีวิตอันเนื่องจากงานขุดพังทลายค่อนข้างมาก มีรายงานของ Irvine และคณะ (1992.) ซึ่งทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะการวิบัติของงานขุดเฉพาะที่รุนแรงตั้งแต่ปี 1973 - 1980 พบว่าสาเหตุเกิดจากระบบค้ำยันแข็งแรงไม่เพียงพอหรือจากการขุดดินเร็วเกินไปจนติดตั้งค้ำยันไม่ทันคิดเป็น 12% และ 20% ของจำนวนที่เกิดการวิบัติอย่างรุนแรง ได้มีผู้เขียนบทความเตือนถึงอันตรายและกล่าวถึงสาเหตุที่อาจทำให้งานขุดค้ำยันเกิดการวิบัติได้ไว้เตือนผู้เกี่ยวข้องกับงานขุด-ค้ำยันได้รู้ และเกิดจิตสำนึก และระมัดระวังในการทำงานให้มากขึ้นซึ่งบทความนี้ได้รวบรวมโดยย่อไว้ดังนี้

นพดล เพียรเวช (2534 และ 2539) รายงานไว้ว่างานขุดในชั้นดินอ่อนเป็นงานที่ยากและมีความเสี่ยงเพื่อให้กำแพงกันดินมีเสถียรภาพการติดตั้งค้ำยันต้องดำเนินการให้ถูกต้องตามขั้นตอนของการขุดดิน มิใช่ขุดดินให้ลึกลงไปก่อนทีเดียวมาก ๆ แล้วจึงค่อยกลับมาติดตั้งค้ำยันทีละหลายๆชั้นพร้อมกัน การทำงานประเภทนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเฝ้าตรวจสอบและตรวจวัดพฤติกรรมของดินอย่างเป็นระบบซึ่งจะเป็นเครื่องเตือนภัยและลดการวิบัติได้อย่างมาก มีการวิบัติของบ่อขุดในหลายกรณีเนื่องจากมีการนำพื้นที่ข้างบ่อขุดไปใช้กองดินที่ขุดขึ้นมาหรือเกิดจากที่มีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ทำงานที่ข้างบ่อขุดโดยไม่ได้คำนวณเผื่อไว้ก่อน

สุรฉัตร (2540) ให้ความเห็นว่าการขุดดินโดยใช้ Retaining Structure ไม่ว่าชนิดใดเป็นปัญหาที่คำนวณให้ถูกต้องได้ยากเพราะแรงดันดินขึ้นอยู่กับการเคลื่อนตัว ซึ่งวิธีการก่อสร้างมีผลกระทบมากการทำงานจึงต้องเห็นความสำคัญของเรื่อง Soil Instrumentation ในการวัดการเคลื่อนตัวของ Retaining Structure การถูกละเลยในเรื่องนี้อาจทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นได้

-มนูญ (2540) เห็นว่าการพังทลายของกำแพงกันดินส่วนใหญ่มักจะเกิดจากการละเลยไม่ตรวจวัดการเคลื่อนตัวหรือตรวจวัดแล้วก็ละเลยที่จะพิจารณาแก้ไข (โดยคิดว่าไม่เป็นอะไร) ก็จะพบกับการพลังทลายต่อมา

-Puller (1996) กล่าวว่าการวิบัติของกำแพงกันดินไม่จำเป็นต้องเกิดจากการวิบัติของโครงสร้างกำแพงเอง แต่การวิบัติมักจะเกิดจากการเอาเครื่องจักรมาทำงานข้างบ่อขุดซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักลงในชั้นดิน หรืออาจเกิดจากโครงสร้างชั่วคราว เช่น ระบบค้ำยันก่อสร้างไว้คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานไม่สามารถรับแรงดันของดินได้

-William & Waite (1993) รายงานว่าการวิบัติของงานขุดแบบมีค้ำยันมักมาจากการควบคุมระดับขุดดินแต่ละชั้นไม่เป็นไปตามขั้นตอนตามที่ออกแบบไว้ หรือระบบค้ำยันก่อสร้างไว้มีความแข็งแรงไม่พอเพียง

-Lamb & Whitman (1993) แนะนำว่าระบบค้ำยันเหล็กรูปพรรณโดยทั่วไปที่ออกแบบให้รับแรงอัดในแนวแกน ซึ่งความสามารถการรับแรงอัดในแนวแกนมีลักษณะเปราะบาง (Brittle) ต่อการวิบัติเมื่อค้ำยันเหล็กเกิดการโก่งงอ ดังนั้นไม่ควรออกแบบโดยวิธี Limit State Design เพราะหากส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบค้ำยันเกิดการโก่งงอแล้วจะไม่สามารถรับแรงอัดได้เลยและจะทำให้ค้ำยันทั้งระบบอยู่ในสภาวะอันตรายต่อการวิบัติได้โดยง่าย

4. เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและถูกพบเห็นก่อนการวิบัติ

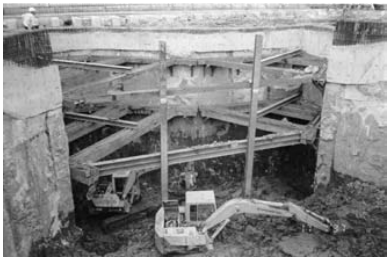
ระหว่างผู้รับเหมาช่วงขุดดินและติดตั้งค้ำยันชั่วคราวอยู่นั้น ได้มีเหตุการณ์สำคัญบางอย่างเกิดขึ้นและมีรายงานถึงผู้เกี่ยวข้องแล้ว แต่ไม่ได้รับการแก้ไขอย่างทันท่วงที หากไม่กล่าวไว้อาจทำให้การวินิจฉัยขาดความสมบูรณ์ได้ เหตุการณ์ดังกล่าวประกอบด้วย

4.1. เกิดความเสียหายต่อ Inclinometers ตำแหน่งที่ I-1 และ I-2 (รูปที่ 1) ขณะก่อสร้าง Capping Beam ทำให้ 2 จุดดังกล่าวซึ่งเป็นระบบเตือนภัยไม่สามารถวัดความเคลื่อนตัวของกำแพงได้

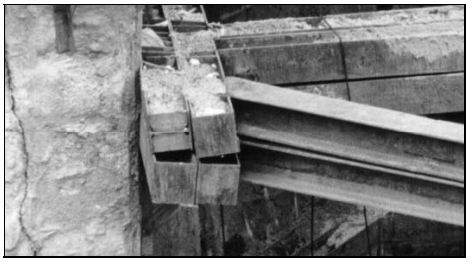
4.2. เกิด Crack ใน Capping Beam ที่หล่อคอนกรีตไว้มีขนาดความสูงสองในสามของแบบ จุดแตกร้าวได้เกิดตรงจุดที่กำแพงส่วนโค้งบรรจบกับกำแพงส่วนเส้นตรง (ตรงจุด I-1 และ I-3)

4.3. มีการขุดดินเกินระดับลงไปมาก และใส่ค้ำยันไม่ทันตั้งแต่เริ่มงานขุดในระยะแรก ๆ และ Walling Beam ติดตั้งไว้ขาดความต่อเนื่องและไม่แนบสนิทกับผิว (รูปที่3)

4.4. Walling Beam และ Strut ซึ่งเป็นคานประกอบด้วยคานเหล็กหลายชิ้นประกอบเข้าด้วยกันไว้แต่ไม่แน่นหนาพอ ทำให้เกิดการปริแยกออกจากกันในบางตำแหน่ง (รูปที่ 4)



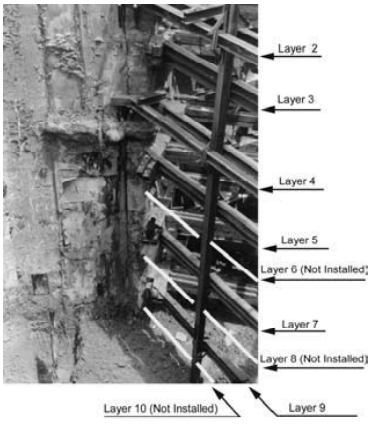
รูปที่ 3 ติดตั้งค้ำยันไม่ครบตามแบบ



รูปที่ 4 คานประกอบค้ำยันเกิดการแยกตัว



รูปที่ 5 ขุดดินผิดขั้นตอน (ณรงค์, 2540)



รูปที่ 6 ภาพถ่ายก่อนการวิบัติ 1 วัน (Teparaksa et al, 1999)

4.5. มีการขุดดินผิดขั้นตอนมาโดยตลอด กล่าวคือควรขุดใน Inlet Chamber ให้ลึกกว่า Pumping Chamber ประมาณ 2.00 เมตร ก่อนเพื่อทำการติดตั้งค้ำยันก่อน แล้วจึงขุด Pumping ตามที่หลัง แต่ในการปฏิบัติจริงกลับขุด Pumping Chamber ลึกกว่า Inlet Chamber (รูปที่ 5) อันทำให้เกิด Hoop Compression ก่อนใส่ค้ำยัน

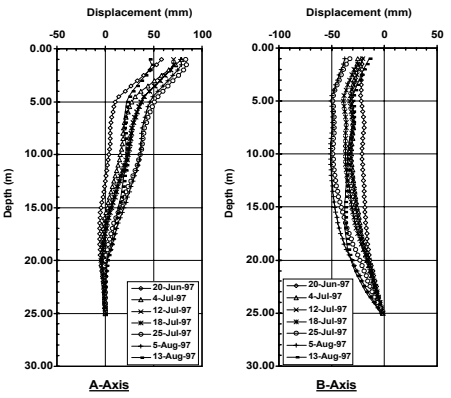
4.6. เมื่อขุดถึงระดับสุดท้าย (22.00 เมตร) เมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2540 ก่อนวิบัติหนึ่งวัน คานค้ำยันรองยังขาดอยู่สามระดับคือระดับที่ 6, 8 และ 10 (รูปที่ 6)

4.7. มีการนำเอารถเครนขนาด 40 ตันยืนทำงานข้างบ่อขุดตรงตำแหน่ง Inclinometer I-1 และมีการย้ายกองดินขุดจากก้นบ่อในวันที่ 16 สิงหาคม 2540 ขึ้นมากองไว้ข้างบ่อด้านทิศตะวันตก

5. ลักษณะการเคลื่อนตัวและการวิบัติ

ผู้รับเหมาช่วงงานกำแพงกันดินได้ก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall และติดตั้ง Inclinometer จำนวน 4 จุด แล้วเสร็จเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2540 ขณะส่งมอบงานผู้รับเหมางานกำแพงได้แจ้งผู้ที่จะรับงานขั้นตอนต่อไปให้ความสำคัญต่อการรักษาและตรวจวัด Inclinometers และระบบค้ำยันต้องแข็งแรงเพียงพอ และต้องติดตั้งให้สัมพันธ์กับขั้นตอนการขุดดิน ซึ่งงานขุดดินและติดตั้งค้ำยันชั่วคราวผู้รับเหมาหลักได้ว่าจ้างผู้รับเหมาช่วงรายอื่นเป็นผู้ดำเนินการส่วนการดูแลInclinometers, วัดค่าความเคลื่อนตัวและการก่อสร้างโครงสร้างถาวรอื่น ๆ รวม Capping Beam ดำเนินการโดยผู้รับเหมาหลัก งานขุดดินค้ำยันเริ่มเมื่อกลางเดือนกรกฎาคม 2540 โดยได้นำรถขุดลงไปขุดภายในบ่อและขนย้ายดินที่ขุดและใช้รถเครนซึ่งจอดอยู่ด้านบนข้างบ่อขุดบริเวณ Inclinometer I-1 ยกดินขึ้นมาทีละกระบะ การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงสามารถทำได้เพียงสองตำแหน่งเท่านั้นคือ จาก I-3 และ I-4 พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงในแนว A-axis ของ I-3 แสดงให้เห็นว่ากำแพงเคลื่อนตัวในลักษณะ Cantilever/Unsupported Condition ในขณะที่การเคลื่อนตัวในแนว B-axis แสดงให้เห็นว่ากำแพงมีลักษณะถูกค้ำยันไว้ (Supported) รูปที่ 7

อย่างไรก็ตามจากการวัดพบว่าการเคลื่อนตัวในแนว A-axis นี้ถือว่ามาก และด้วยเหตุนี้ทำให้ดูเหมือนว่าคานค้ำยันเหล็กแนว I-1 ถึง I-3 ที่ค้ำยันปลายเปิดของกำแพงส่วนโค้งค้ำยันไม่ได้ผลเต็มที่ และการที่มีการเคลื่อนตัวสองลักษณะแตกต่างกันที่มุมของกำแพงเส้นตรงบรรจบกับกำแพงส่วนโค้งแสดงว่าค้ำยันหลักที่ยันกำแพงเส้นตรงฝั่งทิศตะวันออกค้ำยันกำแพงได้ดี เพราะ Effective Length สั้น ส่วนคานที่ค้ำยันปลายระหว่างปลายเปิด (จากจุด I-1 ถึง I-3) อาจเกิดการโก่งงอเมื่อรับแรงอัด เพราะไม่มีคานซอยยึดโยงแนวระนาบมี Effective Length ยาวเป็น 2 เท่าของที่ออกแบบไว้เดิม การที่เกิดการเคลื่อนตัวต่างกันสองลักษณะนี้จะทำให้เกิด Torsional Stress ใน Capping Beam ตรงจุด A และ B ซึ่งพบข้อสนับสนุนจากรอยแตกร้าวใน Capping Beam ที่สองจุดดังกล่าวจริง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวที่วัดจาก I-4 มีค่าสูงสุดเพียง 14 มม. การเคลื่อนตัวของปลายกำแพง (Toe) ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจาก Inclinometer ไม่ได้ฝังต่อจากปลายกำแพงลงไปในดิน

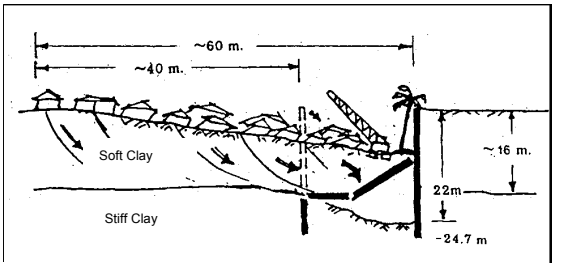


รูปที่ 7 การเคลื่อนตัวของกำแพงบ่อที่อ่านได้จาก Inclinometer I-3 (Teparaksa et al, 1999)

หลังจากที่เกิดรอยร้าวใน Capping Beam ตรงจุด A และ B ได้มีการแนะนำให้เร่งติดตั้งค้ำยันรองส่วนที่ยังไม่ได้ใส่ไว้เพื่อค้ำตรงมุมของกำแพงส่วนเส้นตรงบรรจบกันกับกำแพงส่วนโค้งให้แล้วเสร็จโดยเร็ว แต่ติดตั้งไม่ทันจนเกิดรอยร้าวใน Capping Beam เพิ่มขึ้นและมีเสียงลั่นเตือนมาจากระบบค้ำยัน ในขณะนั้นระดับดินในบ่อกำแพงส่วนโค้งได้ถูกขุดถึงระดับสุดท้ายแล้วคือ 22.00 เมตร บ่อเกิดวิบัติในตอนเช้าวันที่ 17 สิงหาคม 2540 ขณะที่ใส่คานค้ำยันรองได้เพียง 2 ระดับ ยังขาดอยู่อีก 3 ระดับจากรูปที่ 6 จะเห็นถึงสภาพของระบบค้ำยันที่ถ่ายไว้ 24 ชั่วโมงก่อนที่จะเกิดการวิบัติ หลังการวิบัติ ดินอ่อนนอกบ่อบีบตัวเข้าหาบ่อพาเอาบ้านเรือนข้างเคียงหลายหลังและรถเครนขนาด 40 ต้นที่จอดอยู่ที่ปากบ่อเลื่อนไหลลงไปในบ่อ และดินอ่อนไหลอย่างต่อเนื่องจนกลบทับส่วนกำแพงที่วิบัติ, ระบบค้ำยัน และรถขุดสองคันที่จอดอยู่ก้นบ่อ (รูปที่ 8 และ รูปที่ 9) ขณะที่กำแพงบางส่วนทางด้านทิศตะวันตกเกิดวิบัตินั้นปรากฏว่ากำแพงอีกสามด้าน ก็ยังตั้งอยู่ในตำแหน่งเดิมได้โดยไม่เสียหาย การวิบัติอย่างเฉียบพลันได้เกิดแรงกระชากเฉือน Capping Beam ในบริเวณนี้ขาดจนทำให้เกิดรอยแตกร้าวอย่างรุนแรงโดยทั่วไปและทำให้รอยต่อแผง Diaphragm Wall ส่วนที่เหลือใกล้กับจุดวิบัติถูกดึงอ้าออกด้วย นับว่ายังโชคดีที่การวิบัติครั้งนี้ไม่มีผู้ได้รับอันตรายจนถึงแก่ชีวิต ทั้งนี้เพราะมีเสียงดังลั่นเตือนมาจากระบบค้ำยันก่อนการวิบัติทำให้ไม่มีผู้ใดกล้าลงไปทำงาน



รูปที่ 8 ภาพถ่ายทางอากาศหลังเกิดการวิบัติ



รูปที่ 9 พื้นที่ด้านนอกทรุดและไหลลงในบ่อหลังจากวิบัติ (นพดล และคณะ 2542)

6. การวิเคราะห์หลังการวิบัติ

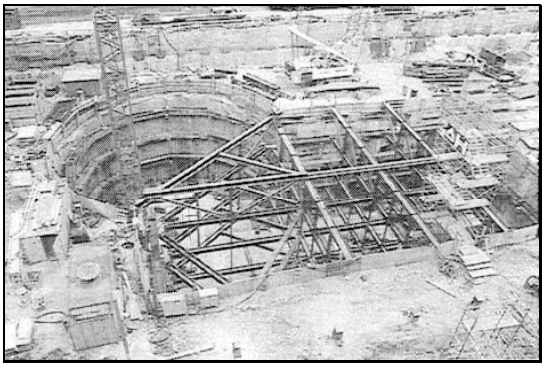
หลังการวิบัติฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานบ่อบำบัดได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการวิบัติครั้งนี้ โดยได้ตั้งสมมุติฐานเบื้องต้นถึงชนวนของการวิบัติไว้ 3 ประเด็นคือ (1) เกิดจากรูปทรงที่ไม่เหมาะสมของบ่อ IPS (2) เกิดจากการวิบัติของ Diaphragm Wall และ (3) เกิดจากความผิดพลาดของงานขุดและติดตั้งค้ำยันชั่วคราว

6.1.กรณีรูปทรงของบ่อ IPS น่าจะตัดออกไปได้เพราะเคยมีตัวอย่างงานใต้ดินของอาคารขุดลึกประมาณ 20.00 เมตร โดยมีรูปทรงคล้ายๆ กันนี้ (รูปที่ 10) ก่อสร้างแล้วเสร็จโดยไม่มีปัญหาที่ Frankfurt, Germany (Katzenbach, et al 1998) และมีการจัดค้ำยันคล้ายกับบ่อ IPS ด้วย และมีการติดตั้งคานซอยยึดโยงคานขวางไว้ทำให้คานขวางแข็งแรงมากขึ้น

6.2. ส่วนกรณี Diaphragm Wall ได้มีหลักฐานว่าชนวนการวิบัติไม่ได้เกิดจาก Diaphragm Wall จากรายงานของนพดล เพียรเวช และมั่น ศรีเรืองรอง (2542) กล่าวว่าในการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อ IPS ใหม่ในที่เก่าพบว่าปลาย (Toe) ของกำแพงส่วนที่พังทลายยังอยู่ในตำแหน่งเดิมโดยกำแพงหักพังล้มเข้าหาส่วนกลางของบ่อมิได้เกิดวิบัติในลักษณะที่เกิด Sliding ทะลุลอดใต้ Toe ของกำแพงคอนกรีตแต่อย่างใด นอกจากรายงานนี้แล้วยังพบว่ากำแพงส่วนที่เหลืออีกสามด้าน ยังสามารถตั้งอยู่ได้ในตำแหน่งเดิมแม้ว่าระบบค้ำยันจะพังไปหมดแล้ว

6.3.ความสำคัญของขั้นตอนการขุดดินและการติดตั้งค้ำยันมีรายงานไว้ในหัวข้อที่ 3 แล้ว ได้มีเหตุบ่งชี้และสนับสนุนถึงสมมุติฐานที่ว่าการวิบัติเกิดจากความผิดพลาดของงานขุดดินและติดตั้งค้ำยันชั่วคราว จากผลของการ

วิเคราะห์โดย FEM (Kanak- Nukulchai, et al 1998) ได้สรุปว่าคานค้ำยันหลักที่ค้ำในแนว A – B กับแนว A-C (รูปที่ 2) นั้นรับแรงเกินกว่ากำลังของหน้าตัดคานไปเป็นอย่างมาก อาจทำให้เกิดการโก่งเดาะขึ้นในชิ้นส่วนย่อยๆ ก่อนที่การวิบัติจะแพร่ขยายออกไปในโครงสร้างส่วนอื่นๆ ข้อสรุปดังกล่าวดูสอดคล้องกับภาพถ่ายที่บันทึกไว้หนึ่งวันก่อนเกิดการวิบัติ (รูปที่ 5) ว่าเกิดการปริแยกตัวจากกันของชิ้นส่วนคานประกอบ (Built Up Section) อันทำให้กำลังของหน้าตัดคานค้ำยันลดลงกว่า 30% นอกจากนั้นคานแนวนี้ไม่มีคานซอยยึดโยงเมื่อรับแรงสูง ๆ อาจโก่งงอในแนวระนาบจนไม่สามารถรับแรงอัดแนวแกนได้เลย นอกจากนั้นและในขณะเกิดคานค้ำยันรองสามชั้นสุดท้ายยังไม่ได้ทำการติดตั้ง(รูปที่ 6) ความผิดพลาดในระบบค้ำยันนี้มีส่วนทำให้ Capping Beam เกิด Torsional Stress จนแตกร้าว ยิ่งไปกว่านั้นการเคลื่อนตัวของกำแพงวัดจาก A-axis I-3 พฤติกรรมของกำแพงอยู่ใน Cantilever Mode ซึ่งไม่สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า แสดงให้เห็นถึงความไม่มีประสิทธิภาพของระบบค้ำยัน รอยร้าวใน Capping Beam เป็นสิ่งที่ยืนยันว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงในแกน A-Axis ของ I-3 เป็นแบบ Cantilever Mode



รูปที่ 10 การก่อสร้างส่วนใต้ดินที่มีรูปทรงลักษณะคล้ายกับบ่อ IPS (Katzenbach et al., 1998)

7. ข้อสรุปและข้อแนะนำ

จากบทความนี้จะสามารถสรุปเป็นอุทาหรณ์และเสนอแนะได้ดังนี้

งานขุดดิน – ติดตั้งค้ำยันเป็นงานที่มีความเสี่ยงต่อการวิบัติสูง ดังนั้นเพื่อป้องกันการวิบัติ ผู้เกี่ยวข้องต้องดำเนินการอย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดการลัดขั้นตอน เพราะการก่อสร้างอย่างผิดขั้นตอนและมองข้ามปัญหาต่างๆ แม้เพียงเล็กน้อยก็อาจจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงอย่างชนิดคาดคิดไม่ถึงได้โดยง่าย ในการดำเนินงานควรต้องพิจารณาหัวข้อต่อไปนี้ไว้ด้วย คือ

7.1 อย่ามองข้ามความสำคัญของ Soil Instrumentation และต้องให้ความสำคัญต่อระบบค้ำยันชั่วคราวให้เท่ากับหรือมากกว่าโครงสร้างถาวร และต้องติดตั้งตามขั้นตอนที่ออกแบบไว้อย่างเคร่งครัด

7.2 ต้องมีการยึดโยงระบบค้ำยันชั่วคราวเหล็กไม่ให้เกิดการโก่งงอทั้งสองแกน เพราะจะเสี่ยงต่อการวิบัติ

7.3 การออกแบบระบบค้ำยันด้วยเหล็กรูปพรรณ อย่าออกแบบโดยวิธี Limit State Design เพราะเสี่ยงต่อการวิบัติ

7.4 อย่านำเครื่องจักรหรือนำดินที่ขุดจากในบ่อมากองไว้ข้างบ่อเป็นอันขาดหากจำเป็นต้องไว้บน Plateform

7.5 ผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับงานขุดดิน – ติดตั้งค้ำยันต้องใช้ความรู้ทั้งด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และวิศวกรรมปฐพีอย่างพอเพียงควบคู่กันไป และในงานประเภท Design & Build ต้องพิจารณาเลือกบุคคลากรที่มีประสบการณ์สูงพอทั้งงานออกแบบ และงานก่อสร้างในสนาม

7.6 และข้อสุดท้าย ควรมีการบันทึกภาพการก่อสร้างไว้เป็นระยะ ๆ เพราะจากภาพถ่ายจะสามารถเห็นความผิด พลาดของงานได้ดีจนสามารถแก้ไขได้ทัน หรือหากเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดเกิดขึ้นจะสามารถพบข้อผิด พลาดจากภาพถ่ายต่าง ๆ ได้ไม่ยาก

8. เอกสารอ้างอิง

1) ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2540) การวิบัติในขั้นตอนการขุดดินและติดตั้งค้ำยันภายในบ่อ Inlet Pumping Station ที่หน่วยงานก่อสร้างโรงบำบัดน้ำเสีย ถนนพระรามที่ 3 เขตยานนาวา เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2540 รายงานภายในของบริษัท ซีฟโก้ จำกัด พฤศจิกายน 2540
2) นพดล เพียรเวช (2534) การออกแบบและข้อจำกัดของระบบกำแพงกันดินแบบต่างๆ. การสัมมนาทางวิชาการเรื่องงานฐานรากและการก่อสร้างใต้ดินจัดโดย วสท. กุมภาพันธ์ 2534. ณ. โรงแรมเอเชีย กรุงเทพมหานคร หน้า 1/1 ถึง 1/26.
3) นพดล เพียงเวช (2539) หลักการพิจารณาออกแบบและก่อสร้างงานขุดดินอ่อนด้วยกำแพงกันดินค้ำยัน. การสัมมนาทางวิชาการเรื่องงานก่อสร้างใต้ดิน 39. จัดโดยวสท. กันยายน 2539.
4) นพดล เพียรเวช และมั่น ศรีเรืองรอง (2542) การก่อสร้างแก้ไขบ่อสูบน้ำเสียโรงบำบัดน้ำเสียยานนาวา. โยธาสาร มกราคม - มีนาคม 2542 หน้า 42
5) มนูญ อารยะศิริ (2540), ข้อคิดจากประสบการณ์งานวิศวกรรมปฐพี, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2540, จัดโดย วสท.
6) สุรฉัตร สัมพันธารักษ์ (2540). ข้อควรระวังสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีในยุคนี้. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2540 จัดโดยวสท. พฤศจิกายน 2540 หน้า 121 ถึง 125.
7) เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ (2536). บทเรียนทางวิศวกรรมบางอย่างจากข้อผิดพลาดในอดีต. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536 จัดโดย พฤศจิกายน 2536 หน้า 399 ถึง 412
8) Irvine, D.J. & Smith, R.J. (1992). Trenching Practice. CIRIA. Report 97.
9) Kanok - Nukulchai, W. & Phien - Wej, N. .(1998). Investigation on Collapse of an Inlet Pumping Station - Looking into Modeling, Design and Construction Considerations. ACECOMS News and Views, July - September 1998. AIT.
10) Katzenbach, R., Moorman, C. & Quick, H. (1998). A New Concept for the Excavation of Deep Building Pits in inner Urban Areas Combining Top/Down Method and Piled - Raft Foundation., 7th Intl. Conference and Exhibition on Pile and Deep Foundation(DFI), Vienna, Austria.
11) Lamb, T. W. & Whitman, R. V.(1979). Soil Mechanics. John Weley & Sons, Inc.
12) Padfield, C. J., Mair, R. J.(1984).Design of Retaining Walls Embedded in Stiff Clay.CIRIAreport 104.
13) Puller, M.(1996). Deep Excavation, A Practical Manual. Thomas Telford. pp. .....
14) Teparaksa, W., Thasnanipan, N., Muang, A. W. & Tanseng, P.(1999). Lesson on the collapse of an Inlet Pumping Station During Construction - Geotechnical Instrumentation Aspect. 5th Int. Symposium on Field Measurements in Geomechanics. 1 - 3 December 1999., Singapore.pp.....
15) William B. P. & Waite, D.(1993). The Design and Construction of Sheet Piled Cofferdam. CIRIA. Special Publication 95. Thomas Telford.
16) Wood, J.G., M. (1998). Applying Lessons from Failures To Management and Design. Forensic Engineering : A Professional Approch to Investigate. Proc. Of the Intl. Conf. Organizeal by ICE, London. PP. 148-156

สารละลายเบ็นโทไนท์ในงานกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตในชั้นดินกรุงเทพฯ คุณสมบัติต่างๆ และ วิธีการควบคุม

BENTONITE SLURRY USED IN DIAPHRAGM WALL CONSTRUCTION IN BANGKOK SUBSOIL: THE PROPERTIES & THEIR CONTROL

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว, พรพจน์ ตันเส็ง

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

บทคัดย่อ: ในงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตในดิน (Cast-In-Situ Diaphragm Walls) ต้องการคุณสมบัติสารละลายเบ็นโทไนท์ (Bentonite Slurry) ที่สามารถมีความผันแปรได้ทั้งข้นเหนียว (Thick Slurry) และเบาใส (Fluid Slurry) ให้สัมพันธ์กับการก่อสร้างแต่ละขั้นตอน Reese et al (1985) กล่าวไว้ว่า การจะผสมสารละลายเบ็นโทไนท์ให้มีคุณสมบัติทั้งสองอย่างในขณะเดียวกันนั้นไม่สามารถเป็นไปได้ แต่สารละลายเบ็นโทไนท์จะทำหน้าที่ครบถ้วนทุกประการอย่างมีประสิทธิภาพนั้นเป็นไปได้ด้วยการควบคุมและทดสอบอย่างเป็นระบบ บทความนี้จะบรรยายถึงคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ วิธีการควบคุมและทดสอบตามขั้นตอนการก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพและวิธีการปรับปรุงแก้ไขคุณสมบัติของสารละลายในสนาม

ABSTRACT: Bentonite slurries used in diaphragm wall construction can vary in both physical and chemical properties. Depending on the requirement of the specific function of the slurry, thick slurry is required at some stages of construction while very fluid slurry is necessary at some other stages. Ideal slurry, therefore is impossible. However effective slurry is possible with control (Reese et. al 1985). This paper discusses on practical control of the properties and improvement of bentonite slurries in the field.

1. บทนำ

KEYWORDS: Bentonite Slurry, Filter Cake, and Thixotropy Characteristic

For Further Details Contact: *SEAFCO Co., Ltd., 26/10 Rarm Intra 109 Road, Bangchan, Klong Sam Wah, Bangkok 10510,* ***Homepage:*** *www.seafco.co.th,* ***Email:*** *seafco@seafco.co.th*

กำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มว่ามีการเลือกใช้กำแพงชนิดนี้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสิ่งก่อสร้างใต้ดินขุดลึกจากผิวดินลงไปมากขึ้นทุกขณะ ชั้นดินกรุงเทพฯ จะประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนในระดับแรกจากผิวดินถึงความลึกประมาณ 15 เมตร จากนั้นจะเป็นดินแข็งถึงแข็งมากสลับกับชั้นทรายไปเรื่อย ๆ หลายร้อยเมตร ดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็ง และชั้นทรายในกรุงเทพฯ มักจะมี Silt ผสมอยู่ด้วยเมื่อขุดเจาะอนุภาคของ Silt, Clay และ Sand จะลอยแขวนในสารละลายฯ เมื่อนำไปแยกอนุภาคออกโดยเครื่อง Desander จะแยกได้ดีแต่เฉพาะทราย ส่วน Silt และ Clay ลอดผ่านตะแกรงลงไปผสมในสารละลายฯ อีก ทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของสารละลายฯ เสื่อมลงทุกขณะการจะแยก Silt และ Clay Particle ออกจากสารละลายได้ดีนั้นต้องผ่านเครื่อง Desilting ด้วยดังนั้นจึงควรเลือกเครื่องแยกตะกอนชนิดที่เป็น Desander และมี Desilter อยู่ในตัวด้วยจึงจะทำให้การควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ดีขึ้นและสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของสารละลายฯ ให้เหมาะสมกับขั้นตอนการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นทำให้คุณภาพงานชนิดนี้มีความสมบูรณ์หากควบคุมไม่ดีพออาจมีผลกระทบกับคอนกรีตที่ใช้หล่อกำแพงทำให้ดูไม่เรียบร้อย, ความแข็งแรงลดลงและอาจมีการรั่วซึมของน้ำใต้ดินผ่านกำแพงเข้ามาได้ด้วย

2. สารละลายเบ็นโทไนท์ (Bentonite Slurry)

สารละลายเบ็นโทไนท์คือ ผงเบ็นโทไนท์ผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละแห่งโดยทั่วไปใช้ส่วนผสมผงเบ็นโทไนท์ตั้งแต่ 3 - 6% โดยน้ำหนัก เบ็นโทไนท์มีอยู่ 3 ประเภทคือ

2.1 ประเภท Natural Sodium Bentonite มีคุณสมบัติการพองตัว (Swelling Ability) และค่า Liquid Limit สูงมาก แต่มีค่า Filter Loss ต่ำ เหมาะต่อการใช้งานแต่ราคาแพงมากและหายากอีกด้วยจึงไม่เป็นที่นิยม

2.2 ประเภท Natural Calcium Bentonite หาง่ายมีเหมืองอยู่ทั่วโลก เบ็นโทไนท์ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการพองตัวและค่า Liquid Limit ต่ำแต่มีค่า Filter และ Fluid Loss สูงกว่า Natural Sodium Bentonite มาก เบ็นโทไนท์ชนิดนี้ไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานเสาเข็มเจาะและกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดิน

2.3 ประเภท Sodium -Activated Bentonite ผลิตขึ้นโดยการเติมสารละลาย Sodium Carbonate ในปริมาณที่เหมาะสมลงไปใน Calcuim Bentonite ทำให้มีพฤติกรรมต่างๆคล้ายกับ Natural Sodium Bentonite งานส่วนใหญ่ทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศอังกฤษนิยมใช้เบ็นโทไนท์ชนิดนี้ เพราะหาไม่ยากและราคาไม่สูงนัก ผู้เขียนพบว่าเบ็นโทไนท์ประเภทนี้ที่ผลิตในประเทศไทยใช้งานได้ดี

3. Thixotropy characteristic

เมื่อผงเบ็นโทไนท์ถูกนำมาผสมกับน้ำสะอาดและกวนให้แตกตัวแล้วจะกลายเป็นสารละลายที่มีความหนืด (Viscous Slurry) หากปล่อยอยู่นิ่ง ๆ ความเหนียวหนืดจะเพิ่มมากขึ้น (Thick) แต่ความเหนียวหนืดนี้จะลดลง (Thin) เมื่อสารละลายฯ ถูกกวนให้ปั่นป่วน (Agitation) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Thixotropy Characteristic (ICE 1996) สาเหตุมาจากเมื่อสารละลายฯ ถูกปล่อยให้อยู่นิ่ง ๆ นั้นประจุไฟฟ้าในอนุภาคเล็กๆ ของผงเบ็นโทไนท์จะดึงดูดซึ่งกันและกันก่อตัวเป็นโครงสร้างของอนุภาคลอยแขวนคล้ายเมือกวุ้น (Gel) เมื่อเมือกวุ้นนี้ถูกกวน (Agitated) จะทำให้ประจุไฟฟ้าที่ดึงดูดกันอยู่ถูกทำลายลงทำให้โครงสร้างอนุภาคลอยแขวนที่เป็นเมือกวุ้นเกิดการแตกตัว (Dispersed) กระจัดกระจายทำให้สารละลายฯ กลับเป็นของเหลว (Fluid) ไหลได้อีก Martin (1996) จึงแนะนำไว้ว่าอย่าปล่อยให้สารละลายอยู่นิ่ง ๆ (Non Agitation) เกินกว่า 5 ชั่วโมงก่อนทำการเท Tremie Concrete

4. เยื่อบุทึบน้ำ (Impermeable Seals)

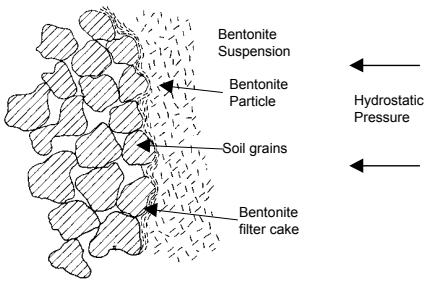
เพื่อให้แรงดันของสารละลายฯที่ใช้ขุดในชั้นดินประเภทที่น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ (Permeable Soils) สามารถต้านแรงดันดินผนังร่องขุดอย่างมีประสิทธิภาพนั้นสารละลายฯ จะต้องก่อเยื่อบุ (Seals) ขึ้นมาอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายที่ผิวผนังร่องขุด เยื่อบุนี้จะเป็นแนวป้องกันไม่ให้สารละลายฯซึมหายเข้าไปในชั้นดิน แรงดันของสารละลายฯ ต้านทานแรงดันดินไว้ ทำให้ร่องเจาะมีเสถียรภาพ เยื่อบุ (Seals) นี้มีอยู่ 3 ประเภท คือ

4.1 Surface Filtration (รูปที่ 1) เกิดขึ้นจากอนุภาคของเบ็นโทไนท์จับตัวกันอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายแน่นที่ผิวหน้าผนังร่องขุดระหว่างและหลังจากที่อนุภาคเบ็นโทไนท์จับตัวก่อเป็น Filter Cake ที่ผิวผนังร่องขุดนั้น จะมีน้ำบางส่วนในสารละลายซึมผ่าน Filter Cake เข้าไปในมวลดิน ปริมาณน้ำที่หายไปนี้เรียกว่า Fluid Loss

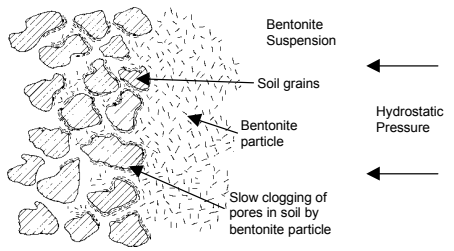
4.2 Deep Filtration (รูปที่ 2) เกิดขึ้นเมื่อสารละลายซึมเข้าไปในดินทรายหลวม และอนุภาคเบ็นโทไนท์รวมตัวกันอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายหลวมหลังผิวผนังร่องขุดอาจซึมลึกเข้าไปประมาณ 40-50 มม. จึงจะอุดได้สมบูรณ์

4.3 Rheological Blocking เป็น Deep Filtration อีกประเภทหนึ่งมักเกิดในชั้นทรายหลวมมากหรือในชั้นกรวด เกิดขึ้นเมื่อสารละลายฯไหล (Flow) เข้าไปในชั้นดินอย่างมากเพื่ออุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายหรือกรวดโดยกว่าจะก่อเยื่อบุได้สมบูรณ์นั้นสารละลายฯ อาจจะไหลเข้าไปอุดในดินลึกหลายเมตรจากผิวผนังร่องขุด

จากพฤติกรรมทั้ง 3 ประเภทนี้ Surface Filtration เป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุด และหล่อในดิน เพราะเยื่อบุทึบน้ำ (Seal) เกิดขึ้นรวดเร็วและไม่มีอนุภาคของเบ็นโทไนท์ซึมเข้าไปในชั้นดินทรายแต่ต้องควบคุมไม่ให้ Filter Cake เกิดหนาเกินไป เพราะอาจจะถูกครูดออกโดยคอนกรีตขณะเทออกได้ไม่หมด ทำให้แรงเสียดทานผิวลดลง (ณรงค์ และคณะ 2542)



รูปที่ 1 Surface Filtration (Flemming et al, 1977)



รูปที่ 2 Deep Filtration (Flemming et al, 1977)

5. คุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ (Properties of Bentonite Slurries)

สารละลายเบ็นโทไนท์ในงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในดินทำหน้าที่หลายอย่างคือ (ก) ต้านไม่ให้ผนังร่องขุดพังหรือบีบตัว (ข)สามารถคงอยู่ในร่องขุดโดยไม่ซึมหายเข้าไปในชั้นดินมากเกินไป (ค) สามารถให้ตะกอนดินทรายลอยแขวนอยู่ได้ (ง) สามารถถูกแทนที่โดยคอนกรีตเทผ่านท่อเทได้ดี (จ) สามารถนำไปแยกเศษดินทรายออกได้โดยผ่านตะแกรง (ฉ) สามารถใช้ปั๊มสูบได้โดยง่าย คุณสมบัติของสารละลายตามข้อ (ก) ถึงข้อ (ค) ต้องการสารละลายฯ ที่หนักและเหนียว (Thick Slurry) ส่วนคุณสมบัติของสารละลายฯ ตามข้อ (ง) ถึงข้อ (ฉ) ต้องการสารละลายฯ ที่เบาและใส (Fluid Slurry) ดังนั้นการกำหนดคุณสมบัติของสารละลายฯ จึงต้องพิจารณาให้เหมาะสม Institution of Civil Engineers (1996) แนะนำค่าคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ผลิตในประเทศอังกฤษไว้ตามตารางที่ 1 (ความเห็นผู้เขียนค่า Viscosity และ pH ในตารางที่ 1 ไม่เหมาะกับงานขุดเจาะ

ในชั้นดินกรุงเทพฯ เนื่องจากดินกรุงเทพฯ มี Silt มากควรปรับปรุงใช้ค่า Viscosity ไม่เกิน 60 Sec/Quart และ pH ควรอยู่ระหว่าง 8 - 12 ส่วนค่าอื่นๆ อยู่ในช่วงที่สามารถนำมาใช้ได้)

ตารางที่ 1 Test and compliance values for support fluid (ICE, 1996)

Property to be measured	Test Method and apparatus	API RP13 Section	Compliance values measured at 20 C	
			As Supplied to pile	Sample from pile prior to placing concrete
Density	Mud balance Low temperature	1	Less than 1.10 g/ml	Less than 1.15 g/ml
Fluid loss (30 minute test)	test fluid loss	3	Less than 40 ml	Less than 60 ml
Viscosity	Marsh Cone	2	30 to 70 seconds (27 - 50)(1)	Less than 90 sec. (Less than 60 sec.) (1)
Shear strength (10 min gel strength)	Fann Viscometer	2	4 to 40 N/m^2	4 to 40 N/m^2
Sand Content	Sand screen set	4	Less than 2%	Less than 2%
pH	(2)		9.5 - 10.8 (8 - 11) (1)	9.5 - 11.7 (<12) (1)

หมายเหตุ 1). ตัวเลขในวงเล็บเป็นความเห็นของผู้เขียน 2.) วัดโดย Electrical pH meter แต่ใช้ pH paper แทนได้

6. การควบคุมคุณสมบัติในสนาม (Control Limit in the Field)

6.1 สารละลายฯ บางขั้นตอนต้องการให้หนักและเหนียว (Thick Slurry) และขณะที่ในบางขั้นตอนต้องการให้เบาและใส (Fluid Slurry) จึงต้องจัดตารางการควบคุมคุณสมบัติของสารละลายเบ็นโทไนท์ในสนามอย่างเป็นระบบ กล่าวคือต้องทดสอบตั้งแต่ผสมเสร็จ, ก่อนใช้งาน, ขณะกำลังใช้งาน, หลังการใช้งานแล้วและภายหลังทำความสะอาดเพื่อนำกลับไปใช้ซ้ำ ตัวอย่างที่ถูกเก็บมาทดสอบต้องพิจารณาเก็บให้เหมาะสมตามที่ต้องการจะทดสอบในแต่ละขั้นตอนไม่ควรเก็บจากจุดเดียวต้องหมุนเวียนเปลี่ยนจุดไปเรื่อยๆ เช่นเก็บจากจุดถังผสมบ้าง, จากจุดเก็บพักสารละลายฯ, จากจุดที่ทำความสะอาด และจากก้นหลุมของร่องขุดโดยใช้ Mud Sampler บ้างสลับกันไปเป็นต้น และควรจัดตารางการทดสอบตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ

การทดสอบ	หน่วย	สารละลายผสมใหม่	ทุกเช้าจากถังเก็บและก่อนนำไปใช้	ในร่องระหว่างขุด	*ก่อนเทคอนกรีต	หลังเทคอนกรีต	ปรับปรุงก่อนนำไปใช้ซ้ำ
Density	g/ml	1.03-1.10	<1.10	เก็บข้อมูล	<1.15	เก็บข้อมูล	<1.10
Viscosity	sec/quart	27 - 45	<50	เก็บข้อมูล	<60	เก็บข้อมูล	<50
Filtration	mm.	<3	<3	เก็บข้อมูล	<3	-	<3
Fluid loss	ml.	<40	<40	เก็บข้อมูล	<60	-	<40
pH	-	8 - 11	8 - 11	เก็บข้อมูล	8 - 12	เก็บข้อมูล	8 - 11
10 min.gel	N/m^2	4 - 40	-	เก็บข้อมูล	-	-	4 - 40
Sand	%	<2	<4	เก็บข้อมูล	<2	-	<4

หมายเหตุ * ก่อนเทคอนกรีตตัวอย่างให้เก็บจากก้นหลุมด้วย Mud Sampler มาทดสอบ.

6.2 นอกเหนือจากการทดสอบเป็นประจำตามตารางข้างต้นแล้วหากมีเหตุการณ์ที่ไม่ปกติเกิดขึ้นก็ควรทดสอบเพิ่มเช่น เกิดฝนตก, ร่องน้ำขุดถูกทิ้งไว้นานเกินไป หรือ สารละลายเกิดเจือปน (Contaminated) กับสารเคมีในชั้นดินเป็นต้น หากทดสอบและพบว่าคุณสมบัติไม่ได้เกณฑ์ให้ปรับปรุงโดยอาจใส่สาร Additive เข้าไป

6.3 ในระหว่างการขุดเจาะสารละลายจะเปลี่ยนสี และคุณสมบัติต่างๆ เริ่มเปลี่ยนไปจากเดิมโดยจะเริ่มเหนียวและหนักขึ้น (Thicker) และจะเริ่มสูญเสียคุณสมบัติ Thixotropic Characteristics เศษตะกอนดินทรายที่เข้าไปผสมกับสารละลายจะทำให้ Viscosity สูงขึ้นและอาจทำให้ Gel Strength ลดลงได้หากน้ำใต้ดินแทรกผสมเข้า

ไปในสารละลายฯ จะทำให้ Viscosity และ Gel Strength ลดลงเช่นกัน หากมีของเสียและน้ำทิ้งในชั้นดินและถูกดูดซึมเข้าไปผสมกับสารละลายฯ ในปริมาณสูงระดับหนึ่งแล้วจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงและเสื่อมคุณภาพได้

6.4 การเสื่อมสภาพของสารละลายฯ อันเนื่องจาก Cement เป็นปัญหาที่พบเป็นประจำเนื่องจากสารละลายเบ็นโทไนท์เป็น Sodium Base เมื่อ Calcium จาก Cement มาผสมกับสารละลายเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ากัน ทำให้สารละลายเกิด Permeable Filter Cake ที่ผิวผนังร่องเจาะซึ่งน้ำซึมผ่านได้ทำให้สารละลายฯ เกิดการยุบหายจนร่องขุดอาจเกิดการพัง ดังนั้นอย่าให้คอนกรีตตกหล่นลงไปในร่องที่กำลังหล่อคอนกรีต นอกจากนั้นเมื่อตะกอนเล็ก ๆ ที่ลอยแขวนตัวอยู่ในสารละลายจะรวมตัวกันกับ Calcium และ Sodium จะเกิดเป็น Flocculation Effect (จับตัวเป็นก้อน) ซึ่งอาจตกค้างและแทรกตัวในคอนกรีตได้

6.5 ผลกระทบจากความเค็มในดินในพื้นดินบางแห่งซึ่งมีปริมาณเกลืออยู่ในน้ำใต้ดิน ความเค็มของน้ำใต้ดินจะซึมซาบผสมกับสารละลายฯทำให้ Viscosity และ Gel ลดลง และอาจเกิด Flocculation Effect ขึ้นได้ซึ่งทำให้ Viscosity และ Gel ในกรณีหลังนี้กลับเพิ่มสูงขึ้นมาก และเกิดปัญหาเช่นเดียวกับข้อ 6.4 ได้

7. ปัญหาที่พบอยู่บ่อย และวิธีการควบคุม (Problems and Their Control)

ถึงแม้จะวางแผนการควบคุมปัญหาของสารละลายไว้แล้วก็ตาม แต่ชั้นดินที่จะก่อสร้างในแต่ละแห่งมักจะก่อปัญหาขึ้นเสมอ จากประสบการณ์มักจะพบว่าความบกพร่องของกำแพงกันดินส่วนใหญ่มีสาเหตุจากควบคุมเบ็นโทไนท์ไม่เหมาะสม (Xanthakos 1994) ได้รวบรวมปัญหาและวิธีแก้ไขปรับปรุงคุณสมบัติของสารละลายฯ ซึ่งผู้เขียนได้นำมาสรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปปัญหาและการปรับปรุงสารละลายเบ็นโทไนท์

ปัญหาของคุณสมบัติ	วิธีการควบคุมและปรับปรุงคุณสมบัติ
ต้องการเพิ่ม Viscosity และGel ของสารละลายฯ	เพิ่มผงเบ็นโทไนท์ให้มากขึ้นกว่าปกติ, หรือใส่ CMC (Sodium Carboxymethyl Cellulose) หรือ ทำทั้ง 2 อย่าง
ต้องการเพิ่ม Viscosity และ Gel เนื่องจากมีตะกอนทรายลอยแขวนอยู่มาก	แยกทรายโดยตะแกรงร่อน (Desander and Desilter) และเติมผงเบ็นโทไนท์ หรือ CMC
ต้องการลด Viscosity และ Gel ในสารละลายเบ็นโทไนท์ที่แตกตัวดีแล้ว	เพิ่มน้ำสะอาดลดลงไปช้าๆ หรือปรับปรุงโดยใส่สารเคมีประเภท Thinners[(1)]
ต้องการลด Viscosity และ Gel เนื่องจากมีตะกอนดินลอยแขวนเป็นปริมาณมากเกินไป	ถ้าสารลอยแขวนมีมากให้ผ่านตะแกรงกรองสารลอยแขวนออก และเพิ่มน้ำช้าๆ ใส่สารเคมีประเภท Thinners
ต้องการลด Viscosity และ Gel แต่ไม่สามารถแก้ไขโดยการเติมน้ำ เนื่องจากอัตราส่วนผสมของสารเบ็นโทไนท์เดิมพอเหมาะอยู่แล้ว	ให้ใช้สารเคมีประเภท Thinners เติม, แต่ถ้าเติมแล้วทำให้ Viscosity ลดลงมากจนเกินไปให้เปลี่ยนเป็นเติม CMC แทน
เพื่อลดอัตราการซึม และลดความหนาของ Cake ที่ผิวผนังร่องขุด และลดการไหลหายของสารละลาย (Filter Rate, Thickness and Fluid loss)	เติมผงเบ็นโทไนท์ และ CMC แต่ถ้าเติมแล้วทำให้ Viscosity กลับสูงขึ้นมาก ให้ปรับปรุงโดยใช้ FCL หรือสารเคมีประเภท Thinners ชนิดอื่นๆ
การขุดร่องในชั้นดินเหนียว	ใช้สารละลายที่มี Viscosity และ Gel ให้ต่ำในเบื้องต้นเพราะจะเพิ่มขึ้นเองหลังขุดเนื่องจากจะผสมเข้ากับอนุภาคของดิน

ปัญหาของคุณสมบัติ	วิธีการควบคุมและปรับปรุงคุณสมบัติ
การขุดเจาะในชั้นทราย และชั้นกรวด (การเจาะในชั้นทรายจะทำให้ Density เพิ่มและ Viscosity ลดลง และมีโอกาสเกิด Loss Circulation ได้	แก้ไขโดยต้องเตรียมสารละลายเบ็นโทไนท์ที่มี Gel Strength พอเพียงที่จะอุ้มตะกอนทรายได้ และสามารถสร้าง Filter Cake และ Film (Seal) ที่จะไม่ทำให้เกิด Fluid loss มากนักโดยใช้เปอร์เซ็นต์เบ็นโทไนท์สูงกว่าปกติและเติม CMC
การที่น้ำยาเบ็นโทไนท์สัมผัสกับ Cement ทำให้น้ำยาเสื่อมสภาพ (Contamination with Cement)	เติม FCL หรือสารเคมีประเภท Thinners อื่นๆ แต่ถ้าเติมแล้วคุณสมบัติไม่ดีขึ้นให้ทิ้งน้ำยาชุดนี้เสีย
Cement เกิด Bleeding มาผสมกับเบ็นโทไนท์ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	ระวังไม่ให้คอนกรีตหล่นลงไปในร่องเจาะ เบ็นโทไนท์ที่นำมาเจาะค่าpHเบื้องต้นไม่ควรเกิน10

หมายเหตุ (1) Thinners = Sodium Tretraphosphate, Tannin, Ferrochrome Lignosulfonate (FCL) etc.

8. บทสรุป (Conclusions)

สารละลายเบ็นโทไนท์ที่ใช้ในงานก่อสร้างกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในดิน (Diaphragm Wall) มีผลต่อคุณภาพ, ต้นทุน, และความถูกต้องเรียบร้อยของงาน ดังนั้นต้องเรียนรู้ ทำความเข้าใจเกี่ยวกับสารละลายเบ็นโทไนท์ให้ลึกซึ้ง และเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพดินแต่ละแห่งรวมถึงจัดตารางการควบคุม และทดสอบคุณสมบัติของสารละลายระหว่างการก่อสร้างอย่างใกล้ชิด การละเลยในการควบคุมสารละลายฯ โดยปฏิบัติเพียงเพื่อให้งานแล้วเสร็จไปในแต่ละวันเท่านั้น อาจก่อให้เกิดปัญหาติดตามมาในภายหลังมากมายอย่างไม่คาดคิดได้

9. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด ผู้ผลิตผงเบ็นโทไนท์ Mac-Gel® ที่ให้ข้อมูลบางส่วนในบทความนี้

10. เอกสารอ้างอิง (References)

1. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2524). การตรวจสอบคุณสมบัติในสนามของสารละลายเบ็นโทไนท์ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่. เอกสารวิชาการเล่มที่ 1. จัดพิมพ์โดย วสท. หน้า 63 ถึง 70
2. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และ กมล สิงห์โตแก้ว 2542), กำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดิน กรุงเทพ: ความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นและการป้องกัน, การประชุมทางวิชาการประจำปี 2542, จัดโดย วสท. หน้า 25 ถึง 34
3. Fleming, W. G. K. and Sliwingski, Z. J.(1977 reprint 1991), The Use and Influence of Bentonite in Bored Pile Construction, CIRIA Report.. PG.3.
4. ICE (1996), Specifications for Piling and Embedded Retaining Walls, Thomas Telford.
5. Martin, W. S. (1996), Site Guide to Foundation Construction, CIRIA Special Publication 136.
6. Reese, L. C. and Tucker, K. (1985), Bentonite Slurry in Constructions Drilled Piers and Caisson II, ASCE Convention, Denver, Colorado, USA.
7. Xanthakos, P. P. (1994). Slurry Walls as Structural Systems. McGraw - Hill Inc.

กรณีศึกษาการวิบัติชนิดรุนแรง ในงานขุดดินแบบใช้ค้ำยันในชั้นดินกรุงเทพฯ

Case Study on the Catastrophic Failure of the Deep Braced Excavation in Bangkok Subsoil

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์[1] และกมล สิงห์โตแก้ว[2]

[1]กรรมการผู้จัดการ [2]ผู้อำนวยการโครงการ
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

งานขุดดิน – ติดตั้งค้ำยันเป็นงานที่มีความเสี่ยงต่อการวิบัติสูง ผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานขุดดินต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง ไม่ให้เกิดมีการลัดขั้นตอน เพราะการขุดดินและติดตั้งค้ำยันหากกระทำอย่างผิดขั้นตอนและมองข้ามปัญหาต่างๆ ที่เห็นว่าเป็นเรื่องเล็กน้อยก็อาจจะทำให้เกิดความเสียหายชนิดรุนแรงอย่างคาดคิดไม่ถึงได้โดยง่าย ในการดำเนินงานควรต้องพิจารณาถึงความสำคัญของ Geotechnical Instrumentation และต้องให้ความสำคัญต่อระบบค้ำยันชั่วคราวให้เท่ากับหรือมากกว่าโครงสร้างถาวร

Abstract

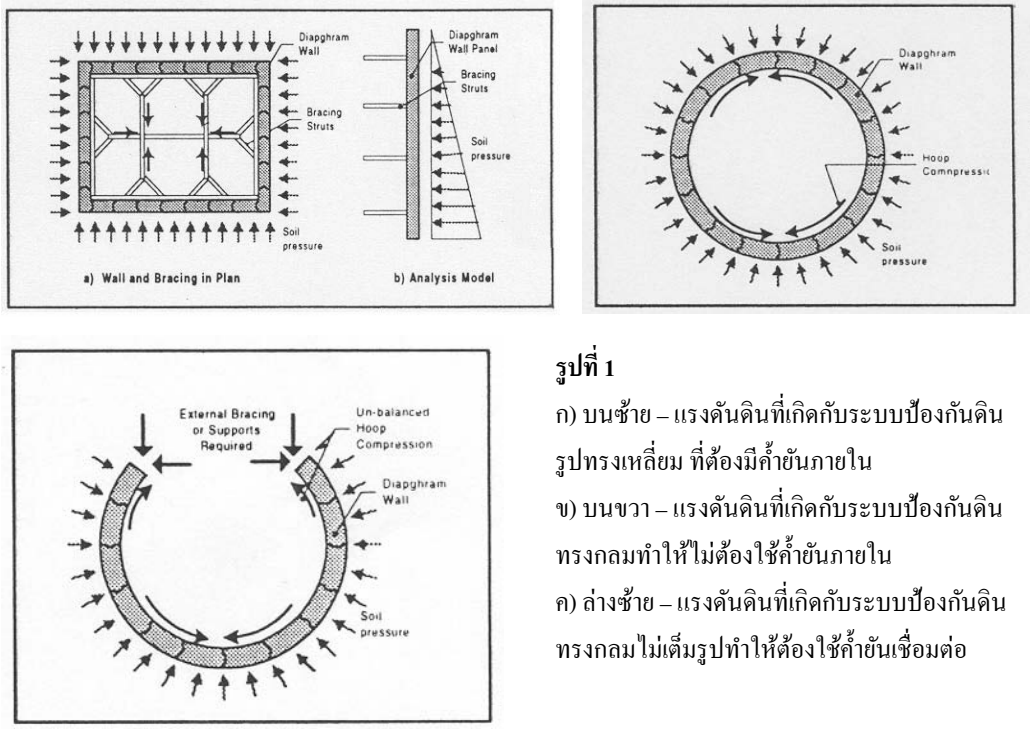
Braced excavation is a high risk work. The parties who involved in this excavation must follow the sequence of work according to the design. Omitting the sequence and avoiding the small problems could lead to an unexpected catastrophic failure. Geotechnical instrumentation shall be considered as an important part of the work, and the parties must consider the temporary bracing system as essential as permanent structures.

KEYWORDS: Deep excavation, Catastrophe, Temporary bracing.

For further details, contact *Mr. Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd., 26/10 Ram Intra 109 Road, Bangchan, Klong sam wah, Bangkok 10510, Tel. 0-2919-0090 Fax 0-2919-0098. e-mail: narong@seafco.co.th*

1. บทนำ

เนื่องจากดินกรุงเทพฯ เกิดขึ้นจากการตกตะกอน ดินชั้นบนลึกประมาณ 15 เมตรจึงอ่อนมากถึงอ่อน ทำให้ไม่สามารถทำการขุดดินลงไปโดยตรงแบบไม่มีระบบกำแพงป้องกันดินเคลื่อนตัวได้ งานขุดดินเพื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินที่มีความลึกตั้งแต่ 3 เมตรลงไปจึงต้องใช้ระบบกำแพงและระบบค้ำยันป้องกันดินเคลื่อนตัว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เสาเหล็กแผ่นพืด (Sheet piles) และเมื่อขุดลึกมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปมักใช้ระบบกำแพงป้องกันดินแบบแข็ง (Rigid Walls) เช่นระบบกำแพง Diaphragm Wall แต่อย่างไรก็ตามระบบกำแพงป้องกันดินเคลื่อนตัวในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยทั่วไปไม่สามารถก่อสร้างแบบ Cantilever Walls ได้ จะต้องมีการใส่ค้ำยัน (Braced Walls) ตามรูปที่ 1 (ก) ยกเว้นในกรณีที่สร้างเป็นรูปโค้งทรงกลมที่กำแพงสามารถมีเสถียรภาพได้โดยไม่ต้องใช้ค้ำยันภายใน ตามรูปที่ 1 (ข) แต่หากส่วนโค้งไม่ครบเต็มรูปทรงกลมต้องมีระบบค้ำยันที่แข็งแรงค้ำต่อตรงปลายเปิดของส่วนโค้ง ตามรูปที่ 1 (ค) บทความนี้จะกล่าวถึงการวิบัติชนิดรุนแรงที่เคยเกิดขึ้นกับงานขุดดินลึกมากประมาณ 20 เมตรโครงการหนึ่งก่อสร้างในกรุงเทพฯ ไว้เป็นกรณีศึกษาที่คาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรและผู้ที่จะทำงานขุดในลักษณะคล้ายคลึงกันในอนาคตให้ระมัดระวัง และเกิดจิตสำนึกในการป้องกันภัยพิบัติชนิดรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้



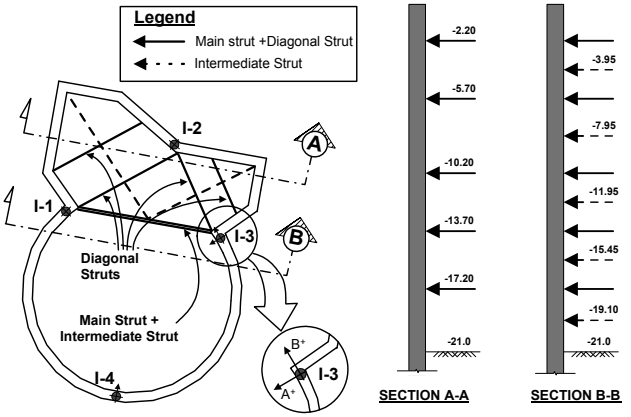
รูปที่ 1
ก) บนซ้าย – แรงดันดินที่เกิดกับระบบป้องกันดินรูปทรงเหลี่ยม ที่ต้องมีค้ำยันภายใน
ข) บนขวา – แรงดันดินที่เกิดกับระบบป้องกันดินทรงกลมทำให้ไม่ต้องใช้ค้ำยันภายใน
ค) ล่างซ้าย – แรงดันดินที่เกิดกับระบบป้องกันดินทรงกลมไม่เต็มรูปทำให้ต้องใช้ค้ำยันเชื่อมต่อ

2. รายละเอียดของบ่อขุดที่เกิดการวิบัติ

บ่อดังกล่าวเป็นบ่อสูบน้ำเสีย (Inlet Pumping Station) ที่ออกแบบโดยผู้ออกแบบต่างประเทศ ตามรูปที่ 2 โครงสร้างของบ่อได้ถูกออกแบบให้มีพื้นที่หลักสองส่วนคือ ส่วน Inlet Chamber ที่ใช้กำแพงกันดินชนิดแนวเส้นตรง (Straight Line Wall) และ Pumping Chamber ที่ใช้กำแพงกันดินชนิดรูปส่วนโค้งของวงกลม ขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางประมาณ 20.30 เมตร ระดับขุดดินของทั้งสองส่วนลึกประมาณ 20.20 เมตรจากระดับผิวดินเดิม กำแพงกันดินทั้งสองส่วนใช้กำแพงระบบขุดและหล่อคอนกรีตในที่ (Cast In – Situ Reinforced Concrete Diaphragm Wall) หนา 1.00 เมตร ปลายลึกประมาณ 25 เมตรจากระดับผิวดิน

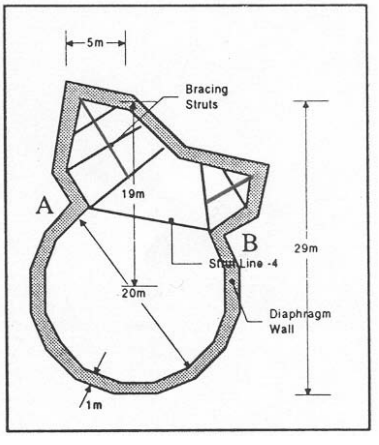
ผู้ออกแบบได้กำหนดการขุดดินไว้ว่ากำแพงกันดินในส่วนของ Inlet Chamber ต้องมีการใช้ค้ำยันหลัก (Main Struts) เพื่อค้ำยันป้องกันกำแพงเคลื่อนตัวในระหว่างการขุดจำนวน 5 ชั้น สำหรับในส่วนของ Pumping Chamber โดยทั่วไปไม่ต้องใช้ค้ำยันเนื่องจากกำแพงมีรูปร่างเป็นส่วนของวงกลมยกเว้นที่ปลายเปิดของส่วนของวงกลมที่ที่บรรจบกับกำแพงของ Inlet Chamber จะต้องใส่ค้ำยันรวม 10 ชั้น เป็นค้ำยันหลัก (Main Struts) 5 ชั้น และค้ำยันรอง (Intermediate Struts) อีก 5 ชั้น เพื่อถ่ายแรงอัด (Compression Hoop) ที่เกิดขึ้นในกำแพงให้เกิดการสมดุลครบรอบวงกลม แต่เนื่องจากระยะระหว่างปลายเปิดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของกำแพงส่วนของวงกลมค่อนข้างยาว จึงกำหนดให้ใส่คานยึดโยง (Lacing Beam) ยึดกลางค้ำยันรองเอาไว้ทุกชั้นด้วยเพื่อป้องกันการแกว่งไกว (Sway) ของค้ำยันรองและ King Post ที่รองรับคานค้ำยันมิให้เกิดการแกว่งไกวในแนบราบที่จะทำให้คานค้ำยันเกิดการโก่งเดาะได้



รูปที่ 2 แบบค้ำยันชั่วคราว ที่ออกแบบไว้เดิม [1]

และมีการติดตั้งอุปกรณ์พิเศษ (Inclinometers) เพื่อสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินที่จะดันกำแพงให้เคลื่อนตัวในขณะขุดเอาไว้ด้วนจำนวน 4 ตำแหน่งดังที่แสดงเป็น I-1, I-2, I-3 และ I-4 ในรูปที่ 2

ในการก่อสร้างจริงมีการลดความยาวของคานยึดโยง (Lacing Beams) ทำให้คานขวางระหว่างปลายช่องเปิดไม่ถูกยึดโยงทำให้ความยาวประสิทธิผลของคานดังกล่าวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของที่ออกแบบไว้ ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบค้ำยันชั่วคราว ที่ก่อสร้างจริง Lacing Beams ค้ำไม่ถึงคานค้ำยันตัวขวาง

3. เรื่องที่ต้องระมัดระวังในงานขุดดินลึก

เป็นเรื่องที่ทราบกันดีในหมู่วิศวกรปฐพีที่มีประสบการณ์ในการขุดดินมามากว่า งานขุดดินเป็นงานที่มีความเสี่ยงภัยสูงกว่างานอื่นๆ ซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานขุดดินลึกจะต้องไม่ทำงานแบบมีความเสี่ยง เพราะความผิดพลาดในงานขุดดินเมื่อเกิดขึ้นแล้ว มีต้นทุนในการแก้ไขปัญหาสูงและใช้เวลาในการแก้ไขนาน หรือบางกรณีอาจแก้ไขไม่ได้เลย

ในประเทศอังกฤษที่มีความรู้และประสบการณ์ในการก่อสร้างพัฒนาไปไกลกว่าประเทศไทยมากก็ยังมีสถิติของผู้บาดเจ็บและเสียชีวิต ที่เกิดขึ้นมาจากการพังทลายของงานขุดดินค่อนข้างมาก ดังรายงานของ Irvine et al [10] ได้รวบรวมและวิเคราะห์ถึงลักษณะการวิบัติของงานขุดเฉพาะที่เกิดขึ้นแบบรุนแรงตั้งแต่ปี 1973 จนถึงปี 1980 เป็นเวลา 7 ปี และสรุปไว้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สาเหตุที่เกิดการวิบัติเฉพาะที่เกิดอย่างรุนแรงในประเทศอังกฤษ [10]

สาเหตุที่เกิดการวิบัติรุนแรง	คิดเฉพาะจากที่เกิดวิบัติรุนแรง
เกิดจากระบบค้ำยันไม่แข็งแรง	12%
ขุดดินเร็วเกินไป จนติดตั้งค้ำยันไม่ทัน	20%
จากสาเหตุอื่นๆ	68%

และผู้เขียนได้รวบรวมคำแนะนำโดยย่อ (ที่จริงคือคำเตือนโดยย่อนั่นเอง) ของผู้ชำนาญการจากภายในและต่างประเทศทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่เห็นว่าจะเป็นประโยชน์กับงานขุดดินลึกมาให้ทราบ เพื่อเป็นแนวคิดในการทำงานดังนี้คือ

นพดล เพียรเวช [3] และ [4] รายงานไว้ว่างานขุดในชั้นดินอ่อนเป็นงานที่ยากและมีความเสี่ยงเพื่อให้กำแพงกันดินมีเสถียรภาพการติดตั้งค้ำยันต้องดำเนินการให้ถูกต้องตามขั้นตอนของการขุดดิน มิใช่ขุดดินให้ลึกลงไปก่อนทีเดียวมาก ๆ แล้วจึงค่อยกลับมาติดตั้งค้ำยันทีละหลายๆชั้นพร้อมกัน การทำงานประเภทนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเฝ้าตรวจสอบและตรวจวัดพฤติกรรมของดินอย่างเป็นระบบซึ่งจะเป็นเครื่องเตือนภัยและลดการวิบัติได้อย่างมาก มีการวิบัติของบ่อขุดในหลายกรณีเนื่องจากมีการนำพื้นที่ข้างบ่อขุดไปใช้กองดินที่ขุดขึ้นมาหรือเกิดจากที่มีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ทำงานที่ข้างบ่อขุดโดยไม่ได้คำนวณเผื่อไว้ก่อน

สุรฉัตร [7] ให้ความเห็นว่าการขุดดินโดยใช้ Retaining Structure ไม่ว่าชนิดใดเป็นปัญหาที่คำนวณให้ถูกต้องได้ยากเพราะแรงดันดินขึ้นอยู่กับการเคลื่อนตัว ซึ่งวิธีการก่อสร้างมีผลกระทบมากการทำงานจึงต้องเห็นความสำคัญของเรื่อง Soil Instrumentation ในการวัดการเคลื่อนตัวของ Retaining Structure การถูกละเลยในเรื่องนี้อาจทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นได้

มนูญ [6] เห็นว่าการพังทลายของกำแพงกันดินส่วนใหญ่มักจะเกิดจากการละเลยไม่ตรวจวัดการเคลื่อนตัวหรือตรวจวัดแล้วก็ละเลยที่จะพิจารณาแก้ไข (โดยคิดว่าไม่เป็นอะไร) ก็จะพบกับการพลังทลายต่อมา

Puller [15] กล่าวว่าการวิบัติของกำแพงกันดินไม่จำเป็นต้องเกิดจากการวิบัติของโครงสร้างกำแพงเอง แต่การวิบัติมักจะเกิดจากการเอาเครื่องจักรมาทำงานข้างบ่อขุดซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักลงในชั้นดิน หรืออาจเกิดจากโครงสร้างชั่วคราว เช่น ระบบค้ำยันก่อสร้างไว้คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานไม่สามารถรับแรงดันของดินได้

William & Waite [17] รายงานว่าการวิบัติของงานขุดแบบมีค้ำยันมักมาจากการควบคุมระดับขุดดินแต่ละชั้นไม่เป็นไปตามขั้นตอนตามที่ออกแบบไว้ หรือระบบค้ำยันก่อสร้างไว้มีความแข็งแรงไม่พอเพียง

Lamb & Whitman [13] แนะนำว่าระบบค้ำยันเหล็กรูปพรรณโดยทั่วไปที่ออกแบบให้รับแรงอัดในแนวแกน ซึ่งความสามารถการรับแรงอัดในแนวแกนมีลักษณะเปราะบาง (Brittle) ต่อการวิบัติเมื่อค้ำยันเหล็กเกิดการโก่งงอ ดังนั้นไม่ควรออกแบบโดยวิธี Limit State Design เพราะหากส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบค้ำยันเกิดการโก่งงอแล้ว จะไม่สามารถรับแรงอัดได้เลยและจะทำให้ค้ำยันทั้งระบบอยู่ในสภาวะอันตรายต่อการวิบัติได้โดยง่าย

FitzSimons [9] ได้ศึกษาจากประวัติศาสตร์และเขียนเป็นรายงานให้นิติวิศวกร (Forensic Engineers) สมัยใหม่ทราบว่า แม้นแต่ในสมัยบาบิโลเนียน พระเจ้าฮัมมูราบี้มหาราช (Hammurabi, the great Babylonian King) ก็ได้หาทางป้องกันการวิบัติของสิ่งก่อสร้างด้วยการตรัสให้เป็นกฎหมายว่า “ถ้าผู้รับเหมารายใดก่อสร้างแล้วบ้านพังลงทำให้เจ้าของบ้านตาย ให้ประหารผู้รับเหมาคนนั้นเสีย แต่ถ้าทำให้ลูกของเจ้าของบ้านตาย ก็ให้ประหารลูกของผู้รับเหมา” (If a contractor builds a house and it collapse killing its owner, the contractor will be kill. If the son of the owner is killed, then so will be the son of the contractor)

Day, [8] ได้ศึกษาและบันทึกให้ทราบว่าในยุคสมัยของ นะโปเลียนมหาราช ในปี ค.ศ. 1804 ก็ได้ออกกฎหมายคล้ายๆกับสมัยบาบิโลเนี่ยนไว้เช่นกันว่า “ถ้าโครงสร้างใดๆ สูญเสียความสามารถในการใช้งานได้ภายในระยะเวลาสิบปีภายหลังการก่อสร้างเสร็จ อันเนื่องมาจากสาเหตุของฝีมือการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน หรือเกิดจากการวิบัติของฐานราก ให้นำผู้รับเหมางานก่อสร้างไปจำคุกเสีย (If a structure had a loss of within 10 years of its completion, due to poor workmanship or foundation failure, then the builder would be sent to prison.,

4. การวิบัติและข้อมูลเบื้องต้น

เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2540 ได้เกิดการวิบัติกับบ่อบำบัดน้ำเสียที่อยู่ในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง ผลของการวิบัติทำให้ผนังบ่อที่ก่อสร้างด้วยระบบ Diaphragm Wall หนา 1.00 เมตร ด้านทิศตะวันตกล้มคว่ำเข้าหาตัวบ่อและและดินอ่อนรอบบ่อได้ไหลพาเอาบ้านเรือนและเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่จอดอยู่ที่ริมขอบบ่อไหลลงกลบทับรถขุดอีกสองคันที่จอดอยู่ที่ก้นบ่อ

การวิบัติครั้งนั้นไม่มีผู้ใดถึงแก่ชีวิต เนื่องจากก่อนเกิดการวิบัติได้มีเสียงลั่นมาจากระบบค้ำยันอย่างต่อเนื่องทำให้ไม่มีผู้ใดกล้าลงไปทำงานในบ่อ ภายหลังการวิบัติผ่านไปได้ 1 วัน เจ้าของงานจึงได้เรียกผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ประกอบด้วย เจ้าของงาน ผู้ออกแบบ ผู้ควบคุมงาน ผู้ก่อสร้างกำแพงกันดินระบบ Diaphragm Wall และผู้รับจ้างขุดดินพร้อมติดตั้งระบบค้ำยันกำแพงเข้าร่วมประชุมเพื่อหาสาเหตุของการวิบัติและผลกระทบต่อเนื่อง

ผู้ที่อยู่ใกล้ชิดงานก่อนการวิบัติมากที่สุดคือผู้รับจ้างช่วงงานขุดดินและติดตั้งค้ำยันชั่วคราว จึงรับหน้าที่เป็นผู้รายงานสรุปเหตุการณ์ก่อนการวิบัติ และได้รายงานต่อที่ประชุมทราบเป็นข้อมูลเบื้องต้นทราบว่า บ่อขุดได้เกิดการวิบัติในขณะที่ได้ขุดดินและติดตั้งค้ำยันอย่างเป็นขั้นๆเป็นตอนตามแบบไปถึงระดับความลึกประมาณ 18 เมตร และขณะวิบัติได้สังเกตเห็นว่าด้านล่างของกำแพง Diaphragm Wall เคลื่อนตัวเข้ามาก่อนแล้วส่วนบนจึงวิบัติตาม

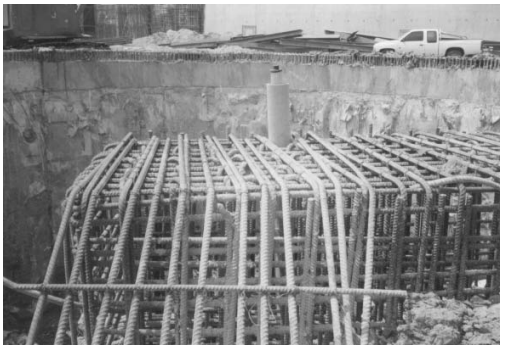
แต่ต่อมาผู้เกี่ยวข้องฝ่ายอื่นๆ พบว่ารายงานดังกล่าวขัดแย้งกับภาพที่ผู้ก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall ถ่ายไว้เมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2540 หนึ่งวันก่อนเกิดการวิบัติ เนื่องจากในภาพแสดงให้เห็นว่าระดับดินขุดลึกถึงระดับสุดท้ายคือที่ประมาณ 22 เมตรแล้ว และมีค้ำยันอยู่เพียง 7 ชั้น เมื่อทราบดังนั้นแล้วผู้ก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall จึงไม่ได้ถูกเรียกเข้าร่วมประชุมอีกต่อไป

5. การศึกษาจากภาพที่ถ่ายไว้ก่อนเกิดการวิบัติ

ในระหว่างที่ผู้รับเหมาช่วงขุดดินและติดตั้งระบบค้ำยันทำงานอยู่นั้น ผู้ก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall ได้มีการเข้าไปถ่ายภาพเป็นระยะๆ และพบสิ่งที่ควรได้รับการปรับปรุงหลายประการ คือ

ก) ผู้รับเหมาได้ทำความเสียหายต่อระบบเครื่องมือเตือนภัย Inclinometer รูปที่ 4 ที่ติดตั้งไว้ 2 ตำแหน่ง และไม่ได้รับการแก้ไขให้ใช้ได้ ทำให้เหลือตำแหน่งที่วัดได้เพียง 2 จุด ทำให้ระบบเตือนภัยไม่สามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันและกันได้โดยสมบูรณ์

รูปที่ 4 ท่อ Inclinometer ที่เสียหาย



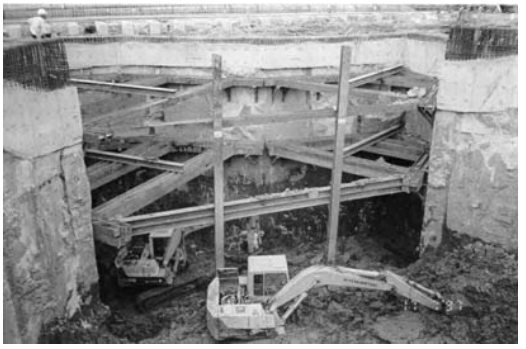
ข) มีการขุดดินที่ผิดลำดับขั้น กล่าวคือความจริงจะต้องขุดดินใน Inlet Chamber ให้ได้ความลึกถึงระดับติดตั้งเหล็กค้ำยันปลายเปิดของกำแพงส่วนวงกลมและติดตั้งค้ำยันชั้นดังกล่าวให้เสร็จก่อน แล้วย้อนกลับมาขุดดินใน Pumping Chamber ให้ได้ระดับเท่ากับค้ำยันที่ติดตั้งไว้ และทำการย้อนกลับไปขุดใน Inlet Chamber แล้วติดตั้งค้ำยันชั้นต่อไป ทำดังนี้ไปเรื่อยๆ จนถึงระดับสุดท้าย จะทำให้ค้ำยันรับแรง Compression ที่เกิดจาก Compression Hoop ที่เกิดขึ้นได้ แต่ในการก่อสร้างจริงผู้รับจ้างขุดดินไปขุดใน Pumping Chamber ลึกกว่าใน Inlet Chamber ตลอดเวลาก่อนการติดตั้งค้ำยันในแต่ละชั้นตามรูปที่ 5 ทำให้ไม่มีค้ำยันมารับ Compression ที่เกิดขึ้นที่ปลายเปิดของกำแพงส่วนวงกลมได้ ทำให้ส่วนบนของกำแพงเคลื่อนตัวเข้ามามากและแตกร้าวได้

ค) เกิดรอยร้าวขึ้นใน Capping Beam ตรงตำแหน่งที่ส่วนโค้งมาบรรจบกับเส้นมีการขุดดินเกินระดับลงไปมาก และใส่ค้ำยันไม่ทันตั้งแต่เริ่มงานขุดในระยะแรกๆ และ Waling Beam ที่ติดตั้งไว้ขาดความต่อเนื่องและไม่แนบสนิทกับผิว ตามรูปที่ 6

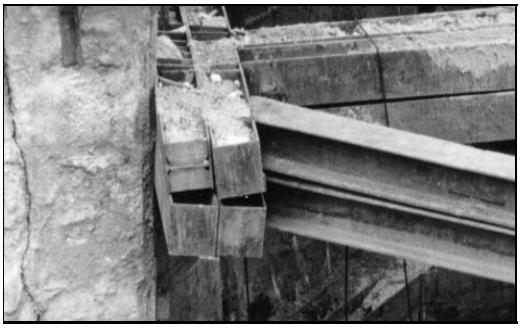
ง) Walling Beam และ Struts ซึ่งเป็นคานประกอบด้วยเหล็กหลายชิ้นประกอบเข้าด้วยกันประกอบไว้ไม่แน่นหนาพอเกิดการปริแยกออกจากกันเมื่อรับแรงอัดในบางตำแหน่ง ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงอย่างมาก ตามรูปที่ 7



รูปที่ 5 ขุดดินผิดขั้นตอนตั้งแต่เริ่มต้น [2]

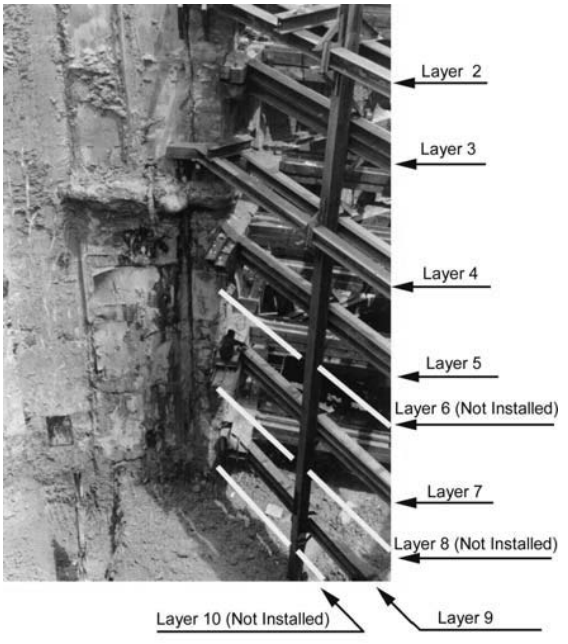


รูปที่ 6 ติดตั้งค้ำยันไม่ครบตามแบบ [2]



รูปที่ 7 คานประกอบค้ำยันเกิดการแยกตัว [2]

จ) เมื่อขุดดินได้ความลึกระดับสุดท้าย (22 เมตร) แล้วเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2540 ก่อนการวิบัติ 1 วัน คานค้ำยันรอง (Intermediate Struts) ยังได้ถูกติดตั้งถึง 3 ระดับคือ ระดับชั้นที่ 6, 8 และ 10 ตามรูปที่ 8



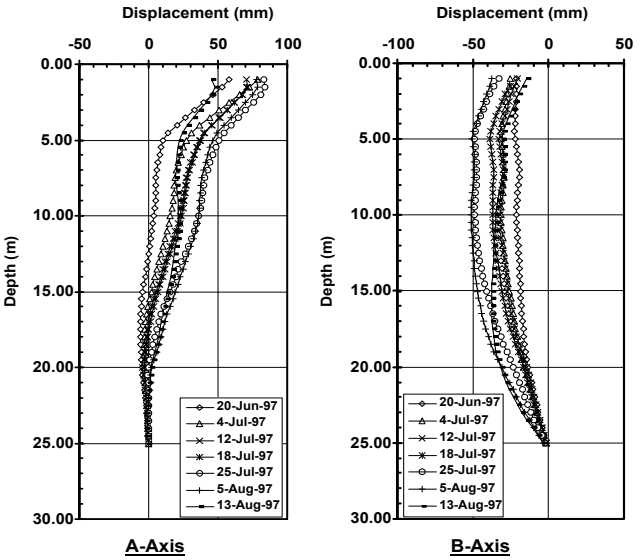
รูปที่ 8 ภาพถ่ายก่อนการวิบัติ 1 วัน
Teparaksa et al. [14]

ฉ) มีการเอารถเครนตีนตะขาบ มายืนทำงานข้างบ่อขุดใกล้กับตำแหน่ง Inclinometer ตำแหน่ง I-1 และมีการย้ายกองดินที่ขุดมาจากก้นบ่อในวันที่ 16 สิงหาคม 2546 ขึ้นมากองไว้ข้างบ่อด้านทิศตะวันตกที่พัง

6. ข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพงที่วัดได้จาก Inclinometers

เนื่องจากผู้รับจ้างทำงานก่อสร้าง Capping Beam ได้ทำ Inclinometer ตำแหน่ง I-1 และ I-2 เสียหาย และไม่มีการซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้อีก การวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงจึงกระทำได้เพียงสองตำแหน่งคือ I-3 และ I-4 เท่านั้น

จากการตรวจสอบข้อมูลจาก I-3 พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงในแนวแกน A ของ I-3 แสดงให้เห็นว่ากำแพงเคลื่อนตัวเข้าในลักษณะ Cantilever/Unsupported Condition รูปที่ 9 (ซ้าย) ในขณะที่การเคลื่อนตัวในแกน B แสดงให้เห็นว่ากำแพงเคลื่อนตัว ในลักษณะถูกค้ำยันไว้ (Supported) รูปที่ 9 (ขวา)



รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของกำแพงบ่อที่อ่านได้ จาก Inclinometer I-3 Teparaksa et al. [14]

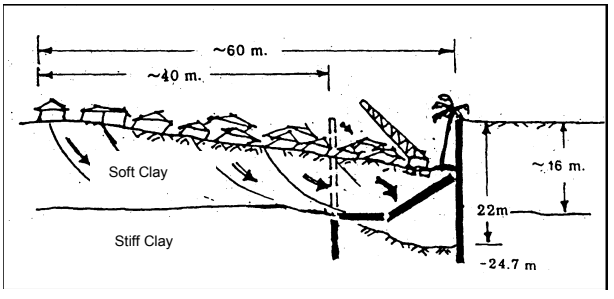
อย่างไรก็ตามจากข้อมูลการวัดที่ได้มา พบว่าการเคลื่อนตัวในแนวแกน A ถือว่ามีค่ามาก และด้วยเหตุนี้ดูเหมือนว่าคานค้ำยันเหล็กที่ค้ำยันปลายเปิดของกำแพงส่วนโค้งรับแรงอัดไม่ได้ผลเต็มที่ และการที่มีการเคลื่อนตัวสองลักษณะแตกต่างกันที่มุมของ Capping Beam ที่แนวกำแพงเส้นตรงบรรจบกับแนวกำแพงส่วนโค้ง แสดงว่าค้ำยันหลักที่ยันกำแพงส่วนเส้นตรงฝั่งทิศตะวันออกค้ำยันกำแพงได้ผลดี เพราะมีความยาวประสิทธิ์ผลสั้น ส่วนคานเหล็กที่ค้ำยันปลายเปิด อาจเกิดการโก่งงอขึ้นเมื่อรับแรงอัด เพราะไม่มีคานซอยยึดโยงในแนวระนาบทำให้ความยาวประสิทธิ์ผลในแนวระนาบยาวเป็น 2 เท่าของที่ออกแบบไว้เดิมจนเป็นสาเหตุทำให้การเคลื่อนตัวของกำแพงในแกนนี้เป็นแบบ Cantilever/Unsupported นั่นเอง

การเคลื่อนตัวต่างกันสองลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิด Torsion Stress ใน Capping Beam ตรงมุมทั้งสองได้ ซึ่งได้พบข้อสนับสนุนจากรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นใน Capping Beam ตรงตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวต่างกันทั้งสองจุดจริง ส่วนค่าการเคลื่อนตัวของ I-4 มีค่าสูงสุดเพียง 14 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวของปลายกำแพง (Toe) ไม่

สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจาก Inclinometer ไม่ได้ฝังต่อจากปลายกำแพงลงไปในดิน เมื่อมีการพบรอยร้าวที่ Capping Beam ผู้รับเหมาหลักได้รับการแจ้งเตือนให้ทำการซ่อมแซมและเร่งรัดการใส่ค้ำยันที่ยังขาดอยู่ให้เสร็จโดยเร็ว แต่ผู้รับเหมาหลักแก้ไขไม่ทันรอยร้าวเกิดเพิ่มมากขึ้นพร้อมกับเสียงลั่นในระบบค้ำยันดังขึ้นติดต่อกันไม่หยุด ซึ่งขณะนั้นความลึกของดินที่ถูกขุดออกใน Inlet Chamber ถึง 22 เมตรแล้ว

7. การวิบัติชนิดรุนแรง

บ่อเกิดวิบัติในตอนเช้าวันที่ 17 สิงหาคม 2540 ขณะวิบัติมีการใส่ค้ำยันไว้ยังไม่ครบ ยังขาดค้ำยันรองที่ระดับ 6, 8 และ 10 จากรูปที่ 8 จะสังเกตเห็นสภาพระบบค้ำยันภายในบ่อที่ถูกถ่ายไว้ 24 ชั่วโมงก่อนบ่อเกิดการวิบัติ หลังการวิบัติ ดินอ่อนนอกบ่อบีบตัวเข้าหาบ่อพาเอาบ้านเรือนข้างเคียงหลายหลังและรถเครนขนาด 40 ตันที่จอดอยู่ที่ปากบ่อเลื่อนไหลลงไปในบ่อ และดินอ่อนไหลอย่างต่อเนื่องจนกลบทับส่วนกำแพงที่วิบัติ, ระบบค้ำยันและรถขุดสองคันที่จอดอยู่ก้นบ่อ (รูปที่ 10 และ รูปที่ 11) ขณะที่กำแพงบางส่วนทางด้านทิศตะวันตกเกิดวิบัตินั้นปรากฏว่ากำแพงอีกสามด้าน ก็ยังตั้งอยู่ในตำแหน่งเดิมได้โดยไม่เสียหาย การวิบัติอย่างเฉียบพลันได้เกิดแรงกระชากเฉือน Capping Beam ในบริเวณนี้ขาดจนทำให้เกิดรอยแตกร้าวอย่างรุนแรงโดยทั่วไปและทำให้รอยต่อแผง Diaphragm Wall ส่วนที่เหลือใกล้กับจุดวิบัติถูกดึงอ้าออกด้วย นับว่ายังโชคดีที่การวิบัติครั้งนี้ไม่มีผู้ได้รับอันตรายจนถึงแก่ชีวิต ทั้งนี้เพราะมีเสียงดังลั่นเตือนมาจากระบบค้ำยันก่อนการวิบัติทำให้ไม่มีผู้ใดกล้าลงไปทำงาน



รูปที่ 10 ลักษณะพื้นที่ด้านนอกทรุดและไหลลงในบ่อหลังเกิดการวิบัติ จาก นพดล และคณะ 2542 [5]

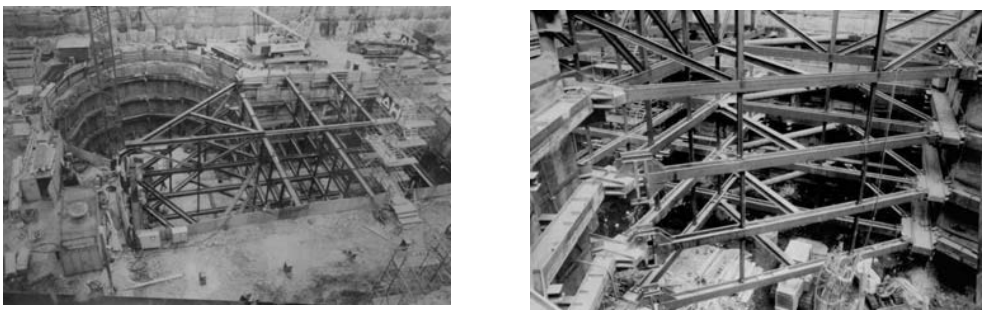


รูปที่ 11 ภาพถ่ายทางอากาศหลังเกิดการวิบัติ (จาก นสพ. เดลินิวส์)

8. การศึกษาภายหลังการวิบัติ

หลังการวิบัติฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานบ่อบำบัดได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการวิบัติครั้งนี้ โดยได้ตั้งสมมุติฐานเบื้องต้นถึงชนวนของการวิบัติไว้ 3 ประเด็นคือ (1) เกิดจากรูปทรงที่ไม่เหมาะสมของบ่อขุด (2) เกิดจากการวิบัติของ Diaphragm Wall และ (3) เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนของงานขุดและติดตั้งค้ำยันชั่วคราว

8.1.กรณีรูปทรงของบ่อบำบัด น่าจะตัดออกไปได้เพราะเคยมีตัวอย่างการก่อสร้างงานโครงสร้างใต้ดินของอาคารขุดลึกประมาณ 20.00 เมตร โดยมีขนาดและรูปทรงคล้ายๆ กัน (รูปที่ 12 ซ้ายมือ) ก่อสร้างแล้วเสร็จโดยไม่มีปัญหาที่ Frankfurt, Germany รายงานไว้โดย Katzenbach, et al. [12] และมีการจัดระบบค้ำยันคล้ายกับบ่อบำบัดที่วิบัตินี้ด้วย แต่มีการติดตั้งคานซอยยึดโยงคานขวางไว้ทำให้คานขวางแข็งแรงมากขึ้น (รูปที่ 12 ขวามือ)



รูปที่ 12 การก่อสร้างส่วนใต้ดินที่มีรูปทรงลักษณะคล้ายกับบ่อที่วิบัติ [11]

8.2. ส่วนกรณี Diaphragm Wall ได้มีหลักฐานว่าชนวนการวิบัติไม่ได้เกิดจาก Diaphragm Wall จากรายงานของ นพดล เพียรเวช และมั่น ศรีเรืองรอง [5] กล่าวว่าในการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อบำบัดใหม่ในที่เก่าพบว่าปลาย (Toe) ของกำแพงส่วนที่พังทลายยังอยู่ในตำแหน่งเดิมโดยกำแพงหักพังล้มเข้าหาส่วนกลางของบ่อมิได้เกิดวิบัติในลักษณะที่เกิด Sliding ทะลุลอดใต้ Toe ของกำแพงคอนกรีตแต่อย่างใด นอกจากรายงานนี้แล้ว.ในขณะที่ขุดดินก่อสร้างบ่อใหม่ในที่เดิมยังพบว่ากำแพงส่วนที่เหลือของบ่อเดิมอีกสามด้าน ยังตั้งอยู่ได้ในตำแหน่งเดิมแม้ว่าระบบค้ำยันจะพังไปหมดแล้ว

8.3.ความสำคัญของขั้นตอนการขุดดินและการติดตั้งค้ำยันมีรายงานไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ได้มีเหตุบ่งชี้และสนับสนุนถึงสมมุติฐานที่ว่าการวิบัติเกิดจากความผิดพลาดของงานขุดดินและติดตั้งค้ำยันชั่วคราว จากผลของการวิเคราะห์ด้วย FEM โดย Kanak - Nukulchai, et al. [11] ได้สรุปว่าคานค้ำยันหลักที่ค้ำในแนว A – B กับแนว A - C (ในรูปที่ 2) นั้นรับแรงเกินกว่ากำลังของหน้าตัดคานไปเป็นอย่างมาก อาจทำให้เกิดการโก่งเดาะขึ้นในชิ้นส่วนย่อยๆ ก่อนที่การวิบัติจะแพร่ขยายออกไปในโครงสร้างส่วนอื่นๆ ข้อสรุปดังกล่าวมีความสอดคล้องกับภาพถ่ายที่บันทึกไว้หนึ่งวันก่อนเกิดการวิบัติ (รูปที่ 5) ว่าได้เกิดการปริแยกตัวจากกันของชิ้นส่วนคานประกอบ (Built Up Section) อันทำให้กำลังของหน้าตัดคานค้ำยันลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นแล้วคานในแนวนี้ไม่มีคานซอยยึดโยง เมื่อรับแรงสูงมากจะโก่งงอในแนวระนาบจนไม่สามารถรับแรงอัดตามแนวแกนได้เลย นอกจากนั้นแล้วในขณะเกิดเหตุวิบัติคานค้ำยันรองสามระดับสุดท้ายก็ยังไม่ได้ทำการติดตั้ง(รูปที่ 8) ความบกพร่องในการจัดการ

ระบบค้ำยันชั่วคราวนี้มีส่วนทำให้ Capping Beam เกิด Torsion Stress จนแตกร้าว ยิ่งไปกว่านั้นการเคลื่อนตัวของกำแพงที่วัดได้จาก A-axis ของ I-3 พฤติกรรมของกำแพงอยู่ใน Cantilever Mode ซึ่งไม่สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าในขณะออกแบบ แสดงให้เห็นถึงความไม่มีประสิทธิภาพของระบบค้ำยันชั่วคราวที่ติดตั้งไว้ และรอยร้าวใน Capping Beam ยังเป็นสิ่งที่ยืนยันว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงในแกน A-Axis ของ I-3 เป็นแบบ Cantilever Mode

9. ข้อสรุปและข้อแนะนำที่ได้จากกรณีศึกษานี้

จากกรณีศึกษานี้สามารถสรุปเป็นอุทาหรณ์และข้อเสนอแนะดังนี้ คือ

งานขุดดิน – ติดตั้งค้ำยันเป็นงานที่มีความเสี่ยงภัยต่อการวิบัติชนิดรุนแรงสูง ดังนั้นเพื่อป้องกันการวิบัติ ผู้เกี่ยวข้องต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง อย่าทำงานแบบมีการลัดขั้นตอน เพราะการก่อสร้างอย่างผิดขั้นตอนและการมองข้ามปัญหาต่างๆ แม้เป็นเพียงปัญหาที่เห็นว่าเล็กน้อย แต่ปัญหาดังกล่าวก็อาจจะลุกลามทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงติดตามมาอย่างชนิดคาดคิดไม่ถึงได้ และการดำเนินงานควรให้ความสำคัญเรื่องในหัวข้อต่อไปนี้ไว้ด้วย คือ

9.1 อย่ามองข้ามความสำคัญของ Geotechnical Instrumentation และต้องให้ความสำคัญต่อระบบค้ำยันชั่วคราวให้เท่ากับหรือมากกว่าโครงสร้างถาวร และต้องติดตั้งระบบค้ำยันตามขั้นตอนที่ออกแบบไว้อย่างเคร่งครัด

9.2 ต้องมีการยึดโยงระบบค้ำยันชั่วคราวเหล็กไม่ให้เกิดการโก่งงอทั้งสองแกน เพราะเมื่อเกิดการโก่งเดาะแล้วจะเสี่ยงต่อการวิบัติได้สูง

9.3 การออกแบบระบบค้ำยันด้วยเหล็กรูปพรรณ อย่าออกแบบโดยวิธี Limit State Design เพราะเสี่ยงต่อการวิบัติได้โดยง่าย

9.4 อย่านำเครื่องจักรหรือนำดินที่ขุดจากในบ่อมากองไว้ข้างบ่อเป็นอันขาด หากจำเป็นต้องกองไว้หรือยืนบนนั่งร้าน (Platform)

9.5 ผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับงานขุดดิน – ติดตั้งค้ำยันต้องใช้ความรู้ทั้งด้านวิศวกรรมโครงสร้าง และวิศวกรรมปฐพีอย่างพอเพียงควบคู่กันไป และในงานประเภท Design & Build ต้องพิจารณาเลือกบุคคลากรที่มีประสบการณ์สูงพอทั้งในงานออกแบบ และงานก่อสร้างในสนาม

9.6 และข้อสุดท้าย ควรมีการบันทึกภาพการก่อสร้างเก็บไว้เป็นระยะ ๆ ทุกขั้นตอนของการก่อสร้าง เพราะจากภาพถ่ายจะสามารถเห็นความผิดพลาดของงานได้ดีจนสามารถแก้ไขได้ทัน หรือหากเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดเกิดขึ้นจะสามารถพบข้อผิดพลาดจากภาพถ่ายต่างๆ ได้ไม่ยาก

เอกสารอ้างอิง

1) ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2540) การวิบัติในขั้นตอนการขุดดินและติดตั้งค้ำยันภายในบ่อ Inlet Pumping Station ที่หน่วยงานก่อสร้างโรงบำบัดน้ำเสีย ถนนพระรามที่ 3 เขตยานนาวา เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2540 รายงานภายในของบริษัท ซีฟโก้ จำกัด พฤศจิกายน 2540

2) ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (2543) บทเรียนจากการวิบัติของบ่อบำบัดน้ำเสียยานนาวา การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 6 จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิตร่วมกับสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ ชะอำ เพชรบุรี 2543 หน้า GEN-19 ถึง GEN - 26

3) นพดล เพียรเวช (2534) การออกแบบและข้อจำกัดของระบบกำแพงกันดินแบบต่างๆ. การสัมมนาทางวิชาการเรื่องงานฐานรากและการก่อสร้างใต้ดินจัดโดย ว.ส.ท. กุมภาพันธ์ 2534. ณ. โรงแรมเอเชีย กรุงเทพมหานคร หน้า 1/1 ถึง 1/26.

4) นพดล เพียงเวช (2539) หลักการพิจารณาออกแบบและก่อสร้างงานขุดดินอ่อนด้วยกำแพงกันดินค้ำยัน. การสัมมนาทางวิชาการเรื่องงานก่อสร้างใต้ดิน 39. จัดโดย ว.ส.ท. กันยายน 2539.

5) นพดล เพียรเวช และมั่น ศรีเรืองรอง (2542) การก่อสร้างแก้ไขบ่อสูบน้ำเสียโรงบำบัดน้ำเสียยานนาวา. โยธาสาร มกราคม - มีนาคม 2542 หน้า 42

6) มนูญ อารยะศิริ (2540), ข้อคิดจากประสบการณ์งานวิศวกรรมปฐพี, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2540, จัดโดย ว.ส.ท.

7) สุรฉัตร สัมพันธารักษ์ (2540). ข้อควรระวังสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีในยุคนี้. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2540 จัดโดย ว.ส.ท. พฤศจิกายน 2540 หน้า 121 ถึง 125.

8) Day, R.W. (1998) Forensic Geotechnical and Foundation Engineering. McGraw – Hill. Pp1

9) FitzSimons, N. (1986) W "An Historic Perspective of Failure of Civil Engineering Works." Forensic Engineering, Learning from Faikures. ASCE, New York. Pp 38-45

10) Irvine, D.J. & Smith, R.J. (1992). Trenching Practice. CIRIA. Report 97.

11) Kanok - Nukulchai, W. & Phien - Wej, N. (1998). Investigation on Collapse of an Inlet Pumping Station - Looking into Modeling, Design and Construction Considerations. ACECOMS News and Views, July - September 1998. AIT.

12) Katzenbach, R., Moorman, C. & Quick, H. (1998). A New Concept for the Excavation of Deep Building Pits in inner Urban Areas Combining Top/Down Method and Piled - Raft Foundation., 7th Intl. Conference and Exhibition on Pile and Deep Foundation(DFI), Vienna, Austria.

13) Lamb, T. W. & Whitman, R. V. (1979). Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.

14) Padfield, C. J., Mair, R. J. (1984).Design of Retaining Walls Embedded in Stiff Clay.CIRIA report 104.

15) Puller, M. (1996). Deep Excavation, A Practical Manual. Thomas Telford.

16) Teparaksa, W., Thasnanipan, N., Muang, A. W. & Tanseng, P. (1999). Lesson on the collapse of an Inlet Pumping Station during Construction - Geotechnical Instrumentation Aspect. 5th Intl. Symposium on Field Measurements in Geomechanics. 1 - 3 December 1999., Singapore.

17) William B. P. & Waite, D. (1993). The Design and Construction of Sheet Piled Cofferdam. CIRIA. Special Publication 95. Thomas Telford.

พฤติกรรมของกำแพงพืดกันดินอย่างบางชนิดขุด-หล่อในที่โครงการอาคารจอดรถใต้ดินในกรุงเทพฯ

PERFORMANCE OF THIN DIAPHRAGM WALL FOR UNDERGROUND CAR PARK IN BANGKOK

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ (Chanchai Submaneewong)
วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด E-mail : seafco@seafco.co.th

ซอว์ ซอว์ เอย์ (Zaw Zaw Aye)
ผู้จัดการโครงการ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด E-mail : seafco@seafco.co.th

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)
วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด E-mail : seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ : โครงการอาคารลานจอดรถชั้นใต้ดิน 2 ชั้น ตั้งอยู่ในพื้นที่ประวัติศาสตร์ ในบริเวณเกาะรัตนโกสินทร์ ในส่วนของงานขุดดินเพื่อก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินได้ออกแบบโดยใช้ระบบกำแพงกันดิน Diaphragm Wall หนา 0.60 เมตร ด้านแรงดันดิน โดยมีระบบค้ำยันช่วยในการถ่ายแรง ในการออกแบบพฤติกรรมของกำแพงต้องกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างซึ่งได้แก่ งานขุดดินและงานก่อสร้างระบบค้ำยันที่เหมาะสม สามารถทำการก่อสร้างได้ ซึ่งมีผลต่อการออกแบบตัวกำแพง Diaphragm Wall โดยในการออกแบบนอกจากจะคำนึงถึงความสามารถในการรับแรงได้แล้วต้องคำนึงถึงการเคลื่อนตัวของกำแพงให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นในระหว่างก่อสร้างจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบพฤติกรรมของกำแพง Diaphragm โดยติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของกำแพง ซึ่งได้แก่ Inclinometer เพื่อสอบทานความถูกต้องในการออกแบบ บทความนี้นำเสนอผลการตรวจสอบพฤติกรรมในตัวกำแพงและการประยุกต์ขั้นตอนการก่อสร้างโดยการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนงานขุดดิน ซึ่งแตกต่างจากที่กำหนดในการออกแบบเดิมโดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดพฤติกรรมของกำแพงในระหว่างการก่อสร้างเป็นบรรทัดฐาน

ABSTRACT: For construction of the two-level underground car park building, located in the center of Rattanakosin Island, 0.60 m thick diaphragm walls with temporary bracing were designed to resist soil pressure and to keep soil movement in acceptable value. Contractor needs to have thorough site preparation and proper plan to minimize adverse effect induced by construction on adjacent historical structure. This paper presents the geotechnical aspect of the construction of underground car park building located in the culturally and historically significant area of Bangkok. Performance of buttressed-support diaphragm wall is reported based on the inclinometer monitoring results. Intensive modification of construction sequence in actual work execution with “value engineering options” different from tender stage design is demonstrated along with application of observational method.

KEYWORDS: DIAPHRAGM WALL, INCLINOMETER, UNDERGROUND CONSTRUCTION

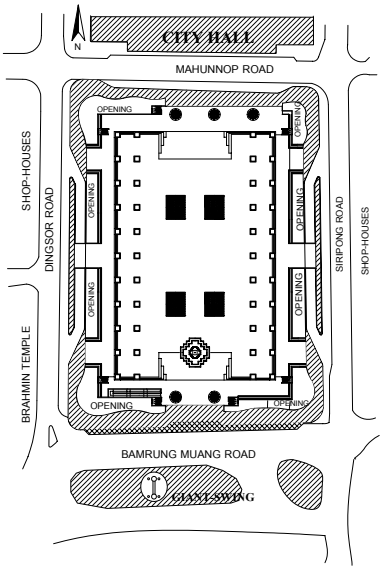
1. บทนำ

โครงการอาคารลานคนเมือง หน้าศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร ประกอบด้วย ลานเอนกประสงค์บนดิน และลานจอดรถชั้นใต้ดิน 2 ชั้น ตั้งอยู่หน้าศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร ถนนดินสอ โดยมีพื้นที่ประมาณ 9 ไร่เศษ ด้านทิศเหนือเป็นศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร ด้านทิศใต้เป็นที่ตั้งของเสาชิงช้าและวัดสุทัศน์วนาราม ด้านทิศตะวันตก เป็นเทวสถาน (โบสถ์พราหมณ์) ทิศตะวันออกเป็นอาคารพักอาศัยเก่า โครงการเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วมีชั้นใต้ดินสองชั้นจอดรถยนต์ได้ 560 คัน รถจักรยานยนต์ได้ประมาณ 150 คัน ระดับพื้นชั้นหลังคาเป็นลานเอนกประสงค์เพื่อประกอบกิจกรรมต่างๆของทางราชการและประชาชนได้เช่นเดิม ตามรูปที่ 1

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างอาคารจอดรถได้ออกแบบให้ใช้ Diaphragm Wall เป็นกำแพงกันดินถาวรโดยรอบ และเพื่อลดผลกระทบสำหรับปัญหาเรื่องที่จอดรถในระหว่างการก่อสร้างให้น้อยที่สุด ในการออกแบบก่อสร้างจึงกำหนดให้แบ่งการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินเป็น 2 โซน เพื่อแบ่งเป็นที่จอดรถชั่วคราวและพื้นที่ก่อสร้างอีกครึ่งหนึ่ง ภายหลังการก่อสร้างอาคารครึ่งแรกแล้วเสร็จก็ทำการย้ายไปก่อสร้างอีกฝั่งโดยใช้อาคารครึ่งแรกเป็นที่จอดรถชั่วคราวแทน โซนการก่อสร้างแบ่งโดยใช้เสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) ความยาว 14 เมตร เป็นกำแพงกันดินชั่วคราวในงานขุดดินทีละส่วน

2. ลักษณะชั้นดิน

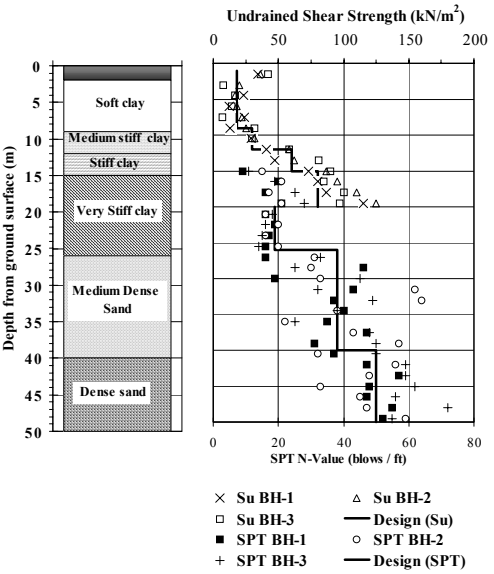
โครงการนี้ได้กำหนดให้ทำการเจาะสำรวจดินทั้งหมด 3 หลุมคือ BH-1, BH-2 และ BH-3 เพื่อวิเคราะห์ชั้นดินสำหรับใช้ในงานออกแบบ โดยผลการเจาะสำรวจ พบว่าชั้นดินบริเวณโครงการโดยทั่วไปประกอบด้วยพื้นอิฐบล็อค / ทรายและหินคลุกถมหนา 0.8 – 1.5 เมตร วางทับชั้นดินเหนียวปนทรายแป้งแข็งปานกลางจนถึงความลึก 2.5 เมตร ถัดจากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลางจนถึงความลึกประมาณ 13.8 เมตรจึงพบชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก หนาประมาณ 15.0 เมตร ถัดจากนั้นจะพบชั้นทรายแน่นปานกลางจนถึงแน่นมากเป็นชั้นสุดท้ายจนสิ้นสุดความลึกของหลุมเจาะสำรวจที่ความลึกประมาณ 50.0 เมตร ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ผังแสดงที่ตั้งของอาคารจอดรถใต้ดินหน้าศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร

3. งานออกแบบ

เนื่องจากโครงสร้างใต้ดินโครงการนี้เป็นการก่อสร้างใกล้กับพื้นที่ๆมีความสำคัญหลายจุดคือ ดังได้กล่าวข้างต้น การก่อสร้างจะต้องส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงน้อยที่สุด ในรูปที่ 1 แสดงผังการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน



รูปที่ 2 ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการ

ในงานขุดดินเพื่อก่อสร้างอาคารจอดรถ นอกจากจะต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงและเสถียรภาพของระบบป้องกันดินพังแล้ว จะต้องคำนึงถึงการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นด้วย สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบมีดังนี้

3.1 ระบบกำแพงป้องกันดินพัง

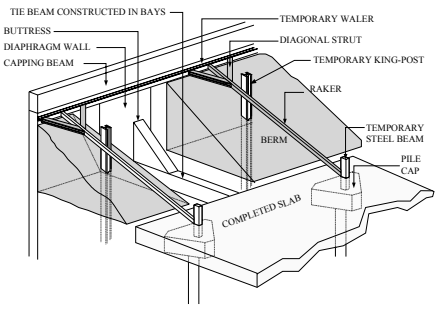
กำแพงกันดินแบบแข็ง (Rigid retaining wall) คือ กำแพงกันดินแบบเจาะ-หล่อในที่ (Diaphragm wall) ถูกนำมาใช้ในโครงการนี้ เพื่อให้การเคลื่อนตัวของดินเกิดขึ้นน้อยที่สุด แม้ว่างานขุดดินจะมีความลึกเพียง -6.0 ม. นอกจากนี้การก่อสร้าง Diaphragm wall จะไม่เกิดเสียงรบกวนมากและแรงสั่นสะเทือนต่อโครงสร้างข้างเคียงน้อยกว่าการใช้กำแพงเสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet pile) อีกด้วย

3.2 ระบบค้ำยัน

ระบบค้ำยันเป็นปัจจัยควบคุมเสถียรภาพของงานขุดดิน รวมถึงการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นรอบๆกำแพงกันดินอีกด้วย ความแข็งแรงของกำแพงกันดิน ถ้ากำแพงกันดินเป็น D-wall สามารถใช้ระยะห่างของระดับค้ำยันมากกว่าเมื่อใช้กำแพงกันดินแบบ Sheet pile ดังนั้นการค้ำยันระหว่าง D-wall vs D-wall (ทิศตะวันออก-ตะวันตก) จะใช้การค้ำยัน 1 ชั้น, D-wall vs sheet pile ใช้ค้ำยัน 1 ชั้นระหว่างกำแพง 2 ประเภท และค้ำยันเอียงระหว่าง sheet pile กับพื้น , ค้ำยันเอียง 1 ชั้นระหว่าง D-wall กับพื้น (ทิศเหนือ)

3.3 ขั้นตอนการขุดดิน

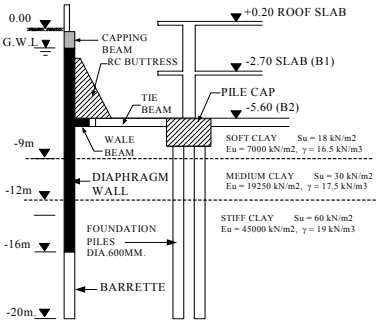
การขุดดินในโครงการนี้จะต้องรบกวนต่อโครงสร้างข้างเคียงให้น้อยที่สุด ซึ่งการขุดดินรูปแบบสร้างกองดิน (Berm) สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้หลุมเจาะและลดการเคลื่อนตัวของดินได้ สำหรับการเปิดหน้าดินเพื่อก่อสร้างคานค้ำยัน (Tie beam) และครีบ (Buttresses) ของกำแพง D-wall จะทำการเปิดหน้าดินเป็นบางพื้นที่และทิ้ง Berm ไว้บางส่วน โดยมีจุดประสงค์เพื่อรักษาเสถียรภาพของงานขุดดินในส่วนที่ยังไม่ทำการก่อสร้างและลดขอบเขตของการเคลื่อนตัวของดินให้อยู่ในพื้นที่จำกัด นอกจากนี้เมื่อขุดดินถึงระดับสุดท้าย (-6.0 ม.) จะทำการเทคอนกรีตหยาบหนา 0.1 ม. ติดกับกำแพงกันดินเพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การใช้ค้ำยันเอียงกับ D-wall , Berm และครีบคอนกรีต (Buttress) ในการรับแรง

3.4 โครงสร้างถาวร

โครงสร้างถาวรของอาคารจอดรถใต้ดินนี้ไม่ออกแบบให้พื้นชั้นหลังคาและ B1 รับแรงจากกำแพงกันดิน พฤติกรรมของกำแพงกันดินจึงเป็นแบบคานยื่น (Cantilever) โดยมีครีบกำแพง (Buttress) และดินที่ใช้จัดสวนจำลอง (Landscape) ช่วยในการรับแรงดันดินและช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างถาวรของอาคารจอดรถใต้ดิน

3.5 การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ก่อนทำการก่อสร้างจะต้องทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นต่อกำแพงกันดิน แรงในคานเหล็ก (Wale beam) แรงในค้ำยัน (Strut) และการเคลื่อนตัวของดินรอบๆกำแพง หลักการในการวิเคราะห์ จะใช้การคำนวณโดยใช้พื้นฐานของ Finite element โดยข้อมูลดินที่ใช้ ขนาด-ความลึกของกำแพงกันดิน ระดับของค้ำยัน ขั้นตอนการก่อสร้างและระดับของงานขุดดินที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องสอดคล้องกับข้อมูลของโครงการ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำไปใช้ประกอบในการเฝ้าระวังขณะก่อสร้างและตรวจสอบความปลอดภัยของงานก่อสร้าง

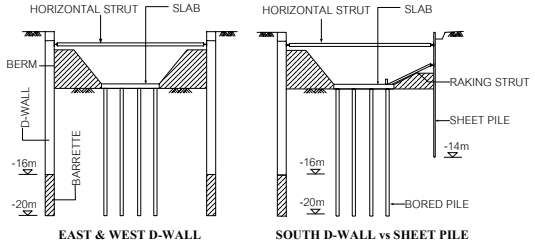
4.งานก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน

อาคารจอดรถใต้ดินนี้ใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเจาะ-หล่อในที่ (Diaphragm wall) ความหนา 0.60 ม. ลึกเท่ากับ -16.0 ม. โดยมีครีบต้านกำแพง (Buttress) ยึดด้านในกำแพง และมีเสาเข็มเหลี่ยมขนาด 0.6x1.0 ม. ใต้กำแพงกันดินโดยมีปลายเสาเข็มที่ -20.0 ม. เป็นช่วงๆ สำหรับฐานรากเสาเข็มเพื่อรับพื้นจอดรถจะใช้เสาเข็มเจาะระบบแห้งขนาด 0.60 ม. ปลายเสาเข็มอยู่ที่ -20.0 ม. การก่อสร้างจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การก่อสร้างอาคารจอดรถส่วนที่ 1

การก่อสร้างในส่วนนี้อยู่ด้านติดวัดสุทัศน์วนารามโครงสร้างในส่วนนี้ประกอบด้วย (ตามรูปที่ 5)

- ก่อสร้างกำแพง Diaphragm wall+buttress 3 ด้าน
- ใช้เสาเข็มพืดเหล็กในด้านต่อเชื่อมกับงานก่อสร้างส่วนที่ 2
- ใช้ค้ำยัน 1 ชั้นในทิศตะวันออก-ตะวันตก (D-wall vs D-wall) ทำการขุดโดยทิ้งกองดิน (Berm) ไว้ (รูปที่ 7)
- ใช้ค้ำยันแนวราบ 1 ชั้นในทิศเหนือ-ใต้ (D-wall vs sheet pile) ทำการขุดโดยทิ้งกองดิน (Berm) ไว้ และทำค้ำยันเอียง (Raker) ระหว่าง Sheet pile กับพื้นอีก 1 ชั้น (รูปที่ 6)



รูปที่ 5 การขุดดินก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินส่วนที่ 1



รูปที่ 6 การค้ำยัน Sheet pile ใช้ค้ำยัน 2 ชั้น สำหรับกำแพงชั่วคราวระหว่างการก่อสร้างส่วนที่ 1 และ 2



รูปที่ 7 การค้ำยัน D-wall ใช้ค้ำยัน 1 ชั้น ร่วมกับการใช้ Berm และ Buttress

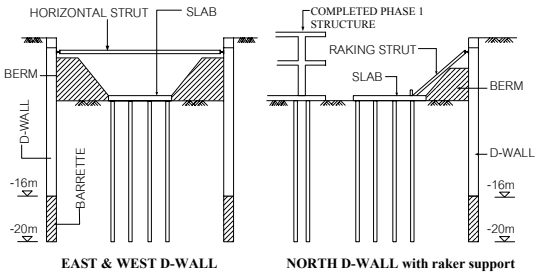
ตารางที่ 2 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างในส่วนที่ 1

ขั้นตอน	ด้าน ตะวันออก-ตะวันตก (D-wall vs D-wall)	กำแพงด้าน เหนือ-ใต้ (D-wall vs sheet pile)
1	ขุดดินถึงระดับ -2.2 ม. และทำการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว (1st layer)	ขุดดินถึงระดับ -2.2 ม. และทำการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว (1st layer)
2	ขุดดินถึงระดับ -4.0 ม.	ขุดดินถึงระดับ -4.0 ม. และติดตั้งค้ำยันเอียงชั่วคราว (2nd layer)
3	ขุดดินถึงระดับ -6.0 ม. โดยใช้ Berm	ขุดดินถึงระดับ -6.0 ม. โดยใช้ Berm
4	ขุด Berm ออก	ขุด Berm ออก
5	ก่อสร้างครีบและถอดค้ำยันชั่วคราวออก	ก่อสร้างครีบและถอดค้ำยันชั่วคราวออก

4.2 การก่อสร้างอาคารจอดรถส่วนที่ 2

การก่อสร้างในส่วนนี้อยู่ด้านติดศาลาว่าการกทม. โครงสร้างในส่วนนี้ประกอบด้วย (ตามรูปที่ 8)

- ก่อสร้างกำแพง Diaphragm wall+buttress 3 ด้าน
- ใช้ค้ำยัน 1 ชั้นในทิศตะวันออก-ตะวันตก (D-wall vs D-wall) ทำการขุดโดยทิ้งกองดิน (Berm) ไว้ (รูปที่ 7)
- ใช้ค้ำยันเอียง (Raker) 1 ชั้นในกำแพงด้านเหนือ ทำการขุดโดยทิ้งกองดิน (Berm) ไว้ (รูปที่ 9) ซึ่งการขุดดินจนถึงระดับสุดท้าย (-6.0 ม.) จะต้องเปิดหน้าดินเป็นช่วงๆ



รูปที่ 8 การขุดดินก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินส่วนที่ 2



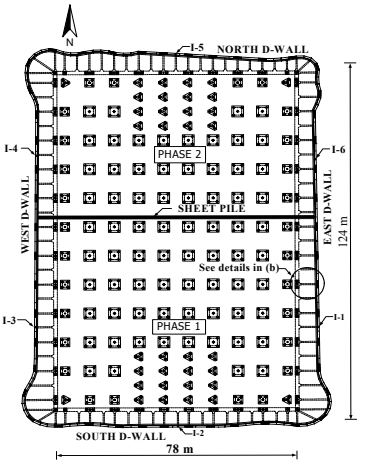
รูปที่ 9 การค้ำยัน D-wall ใช้ค้ำยันเอียง (Raker) 1 ชั้น ร่วมกับการใช้ Berm สำหรับกำแพงด้านเหนือ (ส่วนที่ 2)

ตารางที่ 2 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างในส่วนที่ 2

ขั้นตอน	ด้าน ตะวันออก-ตะวันตก (D-wall vs D-wall)	กำแพงด้าน เหนือ (D-wall vs footing)
1	ขุดดินถึงระดับ -2.2 ม. และทำการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว (1st layer)	ขุดดินถึงระดับ -2.2 ม. และ -6.0 ม. โดยใช้ Berm
2	ขุดดินถึงระดับ -4.0 ม.	ติดตั้งค้ำยันเอียงชั่วคราว Raker (1st layer)
3	ขุดดินถึงระดับ -6.0 ม. โดยใช้ Berm	ขุด Berm ออก
4	ขุด Berm ออก	ก่อสร้างครีบและถอดค้ำยันชั่วคราวออก
5	ก่อสร้างครีบและถอดค้ำยันชั่วคราวออก	-

5. การเฝ้าระวังขณะทำการก่อสร้าง

การเฝ้าระวังในขณะก่อสร้างมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของงานก่อสร้างและประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างข้างเคียง ซึ่งขั้นตอนการก่อสร้างสำหรับโครงการนี้ที่จะต้องใช้ความระมัดระวังมากเป็นพิเศษคืองานขุดดิน การเฝ้าระวังสามารถทำได้โดยติดตั้งเครื่องมือวัดความเอียง (Inclinometer) รอบๆกำแพงกันดินจำนวน 6 จุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตำแหน่งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

ผลที่ได้จาก Inclinometer จะแสดงค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ระดับความลึกต่างๆ ขณะทำการก่อสร้างจะต้องทำการเปรียบเทียบผลจาก Inclinometer กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพและความปลอดภัยของงานก่อสร้าง

5.1 ระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level)

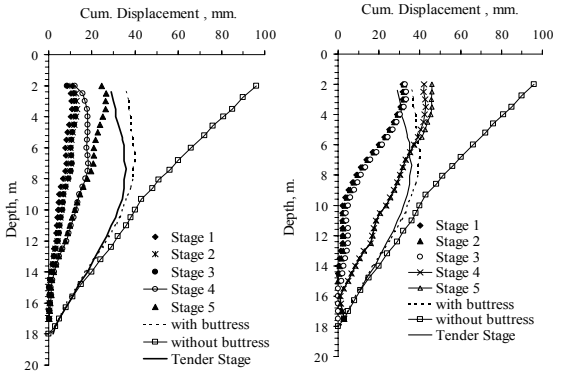
ในการขุดดินซึ่งมีการติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ เช่นติดตั้ง Inclinometer วัดการเคลื่อนตัวของกำแพง เพื่อสอบทานค่าการออกแบบกับค่าที่วัดได้จริงในสนาม ต้องกำหนดระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level) เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการควบคุมงาน โดยกำหนดเป็น 3 ระดับ [1] คือ

- Alert Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 70 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายต้องทำการตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้าง
- Alarm Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 80 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องต้องปรึกษากับผู้ออกแบบเพื่อความมั่นใจว่าระบบการก่อสร้างมีความปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างข้างเคียง
- Action Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 90 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ต้องหยุดการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยและผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงอย่างละเอียด

5.2 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

รูปที่ 11 แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในแต่ละด้าน ในส่วนที่ 1 (Phase 1) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งในกรณีที่มีครีบ (Buttress) และไม่มีครีบ จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวของกำแพง D-wall ด้านตะวันออก ซึ่งติดตั้งค้ำยันระหว่าง D-wall vs D-wall มีพฤติกรรมคล้าย Simple support beam ในขณะที่การเคลื่อนตัวของกำแพงฝั่งใต้ซึ่งติดตั้งค้ำยันระหว่าง D-wall vs sheet pile จะมีพฤติกรรมคล้าย Cantilever beam และมีการเคลื่อนตัวมากกว่ากำแพงฝั่งตะวันออก เนื่องจากกำแพงฝั่งนี้ค้ำยันกับ Sheet pile ซึ่งมีค่าความแข็ง (Stiffness) ต่ำกว่าค่าของ D-wall [2] ในรูปที่ 12 แสดงการก่อสร้างในส่วนที่ 1

ในส่วน (Phase) ที่ 2 (รูปที่ 13) การเคลื่อนตัวของกำแพง D-wall ด้านตะวันออก ซึ่งติดตั้งค้ำยันระหว่าง D-wall vs D-wall จะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างน้อยกว่ากำแพงด้านเหนือซึ่งใช้ Raker 1 ชั้น เนื่องการติดตั้ง Raker ใช้เวลานาน การที่ให้ Berm รับแรงจากกำแพงกันดินเพียงอย่างเดียวส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวในช่วงแรกสูง เมื่อติดตั้ง Raker ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินได้ลดต่ำลงทำให้การเคลื่อนตัวเกิดขึ้นสูงกว่าการใช้ค้ำยันในแนวราบ [2] ซึ่งโครงสร้างอาคารที่เสร็จสมบูรณ์ได้แสดงในรูปที่ 14

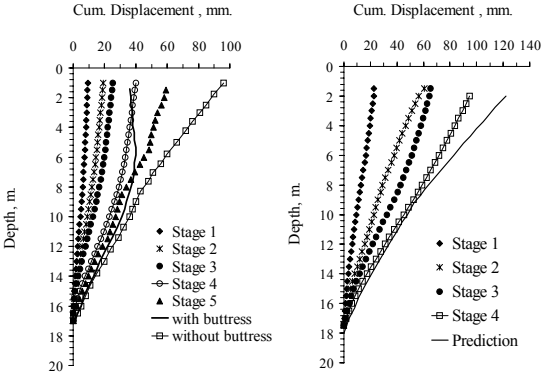


(a) กำแพงด้านตะวันออก (b) กำแพงด้านใต้

รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินใน Phase 1 [2]



รูปที่ 12 การก่อสร้างอาคารจอดรถในส่วนที่ 1



(a) กำแพงด้านตะวันออก (b) กำแพงด้านเหนือ

รูปที่ 13 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินใน Phase 2 [2]



รูปที่ 14 โครงสร้างอาคารจอดรถที่เสร็จสมบูรณ์

สรุป

การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินโดยการเลือกใช้ระบบ D-wall ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด รวมทั้งมีการวางแผนการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ เป็นวิธีการก่อสร้างที่ทำได้รวดเร็ว ปลอดภัย ประหยัด สามารถขจัดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างข้างเคียง ซึ่งทำให้วิธีการนี้มีความเหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินในพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อความเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

[1] วันชัย เทพรักษ์ (2545). การประเมินความเสียหายจากการขุดดินลึกด้วยระบบค้ำยันเข็มพืดใกล้โครงสร้างเดิมในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น, หน้า GTE-70-GTE-79

[2] Thasananipan, N. Aye, Z Z. Submaneewong, C. (2003) Performance of Buttress-Support Thin Diaphragm Wall for Underground Car Park in Bangkok. 12th Asian reginal conferences on soil mechanics and geotechnical engineering. Singapore, 841-844

ข้อที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบโครงสร้างกำแพงพืดกันดินชนิดขุด-หล่อในที่ในงานก่อสร้างใต้ดิน

ADDITIONAL CONSIDERATION OF DIAPHRAGM WALL DESIGN FOR UNDERGROUND STRUCTURE CONSTRUCTION

กมล สิงห์โตแก้ว (Kamol Singtokeaw)[1]

สุเมธ ประเวศวรารัตน์ (Sumate Pravetwararat)[2]

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ (Chanchai Submaneewong)[3]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[4]

[1]กรรมการผู้ช่วยผู้จัดการ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) (kamolsing@seafco.co.th)

[2]ผู้จัดการโครงการอาวุโส บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) (sumate@seafco.co.th)

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) (chanchai@seafco.co.th)

[4]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) (seafco@seafco.co.th)

บทคัดย่อ : ระบบกำแพงพืดกันดินชนิดขุด-หล่อในที่ (Diaphragm Wall) นิยมใช้ในงานขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานรากอาคารหรือโครงสร้างใต้ดินในบริเวณที่อยู่ในเขตที่มีความเสี่ยงจากการเคลื่อนตัวของดินสูง เช่นงานขุดดินใกล้อาคารเก่าที่ก่อสร้างมานานเนื่องจากเป็นระบบกำแพงที่มีความแข็งจึงสามารถลดการเคลื่อนตัวของดินได้ดีและยังสามารถใช้เป็นระบบกำแพงถาวรได้ในภายหลัง การออกแบบโครงสร้างส่วนอื่นที่มาต่อเข้ากับกำแพง Diaphragm Wall ผู้ออกแบบโครงสร้างต้องรู้ถึงข้อจำกัดและสภาพโดยรวมของตัวกำแพงDiaphragm Wall ทั้งในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและสภาพภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ เพื่อออกแบบโครงสร้างส่วนต่อเนื่องได้อย่างเหมาะสม บทความนี้จะนำเสนอข้อจำกัด รูปแบบโครงสร้างของกำแพง Diaphragm Wall และปัจจัยที่ควรคำนึงถึงสำหรับการใช้กำแพง Diaphragm Wall เป็นระบบโครงสร้างป้องกันดิน

ABSTRACT: Underground structure construction using diaphragm wall as a retaining structure has become more popular in urban area. Due to its high rigidity and the fact that it can be used as permanent structure, diaphragm wall is one of the most suitable solutions for deep excavation work adjacent to sensitive structures such as historical buildings. To design the connection between diaphragm wall and basement floor, designers should have good understanding of diaphragm wall characteristics, limitation and sequence of both diaphragm wall and basement construction. This paper presents characteristic of diaphragm wall, its limitation, sequence of construction and additional factors to consider for appropriate connection design.

KEYWORDS: Diaphragm wall, Pile leg, Basement construction

1. บทนำ

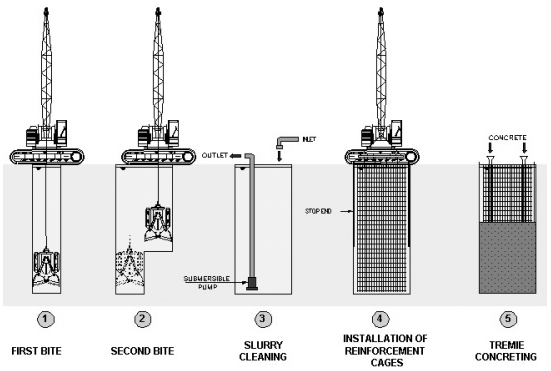
โครงสร้างกำแพงพืดกันดินชนิดขุด-หล่อในที่ (Diaphragm wall) มีความแตกต่างโครงสร้างทั่วไปหลายประการเนื่องจากการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall จะต้องก่อสร้างทีละแผง โดยที่รอยต่อระหว่างแผงต้องสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำใต้ดินได้ ความกว้างและความยาวของแผงจะถูกกำหนดขึ้นตามขนาดและกำลังของเครื่องจักร รวมทั้งเสถียรภาพของร่องเจาะที่

จะมีค่าสูงพอไม่ให้เกิดการพังทลาย การเทคอนกรีตจะต้องใช้วิธีเทคอนกรีตใต้น้ำ (Tremie method) เป็นต้น การออกแบบหรือกำหนดรายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับกำแพง Diaphragm Wall จะต้องสอดคล้องกับวิธีการก่อสร้างและมีความเหมาะสมทางวิศวกรรม เนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย ลักษณะทั่วไปและขั้นตอนการก่อสร้าง ขนาดของกำแพง Diaphragm Wall การจัดวางเหล็กเสริม การออกแบบรอยต่อระหว่างกำแพงกับพื้น และเสาเข็มใต้ระดับกำแพง Diaphragm Wall

2. ลักษณะทั่วไปและขั้นตอนการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall

กำแพงพืดกันดินชนิดขุดหล่อในที่ (Diaphragm wall) คือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างโดยทำการขุดดินออกแล้วใช้ดินรอบๆรูเจาะทำหน้าที่เป็นแบบหล่อคอนกรีต การจัดตำแหน่งเหล็กเสริมในกำแพง Diaphragm Wall จะต้องทำการผูกเหล็กเพื่อสร้างเป็นโครงก่อนแล้วทำการหย่อนลงในรูเจาะ จากนั้นจึงเทคอนกรีต การก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall จะต้องก่อสร้างทีละแผงโดยที่รอยต่อระหว่างแผงต้องสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำใต้ดิน

การก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall มีขั้นตอนโดยสังเขปดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนทั่วไปในการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall

ในการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall ที่มีรูปแบบซับซ้อนมากกว่าปกติ เช่น มีการใช้ความหนาของกำแพงกันดินไม่เท่ากันในโครงการ มีการต่อกำแพงพืดกันดินเข้ากับกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการเตรียมตำแหน่งให้อุโมงค์เจาะทะลุ เป็นต้น อาจต้องมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างให้เหมาะสมตามแต่ข้อกำหนดและสภาพการก่อสร้างนั้นๆ

3. ขนาดและความลึกโดยทั่วไปของกำแพง Diaphragm Wall

3.1 ความหนาของกำแพง Diaphragm Wall

การกำหนดความหนาของกำแพง Diaphragm Wall จะต้องพิจารณาจากกำลังรับน้ำหนักของหน้าตัดและปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในระหว่างการขุดดิน และควรพิจารณาเหล็กเสริมในกำแพง Diaphragm Wall ด้วยว่าหากใช้กำแพงมีปริมาณเหล็กเสริมที่สูง มากเกินไปอาจส่งผลต่อการไหลของคอนกรีตเหลวได้ โดยทั่วไปความหนาของกำแพง Diaphragm Wall ที่ใช้จะมีความหนาตั้งแต่ 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 และ 1.50 ม.

3.2 ความยาวของแผงกำแพง Diaphragm Wall (Panel Length)

การกำหนดความกว้างของแผงกำแพง Diaphragm Wall แต่ละแผงจะต้องพิจารณาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายๆส่วนประกอบเข้าด้วยกัน

ความยาวต่ำสุดของแผงกำแพง Diaphragm Wall จะถูกกำหนดด้วยความกว้างของเครื่องมือขุดเจาะ (Grab width) ซึ่งแสดงในภาพที่ 2 โดยทั่วไปสำหรับชั้นดินกรุงเทพฯจะกำหนดความยาวต่ำสุดอยู่ในช่วง 2.50 ถึง 3.00 ม.

ความยาวแผงที่มากที่สุดจะพิจารณาจากเสถียรภาพของร่องเจาะ หากร่องเจาะมีความยาวมาก ผลของแรงดัดที่ห่างจากจุดรองรับจะลดลง ทำให้ร่องเจาะอาจเกิดการบีบตัวได้ ทั้งนี้ต้องพิจารณาจากคุณสมบัติของดินและคุณสมบัติของสารละลายรักษาเสถียรภาพที่ใช้ด้วย [1] ในชั้นดินกรุงเทพฯ ความยาวของร่องเจาะไม่ควรเกิน 6.0 ม.

นอกจากนี้การกำหนดความยาวของแผงยังต้องพิจารณาถึงขั้นตอนในการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall แต่ละแผงอีกด้วยว่าจะกำหนดให้แผงใดเป็นแผงปฐมภูมิ (Primary panel) หรือแผงทุติยภูมิ (Secondary panel) สำหรับแผงกำแพงบริเวณหัวมุมหรือตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนความหนาของกำแพง Diaphragm Wall จะต้องกำหนดความยาวของแผงให้เหมาะสมกับการทำงาน และต้องควบคุมระยะเวลาในการก่อสร้างแผงกำแพง

รวมทั้งเสาเข็มใต้ระดับกำแพง Diaphragm Wall แต่ละแผงอีกด้วยไม่ให้ใช้ระยะเวลาในการเจาะนานเกินไป



ภาพที่ 2 หัวขุดเจาะกำแพงพืด

3.3 ความลึกของปลายกำแพง Diaphragm Wall

ปลายกำแพง Diaphragm Wall ควรจะฝังอยู่ในชั้นดินที่แข็งและฝังอยู่ลึกกว่าระดับที่ทำการขุดดิน ควรมีการคำนวณเสถียรภาพของงานขุดดินเมื่อกำหนดความลึกปลายกำแพงได้แล้ว ในบางกรณีที่ชั้นดินแข็งอยู่ลึกมากจำเป็นต้องให้ปลายกำแพงอยู่ในชั้นดินอ่อน ก็สามารถแก้ปัญหาได้โดยการใช้การปรับปรุงกำลังของดิน ทั้งนี้ดินที่ทำการปรับปรุงต้องมีความต่อเนื่องสมบูรณ์ มีกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอให้เกิดเสถียรภาพในงานขุด

4. ปริมาณและการจัดวางเหล็กเสริม

การจัดวางเหล็กเสริมในกำแพงพืดกันดิน ต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆในการก่อสร้างด้วยว่ามีความเหมาะสมเพียงใด

4.1 ปริมาณเหล็กเสริมหลัก

การคำนวณปริมาณและรูปแบบของเหล็กเสริมหลักควรพิจารณาหลายๆปัจจัยประกอบด้วยเพื่อใช้ในการคำนวณโมเมนต์ดัด ได้แก่ การคำนวณแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง วิธีการขุดดิน วิธีการและรูปแบบของระบบค้ำยันหรือระบบป้องกันดินพัง ช่องเปิด ลักษณะโครงสร้างทั้งในช่วงโครงสร้างถาวรและโครงสร้างชั่วคราว พฤติกรรมการถ่ายแรงระหว่างกำแพงกับระบบค้ำยัน

การคำนวณแรงที่เกิดขึ้นควรจะพิจารณาเป็นกรณีไปตามสภาพของโครงการและขั้นตอนการก่อสร้าง

4.2 ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมหลัก

เนื่องจากการเทคอนกรีตในกำแพงพืด ต้องใช้วิธีเทคอนกรีตใต้น้ำ คอนกรีตที่เทจะต้องอัดตัวด้วยน้ำหนักตัวเองไม่สามารถทำการจี้ได้ ดังนั้นระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต้องมีมากพอให้คอนกรีตไหลผ่านได้สะดวกไม่เกิดโพรงหลังจากคอนกรีตแข็งตัว ข้อแนะนำสำหรับระยะห่างระหว่างผิวเหล็กเสริมคือไม่น้อยกว่า 5 เท่าของขนาดมวลรวมหยาบ ดังนั้นการพิจารณาเหล็กเสริมควรใช้เหล็กเสริมขนาดใหญ่เป็นหลัก ซึ่งระยะห่างนี้ควรจะพิจารณาในช่วงที่ต้องทำการต่อเหล็กหรือทาบเหล็กเสริมด้วยถ้าเหล็กมีความแน่นมาก อาจต้องพิจารณาเปลี่ยนตำแหน่งการทาบเหล็กเพื่อให้การคอนกรีตไหลได้โดยไม่ติดขัด

4.3 ระยะห่างเหล็กเสริมหลักถึงปลายแผงกำแพง Diaphragm Wall ที่ต่อกับแผงข้างเคียง

ระยะห่างของเหล็กเสริมหลักถึงปลายแผงกำแพงควรมีระยะเพียงพอเพื่อให้สามารถทำการหย่อนโครงเหล็กเสริมลงในหลุมเจาะได้หากการเจาะแผงข้างเคียงมีการเจาะจนความกว้างเกินที่ออกแบบไว้ หรือในกรณีกำแพงข้างเคียงมีการเอียงเข้าหากัน ระยะห่างของเหล็กเสริมถึงขอบกำแพงควรมีค่าอยู่ในช่วง 150 – 200 มม. ซึ่งระยะนี้ควรจะสัมพันธ์กับลักษณะของแบบข้าง (Stop-end) ที่ใช้

4.4 เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

การจัดวางเหล็กเสริมรับแรงเฉือนควรเลือกเหล็กที่มีขนาดใหญ่ เช่น DB12 หรือ DB16 เนื่องจากการจัดวางเหล็กควรพิจารณาให้คอนกรีตสามารถไหลและอัดตัวแน่นโดยมีสิ่งกีดขวางน้อยที่สุด และต้องจัดช่องเพื่อหย่อนท่อเทคอนกรีต (Tremie Pipe) ลงไปได้ด้วย เหล็กเสริมรับแรงเฉือนควรใส่ตลอดทั้งความยาวโครงเหล็กเสริม

4.5 รอยต่อระหว่างเหล็กเสริม

การพิจารณารอยต่อระหว่างโครงเหล็กเสริมแต่ละโครงสามารถทำได้หลายวิธี เช่นใช้ลวดผูกโครงเหล็กเสริม ใช้การเชื่อมเหล็กเสริมเข้าด้วยกัน หรือใช้เข็มขัดเหล็กรัดรูป U-bolt ซึ่ง

จากข้อมูลที่ผ่านมา ควรใช้วิธียึดเหล็กเสริมด้วยเข็มขัดเหล็กรัดรูป U-bolt เนื่องจากการยึดด้วยระบบนี้จะทำการให้ต่อทาบเหล็กมีความแข็งแรงไม่หลุดออกจากกันโดยง่าย และใช้เวลาน้อยในการต่อโครงเหล็กเสริมเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ 3

ในกรณีที่เหล็กเสริมบริเวณนั้นมีปริมาณแน่นมาก การต่อทาบจะทำให้ระยะห่างระหว่างผิวเหล็กลดลง การใช้ข้อต่อทางกล (Mechanical coupler) เชื่อมต่อระหว่างเหล็กเสริมหลักสามารถช่วยให้ความหนาแน่นของเหล็กบริเวณการต่อทาบเหล็กลดลง โดยที่ยังสามารถให้การถ่ายแรงของเหล็กเสริมเกิดขึ้นได้เท่าเดิม



ภาพที่ 3 การต่อเหล็กโดยใช้ U-bolt

4.6 เหล็กเสริมรักษารูปโครงเหล็กและเหล็กที่ใช้ในการยก

เหล็กเสริมที่ใช้ในการรักษารูปโครงเหล็กและเหล็กที่ยกไม่ได้นำมาพิจารณาในการรับแรง เหล็กเสริมประเภทนี้ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โครงเหล็กเกิดการเสียรูปขณะเคลื่อนย้ายและหย่อนลงร่องเจาะ อย่างไรก็ตามการจัดวางเหล็กเสริมประเภทนี้ควรพิจารณาว่าจะไม่กีดขวางการต่อขั้นตอนการทำงานในงานก่อสร้างและไม่ขวางทางการไหลของคอนกรีต

5. รอยต่อระหว่างกำแพง Diaphragm Wall กับพื้นโครงสร้างใต้ดิน

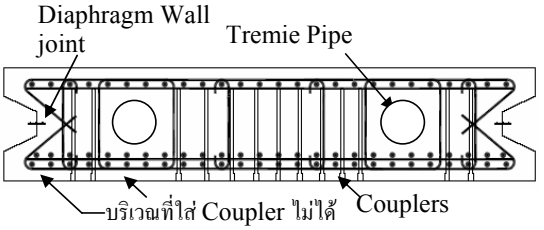
สิ่งที่จะพิจารณาในการออกแบบรอยต่อมีหลายปัจจัยดังนี้

5.1 พฤติกรรมของรอยต่อ

การออกแบบรอยต่อระหว่างกำแพง Diaphragm Wall กับพื้นจะต้องพิจารณาว่าในการออกแบบพื้นหรือกำแพง Diaphragm Wall ได้กำหนดให้รอยต่อนั้นมีพฤติกรรมแบบยึดรั้ง (Fix support) หรือยึดหมุน (Hinge support) การกำหนดรูปแบบว่าจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับการฝังเหล็กในกำแพง หากระยะการฝังเหล็กมีความยาวเพียงพอ พฤติกรรมของรอยต่อก็จะเป็นแบบยึดรั้ง แต่หากทำการฝังเหล็กหรือเจาะเสียบเหล็กในภายหลังพฤติกรรมของรอยต่อมีแนวโน้มจะเป็นแบบยึดหมุน

5.2 ระยะห่างของเหล็กเสริมที่ฝังในกำแพงพืด

การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมที่ฝังในกำแพงพืด มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการคำนวณจำนวนเหล็กเสริมที่ต้องใส่ในหน้าตัด แต่การวางเหล็กเสริมในบางพื้นที่เช่น บริเวณที่กำหนดให้ใส่ท่อเทคอนกรีต หรือบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างแผง ไม่สามารถฝังเหล็กเสริมในส่วนนั้นได้ ดังแสดงในภาพที่ 4



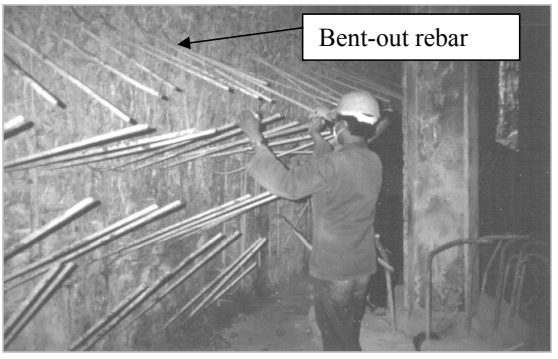
ภาพที่ 4 รูปแบบการจัดวาง Coupler

5.3 รูปแบบของรอยต่อที่ใช้

รอยต่อของกำแพง Diaphragm Wall สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น

5.3.1 การฝังเหล็กพับไว้ (Bent-out rebar)

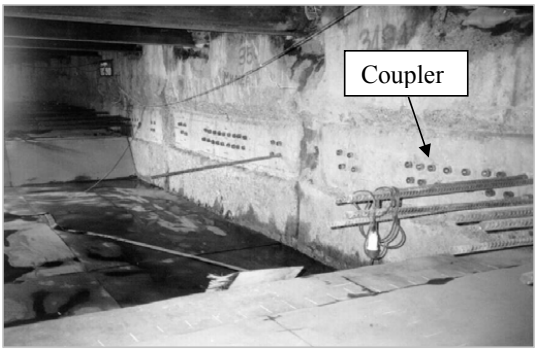
รอยต่อประเภทนี้คือการฝังเหล็กเสริมในกำแพงพืดกันดินตามระยะฝังที่ออกแบบและดัดเหล็กไว้เพื่อง้างออกมาเป็นเหล็กฝาก (Dowel bar) ดังภาพที่ 5 เพื่อต่อกับพื้น การใช้รอยต่อประเภทนี้ควรเลือกเหล็กกลม (Round bar-SR24) เนื่องจากสามารถดัดงอแล้วไม่หักง่ายเหมือนกับเหล็กข้ออ้อย และต้องพิจารณาช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมว่าต้องมีเพียงพอให้คอนกรีตไหลผ่านอย่างสะดวก นอกจากนี้การเลือกขนาดของเหล็กต้องดูความสามารถในการง้างออกมาเพื่อต่อกับโครงสร้างพื้นด้วย



ภาพที่ 5 การง้างเหล็กที่พับไว้ในกำแพงพืดกันดิน

5.3.2 การใช้ข้อต่อทางกล (Mechanical coupler)

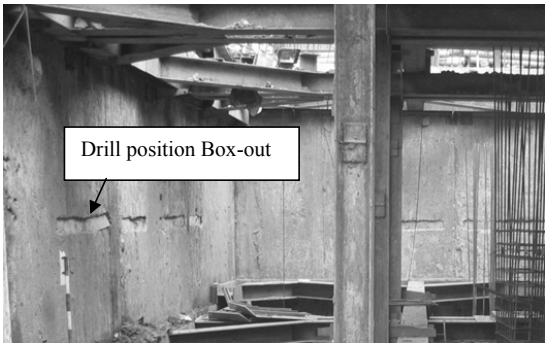
รอยต่อทางกลคือการฝังเหล็กเสริมในกำแพง Diaphragm Wall ตามระยะฝังที่ออกแบบโดยทำเกลียวที่ปลายข้างหนึ่งของเหล็กเสริมแล้วหมุนข้อต่อ Coupler โดยหมุนเหล็กเสริมที่ทำเกลียวอีกข้างเข้าด้วยกันดังภาพที่ 6 การใช้รอยต่อประเภทนี้สามารถลดความแน่นของเหล็กในหน้าตัดเมื่อเทียบกับการใช้เหล็กฝังแบบพับ และไม่เกิดปัญหาการดัดเหล็กแล้วหักได้ ทั้งนี้กำลังรับน้ำหนักของข้อต่อทางกลต้องค่ามีสูงกว่ากำลังรับน้ำหนักของเหล็กเสริม ปัจจุบันรอยต่อประเภทนี้นิยมใช้ในหลายๆโครงการ



ภาพที่ 6 การต่อเหล็กเข้ากับข้อต่อทางกล

5.3.3 การใช้วิธีเจาะ-เสียบเหล็กเสริม (Drill and Grout Rebar)

รอยต่อระหว่างพื้นกับกำแพง Diaphragm Wall ประเภทนี้จะทำเมื่อขุดดินลงไปถึงระดับพื้นนั้นๆ แล้วทำการเจาะรูในกำแพง Diaphragm Wall เหล็กเสริมที่เสียบจะถูกยึดด้วยวัสดุประสานเข้ากับกำแพง Diaphragm Wall รอยต่อประเภทนี้มีพฤติกรรมแบบยึดหมุน การใช้วิธีการเจาะเสียบสามารถกระจายให้เหล็กฝังในกำแพงพืดมีระยะห่างเท่าๆกันและแก้ปัญหาปริมาณหน้าตัดเหล็กที่แน่นเกินบริเวณรอยต่อพื้นกับกำแพงพืด แต่การเจาะกำแพงเพื่อเสียบเหล็กใช้เวลามากกว่าการใช้รอยต่อประเภทอื่นๆ ดังภาพที่ 7 ซึ่งตำแหน่งที่จะทำการเจาะเสียบเหล็กอาจใช้การกันพื้นที่คอนกรีต (Box-out) เพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงการเจาะรูใกล้เหล็กเสริมเกินไป นอกจากนี้พื้นที่ที่กันไว้ยังสามารถสร้างรอยต่อให้สามารถรับแรงเฉือนได้ดีขึ้นอีกด้วย



ภาพที่ 7 การกันพื้นที่สำหรับเจาะเสียบเหล็ก

6. เสาเข็มใต้ระดับกำแพง Diaphragm Wall

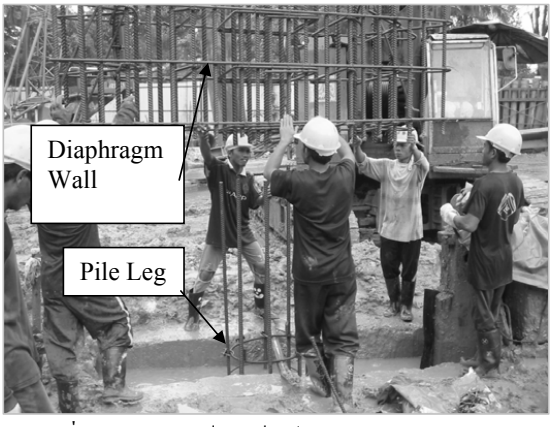
เสาเข็มใต้ระดับกำแพง Diaphragm Wall ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวเองของกำแพงกันดินผ่านทางคานรัดหัว (Capping Beam) หรือรับน้ำหนักโดยตรงจากโครงสร้างเสา ตามปกติปลายของเสาเข็มใต้ระดับกำแพง Diaphragm Wall จะยาวเท่ากับปลายของเสาเข็มอื่นๆในโครงการ หรืออยู่ในชั้นดินแน่นเพื่อควบคุมระดับการทรุดตัวให้เกิดความแตกต่างน้อยที่สุด เสาเข็มใต้กำแพง Diaphragm Wall ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 2 ประเภทคือ

6.1 เสาเข็มเจาะเหลี่ยมใต้กำแพง Diaphragm Wall (Barrette Leg)

ขนาดของเสาเข็มเหลี่ยมใต้กำแพง Diaphragm Wall จะมีขนาดเท่ากับความกว้างแผงของกำแพงพืดกันดิน กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มประเภทนี้จะมีค่าสูง แต่จะใช้เวลาก่อสร้างนานกว่าเสาเข็มกลม การคำนวณระยะห่างของเสาเข็มเหลี่ยมขึ้นอยู่กับน้ำหนักตัวเองของกำแพง Diaphragm Wall น้ำหนักเพิ่มเติมจากโครงสร้าง

6.2 เสาเข็มเจาะใต้กำแพง Diaphragm Wall (Bored Pile Leg)

เสาเข็มกลมสามารถนำมาใช้ในการรับน้ำหนักกระทำในแนวดิ่งของกำแพง Diaphragm Wall ได้ การต่อแผงกำแพง Diaphragm Wall ได้แสดงในภาพที่ 8 โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มจะมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับความหนาของกำแพง Diaphragm Wall แต่บางกรณีที่ต้องการกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่สูงขึ้น ก็สามารถใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มที่ใหญ่กว่ากำแพง Diaphragm Wall ได้ ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 การต่อโครงเหล็กเสาเข็มใต้ระดับกำแพง Diaphragm Wall



ภาพที่ 9 เสาเข็มเจาะใต้กำแพง Diaphragm Wall ที่มีขนาดใหญ่กว่าความหนากำแพง

7. สรุป

การออกแบบกำแพง Diaphragm Wall ที่ดี ผู้ออกแบบควรมีความเข้าใจถึงขั้นตอน วิธีการก่อสร้าง ลักษณะเฉพาะและข้อจำกัดในการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall แบบการก่อสร้างที่ดีควรมีความชัดเจน มีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง การเตรียมงานที่ดีตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบสามารถทำให้การงานก่อสร้างสามารถทำได้ตามระยะเวลาที่กำหนด และเกิดปัญหาตามมาที่ลดลงภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Thasnanipan, N., Maung, A. W., Boonyarak, T., and Aye, Z. Z., 2004, Stability of a Trial Trench Excavated under Polymer Slurry in Bangkok Soft Clay, 15th Southeast Asian Geotechnical Conference, Vol. 2, Bangkok, Thailand

ความต้านทานความชื้นและน้ำซึมเข้าห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพฯ

WATER-RESISTING DEEP BASEMENT IN BANGKOK SOIL

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์[1]

อ่อง วิน เมือง[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์[3]

จักรกฤษณ์ จันจัด[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]ผู้ช่วยผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) win@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ : ปัจจุบันการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพฯ มีเพิ่มมากขึ้น บางโครงการก่อสร้างมีความลึกถึง 6 ชั้น แต่มิได้นำวิธีการป้องกันความชื้นและน้ำรั่วซึมมาใช้อย่างเป็นรูปธรรม ก็มักจะประสบปัญหาดังกล่าว บทความนี้จึงนำเสนอวิธีป้องกันให้สอดคล้องกับความต้องการใช้งานห้องใต้ดินตามที่มีคำแนะนำไว้ในมาตรฐาน BS 8102: 1990 และในบทความนี้ได้แนะนำวิธีการก่อสร้างแบบต่างๆ รวมทั้งนำเสนอกรณีตัวอย่างห้องใต้ดินลึกที่ก่อสร้างแล้วมีความชื้นและน้ำรั่วซึมเข้าภายในห้องใต้ดิน

ABSTRACT: At present, construction of deep basement in Bangkok soil rapidly increases in number. In some projects, up to 6 basements were constructed without considering protection of water leakage and dampness. For this reason, this paper presents preventive measures of water leakage and dampness occur in basements constructed in Bangkok soil with regards to required internal environment, outlined in BS 8102: 1990. Guide lines of preventive measures associated with various methods of basements excavation and constructions are discussed. A case study on water leakage problem into basements constructed with diaphragm walls is also presented.

KEYWORDS: Water-resisting basement, Water leakage, Tank membrane, Drain cavity

1.บทนำ

ความเจริญเติบโตของกรุงเทพมหานครเป็นไปอย่างรวดเร็วในสามทศวรรษที่ผ่านมา จากการที่มีอาคารสูงเพียงไม่ถึงสิบอาคารในปี 2520 เพิ่มขึ้นเป็นกว่าหมื่นอาคารในปี 2550 และจากการที่ พรบ.ควบคุมอาคาร ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2543) [1] มีข้อจำกัดการใช้พื้นที่ดินมากขึ้น นักลงทุนจึงต้องใช้พื้นที่ใต้ดินมาใช้งานด้วยโดยก่อสร้างเป็นห้องใต้ดินลึก หลายอาคารมีการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกระหว่าง 3 ถึง 6 ชั้น เพื่อทำเป็นที่จอดรถยนต์ โดยทั่วไปผนังห้องใต้ดินลึกจะก่อสร้างด้วยวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

คุณสมบัติโดยทั่วไปตามธรรมชาติของคอนกรีตโครงสร้างที่ยังไม่มีการปรับปรุงผิวหน้ากำแพงด้วยวัสดุกันซึม (Tanking membranes) ความชื้นของน้ำ (Water vapour) หรือของเหลว (Liquid) จะสามารถซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปได้ในระดับหนึ่ง ผนังคอนกรีตห้องใต้ดินที่ก่อสร้างเสร็จแม้นจะมีสภาพดีมากก็ตาม ของเหลวก็ยังสามารถซึมผ่านเข้ามาได้ [2] การซึมผ่านของน้ำในเนื้อคอนกรีตเกิดขึ้นได้สองขบวนการคือ ขบวนการแรกจะ

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดันของน้ำ (Hydraulic pressure) ด้านหนึ่งของโครงสร้างสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง โดยน้ำจะซึมจากด้านที่มีความดันสูงกว่าไปยังด้านที่มีความดันต่ำกว่า ขบวนการที่สอง น้ำจะค่อยๆ ซึมผ่านคอนกรีตด้วย Capillary suction จากผิวด้านหนึ่งออกสู่ผิวอีกด้านหนึ่ง ซึ่งทั้งสองขบวนการน้ำจะซึมผ่านทาง “ช่องว่าง (Capillary pore) ที่ต่อกันในเนื้อคอนกรีต” [3] ซึ่งปริมาณการซึมผ่านต่อนาทีจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำใต้ดินภายนอกผนังกำแพง (External hydrostatic pressure) เป็นสำคัญ

ดังนั้น ผู้ออกแบบ และผู้ก่อสร้างห้องใต้ดินจึงต้องทำความเข้าใจกับพฤติกรรมการป้องกันน้ำหรือความชื้นรั่วซึมว่าจะต้องทำอย่างไรจึงจะเหมาะสมกับสภาพการใช้งาน มีผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานจำนวนหนึ่งที่ยังเข้าใจว่าห้องใต้ดินทั่วไปเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วจะป้องกันน้ำหรือความชื้นได้เหมือนนาฬิกากันน้ำ (Waterproof watch) ซึ่งความจริงแล้ว หากในรายการก่อสร้างมิได้ระบุไว้ให้ทำการติดตั้งวัสดุกันซึม เพื่อป้องกันน้ำหรือความชื้นไว้ด้วยแล้ว ห้องใต้ดินที่ก่อสร้างเสร็จก็จะไม่มีโอกาสป้องกันความชื้นหรือน้ำรั่วซึมได้ดีตามที่ต้องการ บทความนี้จะกล่าวถึงความต้านทานการรั่วซึมของน้ำหรือความชื้นและปัญหาของห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพโดยเทียบเคียงกับมาตรฐานของ British Standard Institute (BSI)

2. ประเภทการใช้งานของห้องใต้ดินลึก

ห้องใต้ดินลึก (Deep basement) หมายถึงห้องใต้ดินที่ฝังอยู่ใต้ดินมากกว่าหนึ่งชั้น มาตรฐาน BS8102:1990 [4] ได้จำแนกสภาพแวดล้อมภายในห้องใต้ดินตามประเภทการใช้งานออกเป็น 4 ระดับ ดังนี้ คือ

ระดับที่ 1 ห้องใต้ดินสำหรับใช้งานพื้นฐาน (Basic utility): ชั้นจอดรถ ห้องเครื่อง (ไม่รวมอุปกรณ์ไฟฟ้า) โรงงาน

ระดับที่ 2 ห้องใต้ดินสำหรับใช้งานสูงกว่างานพื้นฐาน (Better utility): โรงงานและห้องเครื่องที่ต้องการสภาพที่แห้ง ร้านค้า

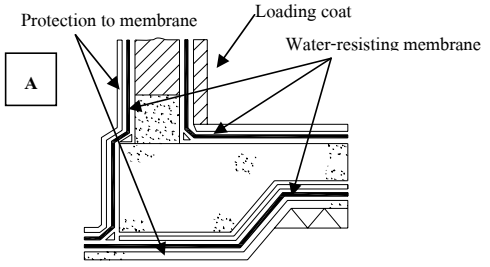
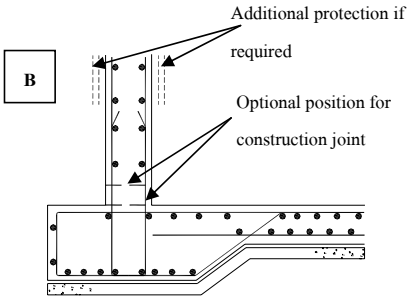
ระดับที่ 3 ห้องใต้ดินสำหรับใช้อาศัยอยู่ได้ (Habitable): ที่พักอาศัยอากาศถ่ายเทได้รวมถึงสำนักงาน ร้านอาหาร ที่พักผ่อนหย่อนใจ

ระดับที่ 4 ห้องใต้ดินระดับดีพิเศษ (Special): พื้นที่ที่ต้องควบคุมสภาพแวดล้อมให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตลอดเวลา

3. ชนิดของการป้องกันการรั่วซึมและความชื้น

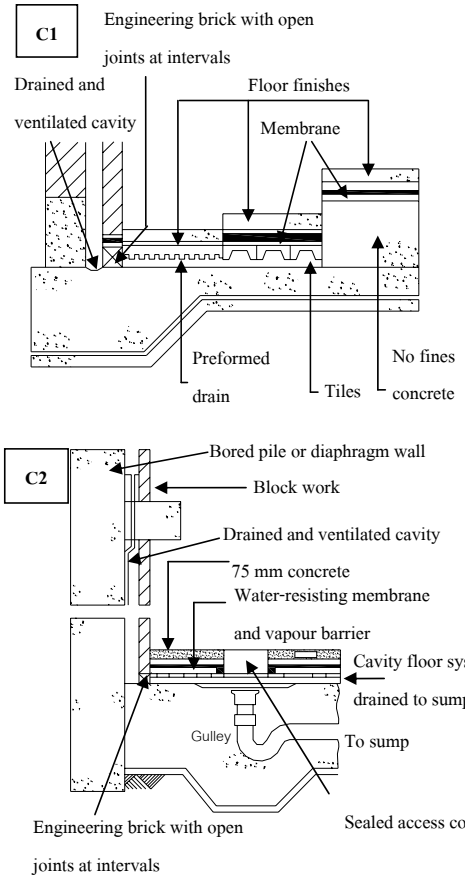
BS8102:1990 [4] ได้กำหนดหลักการพื้นฐานถึงชนิดของการป้องกันน้ำรั่วซึมและความชื้นไว้ในมาตรฐานดังกล่าว ซึ่งบทความนี้ได้คัดลอกและแปลมานำเสนอไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักการในการป้องกันน้ำรั่วซึมของโครงสร้างใต้ดิน (after BS 8102: 1990)

รูปแบบและวิธีป้องกันการรั่วซึมของน้ำแบบต่างๆ

Type A (Tank protection) ตัวโครงสร้างเพียงอย่างเดียวไม่สามารถป้องกันน้ำเข้าได้จึงต้องพึ่งระบบป้องกันน้ำซึมและความชื้นโดยการติดตั้งระบบกันน้ำภายในหรือทั้งสองด้านกำแพงกันดินที่ใช้อาจเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง คอนกรีตไม่เสริมเหล็กหรือกำแพงก่ออิฐ วิธีการนี้สามารถป้องกันได้ทั้งน้ำและความชื้น

Type B (Structural integral protection) การป้องกันน้ำ พึ่งแต่เฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น ไม่ได้เตรียมระบบป้องกันอื่นๆไว้ วัสดุโครงสร้างที่ใช้อาจเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตอัดแรง (ออกแบบและก่อสร้างตาม BS8110: ส่วนที่ 1 และ 2 หรือ BS8007) บางกรณีอาจใช้แผ่นพืดเหล็ก (Sheet pile) กำแพงก่ออิฐ หรือคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก การออกแบบตามมาตรฐาน BS8110 หรือ BS8007 เพียงอย่างเดียวเป็นที่ทราบกันว่าไม่สามารถมั่นใจว่าป้องกันน้ำได้ทั้งหมด วิธีการนี้สามารถป้องกันน้ำแต่ความสามารถในการป้องกันความชื้นดูเหมือนว่าลดลงเมื่อเทียบกับวิธีแบบ A หรือ C

ตารางที่ 1 (ต่อ) หลักการในการป้องกันน้ำรั่วซึมของโครงสร้างใต้ดิน (after BS 8102: 1990)

รูปแบบและวิธีป้องกันการรั่วซึมของน้ำแบบต่างๆ



Type C (Drained protection) สำหรับห้องใต้ดินตื้น

การป้องกันน้ำ ต้องใช้ระบบเพิ่มเติมจากโครงสร้างคอนกรีตเพื่อสร้างระบบระบายน้ำและอากาศภายในกำแพงกันดินที่ใช้อาจเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง คอนกรีตไม่เสริมเหล็ก กำแพงก่ออิฐ แผ่นเหล็กพืด กำแพงเสาเข็มเจาะ หรือกำแพงพืด D-wall (อาจมีราคาสูงเกินไปสำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินตื้น) ระบบนี้สามารถป้องกันน้ำและความชื้นได้ในระดับสูง ควรต้องมีการจัดระบบระบายอากาศที่ดี การป้องกันความชื้นจะต้องมีช่องเพื่อระบายน้ำและมีระบบระบายอากาศ และติดตั้งแผ่นกันความชื้นที่บนพื้นและด้านล่างพื้นควบคู่ไปด้วย

Type C (Drained protection) สำหรับห้องใต้ดินลึก

กำแพงกันดินที่ใช้อาจเป็นกำแพงพืด D-wall กำแพงเสาเข็มเจาะแบบขบกัน กำแพงเสาเข็มเจาะแบบเรียงต่อเนื่อง หรือกำแพงแผ่นเหล็กพืดถาวร ซึ่งตัวกำแพงเองไม่สามารถป้องกันน้ำและความชื้นในระดับสูงได้ และไม่สามารถติดตั้งระบบกันความชื้นจากภายนอกได้ การติดตั้งระบบกันความชื้นเพิ่มเติมจากภายในกำแพงสามารถทำเพิ่มเติมได้เพื่อสามารถใช้กับระดับการใช้งานของห้องใต้ดินทุกระดับ การป้องกันความชื้นจะต้องมีช่องเพื่อระบายน้ำและมีระบบระบายอากาศ โดยอากาศมีแผ่นกันความชื้นที่พื้นควบคู่ไปด้วย และควรต้องมีการจัดระบบระบายอากาศที่ดี ตัวอย่างที่แสดงในการใช้งานห้องใต้ดินในระดับ 3 (ความแห้งของห้องใต้ดินระดับดีมาก) โดยใช้วิธีการแบบ C1 หรือ C2 สำหรับการใช้งานระดับ 1 หรือ 2 (ความแห้งของห้องใต้ดินระดับทั่วไปถึงระดับดี) ใช้วิธีป้องกันแบบ C3

หมายเหตุ: การลดแรงดันน้ำที่ผ่านพื้นตามวิธีการแบบ C3 อาจไม่ได้ผลดีนักนอกจากกรณีที่น้ำใต้ดินไหลไม่แรงในชั้นดินทึบน้ำ

4. ปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกห้องใต้ดินลึกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ

ผู้ออกแบบห้องใต้ดินจำเป็นต้องตกลงกับเจ้าของโครงการถึงความต้องการสภาพแวดล้อมภายใน (Required internal environment) สำหรับการใช้งานระยะยาว เมื่อทราบความต้องการแล้ว ผู้ออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกห้องใต้ดิน (External environment) ว่ามีความเหมาะสมต่อความต้องการของสภาพแวดล้อมภายในที่สอดคล้องกับการทำระบบป้องกันตามตารางที่ 1 ชนิดใด

โดยปกติแล้วเชื่อว่าเจ้าของโครงการทุกรายต้องการสภาวะสิ่งแวดล้อมภายในแห้งที่สุดและปราศจากความชื้นโดยไม่ต้องมีการติดตั้งการป้องกันใดๆ ให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ซึ่งน้อยกรณีที่จะมีความเป็นไปได้ ส่วนใหญ่แล้วจะต้องทำการติดตั้งระบบป้องกัน เช่น ติดตั้ง Tanking membrane หรือทำ Drain cavity เป็นต้น

CIRIA report 139:1995 [2] ได้นำ Table 1 ของ BS8102:1990 มาแนะนำเกี่ยวกับระดับการป้องกันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานห้องใต้ดินแต่ของละชนิดการใช้งานซึ่งผู้เขียนได้แปลไว้ตามตารางที่ 2 ในบทความนี้

ตารางที่ 2 แนวทางในการป้องกันน้ำซึมเข้าห้องใต้ดินตามสภาพการใช้งานต่างๆ (after CIRIA report 139:1995 [2])

ระดับการใช้งานของห้องใต้ดิน	สมรรถนะในการป้องกันน้ำและความชื้น	วิธีการป้องกัน*	ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากตารางที่ 1 ของ BS8102:1990
ระดับที่ 1 (Basic utility) ชั้นจอดรถ ห้องเครื่อง (ยกเว้นห้องที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้า) โรงงาน เป็นต้น	ยอมให้มีน้ำรั่วซึมและกำแพงมีรอยชื้นบางส่วน	Type B การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน BS8110	การยอมให้น้ำรั่วซึมควรมีระบบระบายอากาศที่ดี หรือมีรางระบายน้ำ เนื่องจากสภาพการใช้งานทั่วไปของห้องใต้ดินไม่ควรมีน้ำเข้ามา มาตรฐาน BS8110 ส่วนที่ 1 พิจารณาเพียงแนวทางการควบคุมรอยร้าว และไม่พิจารณาการเคลื่อนตัวช่วงแรกจากความร้อนในคอนกรีต การใช้มาตรฐานส่วนที่ 1 อาจทำให้เกิดรอยร้าวที่มีความกว้างมากเกินในชั้นดินที่มีน้ำไหลได้ ซึ่งควรพิจารณาแนวทางการควบคุมรอยร้าวในหัวข้อ 3.4.2 ควรมีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของน้ำใต้ดินเพื่อพิจารณาว่ามีผลกระทบต่อโครงสร้างใต้ดินหรือไม่ ระดับของการใช้งานในมาตรฐาน BS8102 อาจไม่ตรงกับข้อกำหนดของอาคาร หมวด C ซึ่งควรจะตรงกับระดับที่ 3 (Habitable)
ระดับที่ 2 (Better utility) โรงงานและห้องเครื่องที่ต้องการสภาพที่แห้ง ร้านค้า เป็นต้น	ไม่ยอมให้มีน้ำรั่วซึมแต่ยอมให้กำแพงมีไอน้ำและความชื้น	Type A Type B การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน BS8007	การใช้แผ่นยางกันน้ำให้มีประสิทธิผลควรต้องมีการซ้อนทับและมีรอยต่อที่ดี การก่อสร้างจะต้องได้คุณภาพ แม้ว่ารอบๆบริเวณก่อสร้างจะไม่มีน้ำขังหรือชั้นดินมีลักษณะทึบน้ำก็ตาม ควรมีการตรวจสอบระดับของน้ำใต้ดินเช่นเดียวกับการป้องกันในระดับ 1 การตรวจสอบคุณภาพอย่างละเอียดในการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอนมีความสำคัญมาก
ระดับที่ 3 (Habitable) พื้นที่พักอาศัย พื้นที่สำนักงาน ร้านอาหาร พื้นที่พักผ่อนหย่อนใจ เป็นต้น	สภาพทั่วไปห้องใต้ดินแห้ง	Type A Type B การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน BS8007 Type C โดยมีช่องว่างระหว่างกำแพงสองชั้น จัดระบบระบายน้ำที่พื้นและ ระบบกันชื้นที่กำแพง	เช่นเดียวกับระดับที่ 2 ในการก่อสร้างในดินที่มีการซึมผ่านของน้ำสูง อาจต้องใช้ระบบป้องกันน้ำและความชื้นหลายแบบเข้าด้วยกัน
ระดับที่ 4 (Special): บริเวณที่ต้องมีการควบคุมสภาพแวดล้อมและความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ตลอดเวลา	สภาพห้องใต้ดินแห้งมากทั้งพื้นที่	Type A Type B การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน BS8007 พร้อมใช้ระบบกันชื้นที่กำแพง Type C โดยมีช่องว่าง ระหว่างกำแพงสองชั้นพร้อมการระบายอากาศที่ดี จัดระบบระบายน้ำและกันความชื้นที่พื้นและกำแพง	เช่นเดียวกับระดับที่ 3
* รูปแบบการป้องกันที่เหมาะสมในแต่ละระดับการใช้งานให้ดูแนวทางการป้องกันจากตารางที่ 1			

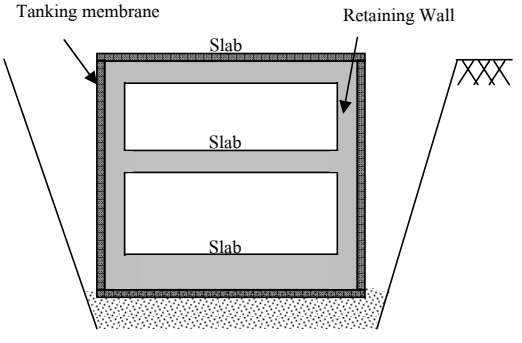
ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาสภาวะแวดล้อมภายนอกว่าเมื่อก่อสร้างห้องใต้ดินเสร็จเรียบร้อยแล้วภายนอกห้องใต้ดินมีน้ำไหลมาขังสะสมติดผิวภายนอกกำแพงห้องใต้ดินหรือไม่ หากมีก็ต้องพิจารณาต่อว่าปริมาณน้ำมีมากน้อยหรือเกิดต่อเนื่องเพียงใด และกำหนดให้มีการทำ Tanking membrane ที่ภายนอกหรือที่ภายใน หรือทั้งภายนอกและภายในผิวผนังห้องใต้ดิน หรือหากผนังกำแพงเป็นแบบ Bored pile wall หรือ Diaphragm wall ก็อาจต้องกำหนดให้ทำ Drain cavity ไว้ภายใน เป็นต้น

5. วิธีการก่อสร้างห้องใต้ดินแบบต่างๆ ในชั้นดินกรุงเทพ

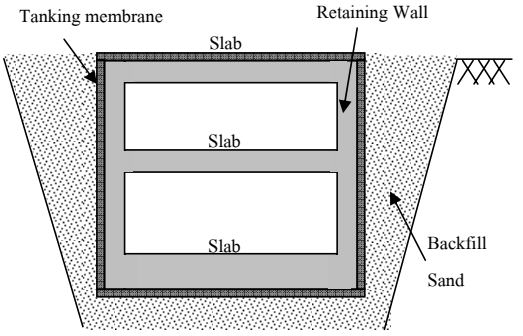
การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพ โดยทั่วไปมี 3 แบบ คือ

5.1 แบบขุดเปิดกว้าง (Open excavation)

เหมาะสำหรับบริเวณก่อสร้างกว้างโล่ง การก่อสร้างทำโดยการขุดลาดดินจนได้ระดับล่างสุดของห้องใต้ดินแล้วจึงก่อสร้างห้องใต้ดิน และทำการติดตั้ง Tanking membrane ที่ผิวภายนอกกำแพง แล้วจึงถมกลับด้วยทราย การขุดเปิดกว้างนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับดินที่มีความคงตัวในระดับหนึ่ง เพื่อที่จะไม่ต้องใช้พื้นที่ด้านข้างมากเกินไป และควรมีระบบป้องกันน้ำในระหว่างการก่อสร้างเนื่องจากไม่มีกำแพงเพื่อกันน้ำใต้ดินระหว่างก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้ควรมีระบบป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับ Tanking membrane จากการถมดินและกิจกรรมการก่อสร้างอื่นๆด้วย โดยวิธีการก่อสร้างระบบนี้ตามภาพที่ 1 และ 2



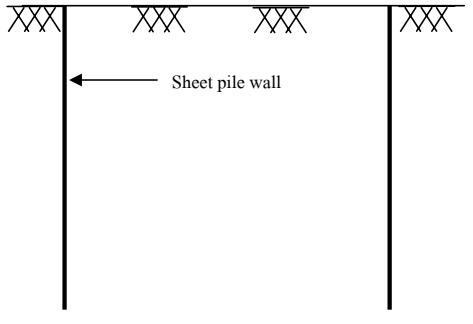
ภาพที่ 1 ขุดดินโดยทำการเปิดลาดดิน (Slope) ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน พร้อมติดตั้งระบบกันซึม (Tanking membrane) รอบๆ โครงสร้างใต้ดิน



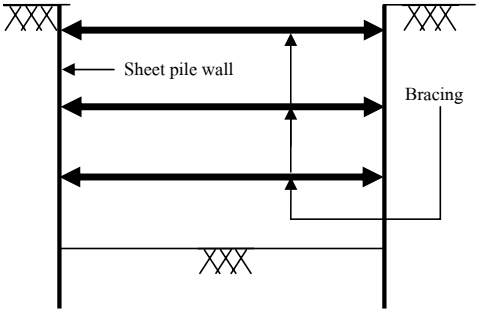
ภาพที่ 2 ถมทรายกลับข้างๆ โครงสร้างใต้ดิน

5.2 แบบใช้กำแพงแผ่นพืดเหล็ก (Sheet pile) เป็นตัวป้องกันดินพังชั่วคราว

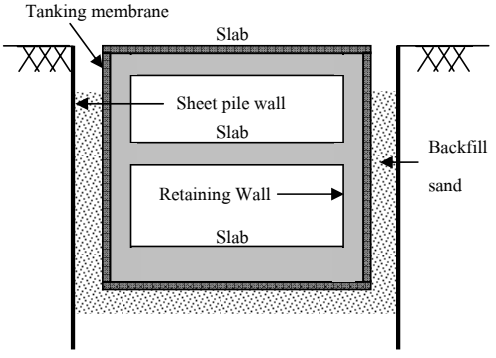
เหมาะสำหรับพื้นที่ในเมืองที่มีอาคารข้างเคียงและห้องใต้ดินลึกไม่เกิน 6-7 เมตร ดำเนินการโดยกดแผ่นพืดเหล็กกันดินชั่วคราว (Sheet pile) ให้มีขอบเขตกว้างกว่าผนังห้องใต้ดินประมาณ 1 เมตรแล้วขุดดินภายในออกสลับกับการติดตั้งค้ำยัน (Strut) จนถึงระดับขุดสุดท้ายแล้วจึงก่อสร้างห้องใต้ดินขึ้นมาและทำการป้องกันด้วย Tanking membrane ที่ผิวภายนอกพร้อมทั้งระบบป้องกันความเสียหายแก่ Tanking membrane และที่ผิวภายใน (หากมีความจำเป็น ขึ้นอยู่กับความต้องการของสภาพแวดล้อมภายในห้องใต้ดิน) แล้วจึงถมกลับช่องว่างระหว่างกำแพงแผ่นพืดเหล็กกับผนังกำแพงห้องใต้ดินด้วยทรายจนเต็มและแน่นแล้วจึงถอนแผ่นพืดเหล็กชั่วคราวออก วิธีการก่อสร้างโดยสังเขปตามภาพที่ 3 ถึง 6



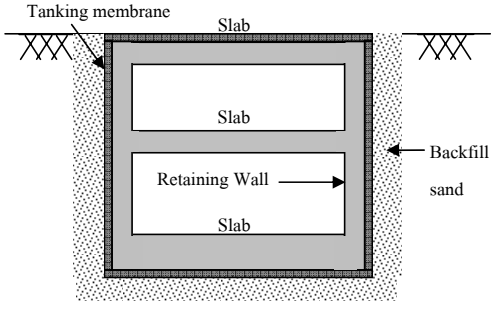
ภาพที่ 3 ทำการกดกำแพงแผ่นพืดเหล็ก (Sheet pile)



ภาพที่ 4 ขุดดินโดยการติดตั้งระบบค้ำยันชั่วคราว



ภาพที่ 5 ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน และติดตั้งระบบกันซึม (Tanking membrane) ปลดระบบค้ำยันทีละชั้น แล้วถมทรายข้าง Sheet pile จนถึงระดับพื้นดินเดิม



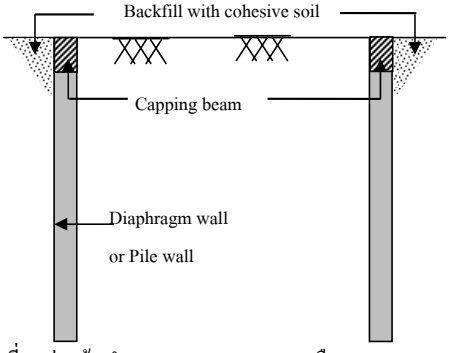
ภาพที่ 6 ถอนกำแพงแผ่นพืดเหล็ก (Sheet pile) ออก

อนึ่ง การถมกลับด้วยทรายของวิธีการก่อสร้างตามหัวข้อ 5.1 และ 5.2 นั้นทรายที่ถมกลับจะทำหน้าที่เหมือนบ่อกักน้ำทำให้มีน้ำใช้ น้ำทิ้งหรือน้ำฝนไหลมาขังในทรายถมติดผิวกำแพงด้านนอก น้ำและความชื้นจะซึมผ่านกำแพงคอนกรีตเข้าสู่ห้องใต้ดิน จึงต้องการป้องกันโดยติดตั้งวัสดุกันซึมโดยรอบ (Tanking protection) หรือใช้ระบบป้องกันน้ำแบบอื่นผสมด้วย

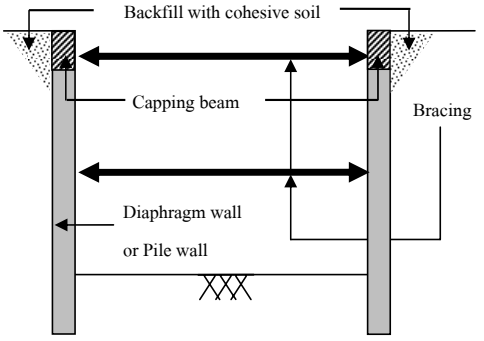
5.3 แบบใช้กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงหรือผนังกำแพงแบบไดอะแฟรมวอลล์

เหมาะสำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกตั้งแต่ 3 ชั้นที่มีระดับขุดดินลึกตั้งแต่ 7.5 เมตรขึ้นไป ดำเนินการโดยการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเรียง (Pile wall) หรือ กำแพงไดอะแฟรมวอลล์ (D-wall) หรือกำแพงกันดินชนิดแข็งประเภทอื่น (Rigid wall) มีความยาวตามขอบรูปห้องใต้ดิน เมื่อก่อสร้างกำแพงเสร็จแล้วอาจเลือกวิธีการก่อสร้างห้องใต้ดินได้สองแบบคือแบบ Bottom up หรือ Top down ซึ่งมีวิธีการโดยสังเขป ดังนี้ คือ

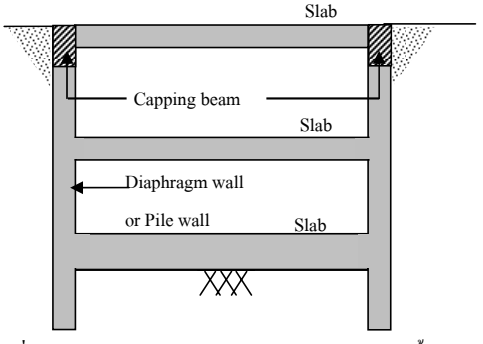
5.3.1 Bottom up construction: ตามภาพที่ 7-10 เมื่อก่อสร้างกำแพง Pile wall หรือ D-wall เสร็จแล้วทำการก่อสร้างคานรัดหัวกำแพง (Capping beam) โดยรอบกำแพง แล้วจึงขุดดินภายในออกสลับกับการติดตั้งค้ำยัน (Strut) ในแต่ละระดับเพื่อป้องกันกำแพงกันดินพังและการเคลื่อนตัวของดิน จากนั้นจึงทำการขุดดินจนถึงระดับขุดสุดท้ายแล้วก่อสร้างห้องใต้ดินขึ้นมา เนื่องจากกำแพงชนิดนี้ก่อสร้างโดยตรงลงในชั้นดินโดยหลักการแล้วจะไม่มีงานถมกลับ (เว้นแต่งานถมกลับหลังการก่อสร้าง Capping beam ด้วย Cohesive soil) จึงไม่สามารถทำการป้องกันความชื้นและน้ำรั่วซึมด้านนอกแบบ External tanking membrane การป้องกันจึงต้องหลีกเลี่ยงการขุดดินและถมกลับข้างกำแพงด้วยทรายและขจัดแหล่งกำเนิดน้ำบริเวณข้างกำแพง เช่น ก๊อกน้ำใช้ ฯลฯ หรือทำ External tanking membrane ระหว่างกำแพงกันดินกับคานรัดหัว Capping beam หากมีน้ำรั่วซึมจากสาเหตุดังกล่าวนิยมแก้ไขโดยใช้วิธีทำ Drain cavity โดยก่อผนังภายในอีกชั้นดังตัวอย่างในตารางที่ 1 Type C2 หรือ C3 สำหรับการก่อสร้างแบบ Bottom-up มีวิธีการโดยสังเขป ดังต่อไปนี้



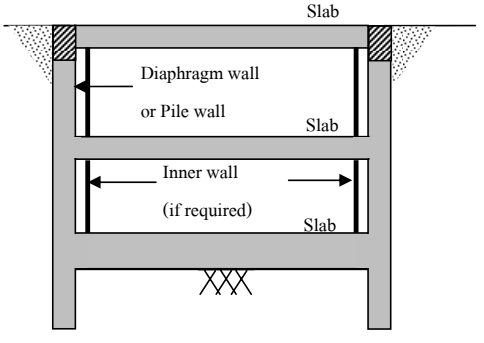
ภาพที่ 7 ก่อสร้างกำแพง Diaphragm wall หรือ Pile wall และก่อสร้างคานรัดหัว (Capping beam)



ภาพที่ 8 ขุดดินโดยการติดตั้งระบบค้ำยันชั่วคราว



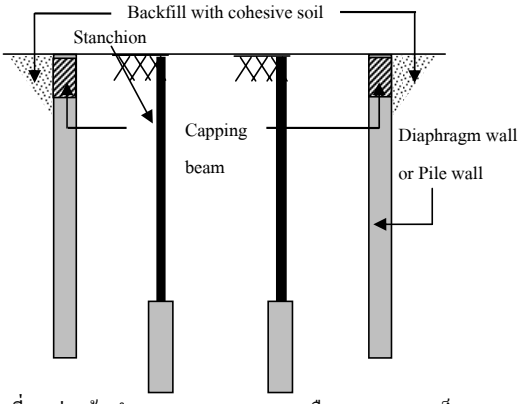
ภาพที่ 9 ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน จากล่างสุด ปลดระบบค้ำยันทีละชั้น เมื่อมีพื้นมารองรับ



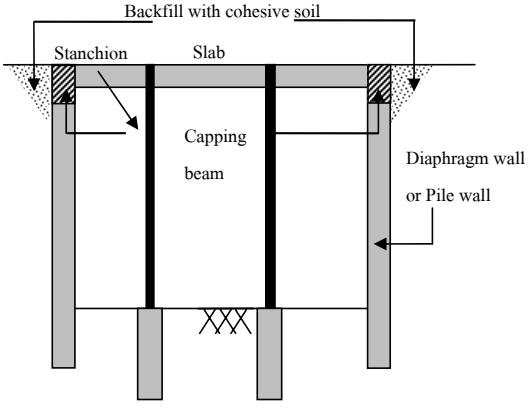
ภาพที่ 10 ก่อสร้างผนังชั้นในเพื่อกันความชื้น (อาจเป็นผนังก่ออิฐหรือกระเบื้องฉาบเรียบ)

5.3.2 Top - down construction: เมื่อก่อสร้างกำแพง Pile wall หรือ D-wall เสร็จแล้วทำการก่อสร้าง Capping beam โดยรอบกำแพง พร้อมทั้งก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion เพื่อรองรับน้ำหนักพื้น แล้วจึงขุดดินจนถึงระดับห้องใต้ดินชั้นแรกแล้วใช้พื้นดินเป็นแบบหล่อชั้นใต้ดินชั้นแรกให้ยันกำแพงทุกด้านโดยให้พื้นที่หล่อนี้ทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยัน โดยทั่วไปการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินนั้นมักจะข้ามชั้นที่ถัดจากชั้นที่หล่อพื้นเสร็จไปแล้ว 1 ชั้นเพื่อให้มีพื้นที่ทำงานของเครื่องจักรขุดดินที่จะต้องเคลื่อนที่ทำงานภายใต้พื้นชั้นบน ในการหล่อพื้นนี้จะต้องเว้นช่องไว้ในตำแหน่ง จำนวน และ ขนาดที่เหมาะสมเพื่อเป็นจุดใช้ลำเลียงดินที่จะขุดในชั้นลึกลงไปขึ้นมาได้ และเป็นจุดลำเลียงวัสดุที่จะนำลงไปหล่อพื้นชั้นล่างๆลงไปอีก ระหว่างการก่อสร้างควรจัดเตรียมระบบระบายอากาศให้มีการถ่ายเทเพียงพอ เมื่อดำเนินการตามลำดับขั้นตอนในการหล่อพื้นชั้นต่อๆไปเหมือนกับหล่อพื้นชั้นแรกครบทุกชั้นแล้วจึงปิดช่องว่างที่เว้นไว้ ข้อดีของการก่อสร้างระบบนี้คือไม่ต้องใช้ค้ำยันชั่วคราว นอกจากนี้ค้ำยันถาวรที่เป็นพื้นจะมีความแข็งมากกว่าค้ำยันชั่วคราวทำให้การเคลื่อนตัวของกำแพงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการก่อสร้างด้วยระบบอื่น และการใช้วิธีการก่อสร้างระบบนี้สามารถลดระยะเวลาก่อสร้างโดยรวมได้หากชั้นใต้ดินมีความลึกมาก เนื่องจากกำแพงชนิดนี้ก่อสร้างโดยตรงลงในชั้นดินจึงไม่มีการถมทรายกลับและไม่สามารถทำการป้องกันความชื้นและน้ำแบบ External tanking membrane ได้ การป้องกันจึงต้องหลีกเลี่ยงการขุดดินและถมกลับด้วยทรายข้างกำแพง ควรใช้ดินที่มีลักษณะทึบน้ำ Cohesive soil และขจัดแหล่งน้ำบริเวณข้างกำแพง เช่น ก๊อกน้ำใช้ ฯลฯ หรือทำ External tanking membrane ระหว่างกำแพงกันดินกับคานรัดหัว Capping beam หากมีน้ำรั่วซึมจากสาเหตุดังกล่าว นิยมแก้ไขโดยใช้วิธีทำ Drain cavity โดยก่อผนังภายในอีกชั้นดังตัวอย่างในตารางที่ 1 Type C2 หรือ C3

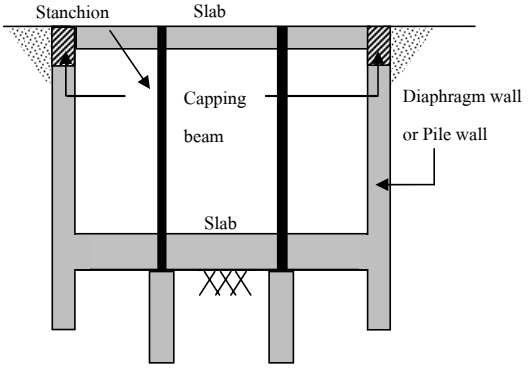
ในกรณีที่ใช้กำแพงแบบ D–wall บ่อยครั้งที่พบว่าเมื่อก่อสร้าง Capping beam ตามข้อ 5.3.1 และ 5.3.2 แล้วไม่ทำการติดตั้งวัสดุกันซึมบริเวณรอยต่อของคานรัดหัวกับส่วนบนของ D-wall แล้วยังใช้ทรายเป็นวัสดุถมกลับ เมื่อมีน้ำไหลมาขังในทรายถมจึงทำให้มีน้ำรั่วซึมจากจุดรอยต่อนี้ผ่านเข้าสู่ Capillary pore ในคอนกรีตกำแพงลงสู่ชั้นด้านล่าง (คอนกรีตของ D-wall หล่อโดยการเทคอนกรีตแบบเทใต้น้ำที่คอนกรีตจะแน่นด้วยน้ำหนักตัวเอง ซึ่งไม่แน่นเท่าคอนกรีตที่ถูกทำให้แน่นด้วยการจี้ จึงมี Capillary pore ใน D-wall จึงมีมากกว่าคอนกรีตที่แน่นโดยการจี้) ดังนั้นเมื่อพบเห็นน้ำรั่วซึมเข้าไปภายในห้องใต้ดินผู้เกี่ยวข้องควรตรวจสอบแก้ไขจากจุดนี้ก่อนการก่อสร้างแบบ Top-down มีวิธีการก่อสร้างโดยสังเขปตามภาพที่ 11-14



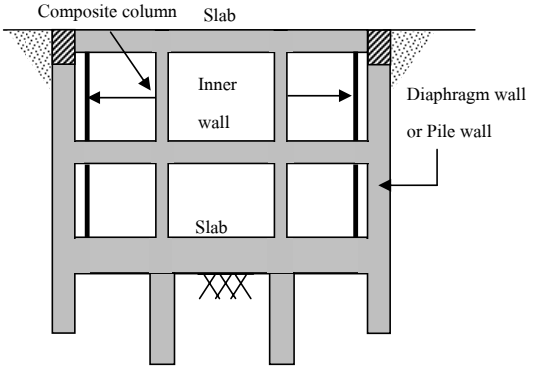
ภาพที่ 11 ก่อสร้างกำแพง Diaphragm wall หรือ Pile wall เสาเข็มเจาะพร้อม Stanchion และก่อสร้างคานรัดหัว (Capping beam)



ภาพที่ 12 ก่อสร้างพื้นชั้นบนก่อน แล้วจึงทำการขุดดิน



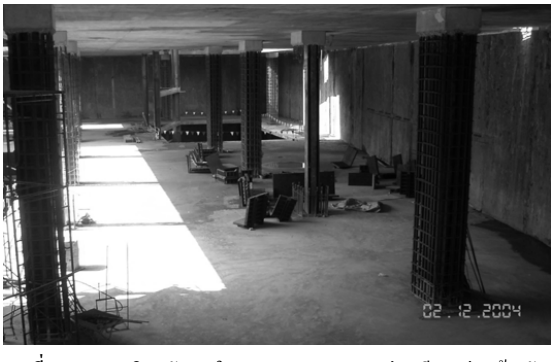
ภาพที่ 13 ก่อสร้างพื้นโดยข้ามพื้นไปหนึ่งชั้นเพื่อให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้



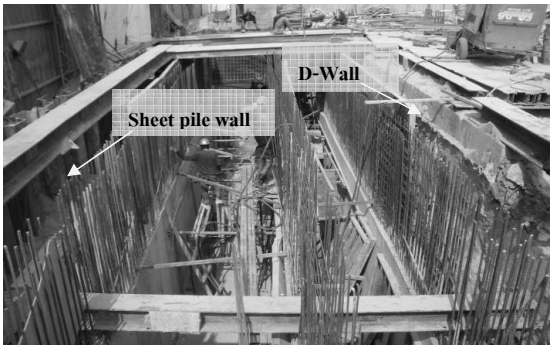
ภาพที่ 14 ก่อสร้างเสา พื้นชั้นที่ข้ามและโครงสร้างส่วนอื่น อาจมีการก่อสร้างผนังชั้นในเพื่อกันความชื้น (อาจเป็นผนังก่ออิฐ หรือกระเบื้องฉาบเรียบ)

6. ปัญหาที่ทำให้มีน้ำรั่วซึมได้ในกรณีใช้กำแพงแบบ D-wall

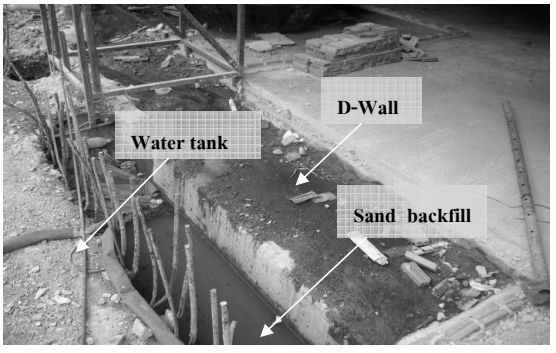
การรั่วซึมของน้ำจากภายนอกกำแพงในหลายโครงการที่ผ่านมาที่ห้องใต้ดินใช้กำแพงแบบ D–wall มักเกิดจากมีการขุดดินใกล้ชิดกับภายนอกผนังกำแพงเพื่อก่อสร้างคานรัดหัวเสาเข็ม หรือขุดดินใกล้ชิดกับกำแพงเพื่อก่อสร้างถังเก็บน้ำ หรือถังบำบัดน้ำเสีย เมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วถมกลับช่องว่างด้วยทราย ผลลัพท์ที่ตามมาก็จะมีน้ำไหลมารวมในทรายถมและรั่วซึมผ่านผนังกำแพงคอนกรีตเข้าภายในห้องใต้ดิน เคยมีโครงการก่อสร้างที่ใช้กำแพง D-wall เป็นกำแพงกันดิน ที่มีการก่อสร้างบ่อเก็บน้ำข้างผนัง D-wall ปรากฏว่าภายหลังก่อสร้างบ่อเก็บน้ำแล้วมีน้ำไหลมาขังในทรายถม ทำให้มีน้ำรั่วเข้าในห้องใต้ดินผ่านกำแพง D-wall เข้ามาในห้องใต้ดินจำนวนมาก รายละเอียดตามภาพที่ 15 -18



ภาพที่ 15 สภาพผิวผนังภายในของกำแพง D-wall ก่อนมีการก่อสร้างถังเก็บน้ำใต้ดินข้างผนังภายนอกกำแพง D-wall



ภาพที่ 16 การก่อสร้างถังเก็บน้ำใต้ดินข้างผนังภายนอกกำแพง D-wall โดยฝั่งตรงข้าม D- wall ใช้ Sheet pile เป็นตัวกันดิน



ภาพที่ 17 หลังก่อสร้างถังเก็บน้ำใต้ดินเสร็จมีน้ำขังในทรายถมระหว่างผนังบ่อกับผนังภายนอกกำแพง D-wall



ภาพที่ 18 หลังก่อสร้างถังเก็บน้ำใต้ดินเสร็จ ผิวกำแพงภายใน D-wall ชื้นและมีน้ำรั่วซึมไหลลงชั้นล่างๆ ตลอดเวลา

7. สรุป

การออกแบบก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพมหานครให้สามารถต้านทานความชื้นหรือน้ำรั่วซึมเข้ามาในห้องใต้ดินได้อย่างเหมาะสมกับสภาพการใช้งานห้องใต้ดินตามระดับการใช้งานนั้น ผู้ออกแบบต้องศึกษาและเข้าใจสภาพแวดล้อมภายนอกห้องใต้ดินภายหลังก่อสร้างเสร็จอย่างถ่องแท้ และกำหนดรายการก่อสร้างให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง เพราะโดยธรรมชาติเมื่อมีการขุดดินเพื่อสร้างกำแพงห้องใต้ดินแล้วถมกลับด้วยทรายก็จะเกิดน้ำรั่วหรือความชื้นผ่านเข้าสู่ห้องใต้ดินเสมอ ผู้ออกแบบจึงออกแบบป้องกันโดยการทำ Tanking protection ที่ผิวผนังภายนอก/ภายในหรือทั้งสองด้านของผนังกำแพงเสมอ แต่ในกรณีของผนังกำแพงแบบ Diaphragm wall ที่ไม่สามารถทำ Tanking protection ได้ ผู้ออกแบบต้องกำหนดในรายการก่อสร้างห้ามการถมกลับด้วยทรายหรือดินเม็ดหยาบข้างหรือใกล้กำแพง เพราะน้ำจะไหลมาขังทำให้ความชื้นหรือน้ำซึมผ่าน Capillary pore ของคอนกรีตกำแพงเข้าสู่ห้องใต้ดิน หากป้องกันไม่ได้ก็ต้องกำหนดให้ทำ Drain cavity ดักน้ำไปรวมจุดเดียวที่ชั้นล่างสุดแล้วสูบออก ตามที่ BS 8102,1990 [4] แนะนำไว้ ส่วนรอยต่อกำแพงระหว่าง Capping beam กับระดับบนของ Diaphragm wall ต้องกำหนดให้ติดตั้งวัสดุกันซึมป้องกันด้านนอกไว้ด้วย และห้ามการถมกลับด้วยทราย แต่ควรใช้ Cohesive soil แทน

เอกสารอ้างอิง

[1] พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2543)

[2] CIRIA.1995. Water-Resisting Basements, report 139. Thomas Telford, ISBN 07277 2042-2, London, United Kingdom

[3] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2536. คอนกรีตเทคโนโลยี

[4] British Standard Institution, 1990. Code of Practice for protection of structures against water from the ground. BS8102: 1990.

กรณีศึกษาเทคนิคงานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง

CASE STUDY: EXCAVATION TECHNIQUE FOR DEEP BASEMENT BY USING TOP-DOWN CONSTRUTION METHOD

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ (Chanchai Submaneewong)[1]

วรพงษ์ อติวรรณาพัฒน์ (Worapong Atiwannapat)[2]

สมศักดิ์ สมบูรณ์ทรัพย์ (Somsak Somboonsub)[3]

[1]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) E-mail: s_chanchai@yahoo.com

[2]วิศวกรโครงการ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) E-mail: seafco@seafco.co.th

[3]ผู้จัดการโครงการ บริษัท เพาเวอร์ไลน์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน) E-mail: bobaecivil@yahoo.com

บทคัดย่อ : งานขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดินด้วยระบบการก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top-Down Construction) ได้เริ่มมีการนำมาใช้ในหลายๆ โครงการในกรุงเทพฯ ระบบการก่อสร้างวิธีนี้ต้องอาศัยส่วนโครงสร้างเช่น เสาเป็นตัวถ่ายน้ำหนักโครงสร้างลงสู่เสาเข็มและพื้นเป็นตัวค้ำยันต้านทานแรงดันดินในระหว่างการก่อสร้าง ดังนั้นจึงต้องมีงานเตรียมการล่วงหน้าเช่นการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion บนหัวเสาเข็ม โดยถ้ามีการติดตั้ง (Installation) ไว้อย่างถูกหลักตามตำแหน่งอย่างแม่นยำแล้วจะทำให้การขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่างเป็นไปอย่างรวดเร็ว ประหยัดและมีมาตรฐานสูง บทความนี้นำเสนอกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึก โครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง ซึ่งก่อสร้างโดยใช้ระบบการก่อสร้างจากบนลงล่าง

ABSTRACT : Top-Down construction method has been used for construction of deep basements at major projects in Bangkok. To be able to apply this construction method, some structure elements such as columns and floor slabs are required to sustain the construction load and to utilize as a part of the bracing system, respectively. This method could be reliable, rapid and economic construction with high standard if an aforementioned works such as the installation of stanchions embedded in bored piles are properly planed and accurately executed. This paper presents a case study of construction technique by using top-down construction method in Bobae Bamrungmuang project.

KEYWORDS : Top-Down Construction, Diaphragm Wall, Stanchion

1. บทนำ

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยระบบการก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top-Down Construction) โดยใช้กำแพงกันดินระบบ Diaphragm Wall ได้เริ่มนำมาใช้ตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1960 เพื่อก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินที่โครงการ Leicester Square และที่ โครงการ Winter Gardens Theatre ในกรุงลอนดอน (Puller, 1996 [1]) และการก่อสร้างระบบนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายไปในประเทศต่างในทวีปยุโรป ทวีปอเมริกา ทวีปเอเชียและในประเทศไทย

วิธีการก่อสร้างจากบนลงล่างนอกจากจะประหยัดก่อสร้างได้รวดเร็วแล้ว การเคลื่อนตัวของกำแพงระหว่างการขุดเพื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินก็น้อยและสามารถควบคุมได้

ง่าย การก่อสร้างจากบนลงล่างที่ประหยัด รวดเร็วและป้องกันการเคลื่อนตัวของดินได้ดี จะต้องดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้ คือ

- กำแพงซึ่งทำหน้าที่ป้องกันพื้นที่ขุดต้องได้รับการค้ำยันโดยพื้นถาวรตามระดับชั้นที่ออกแบบไว้
- ผิวหน้าพื้นดินที่ขุดแต่ละระดับจะต้องขุดแต่งให้สามารถใช้เป็นแบบสำหรับเทคอนกรีตพื้นได้
- การขนย้ายดินที่ขุดออกนอกหน่วยงานต้องกระทำอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง

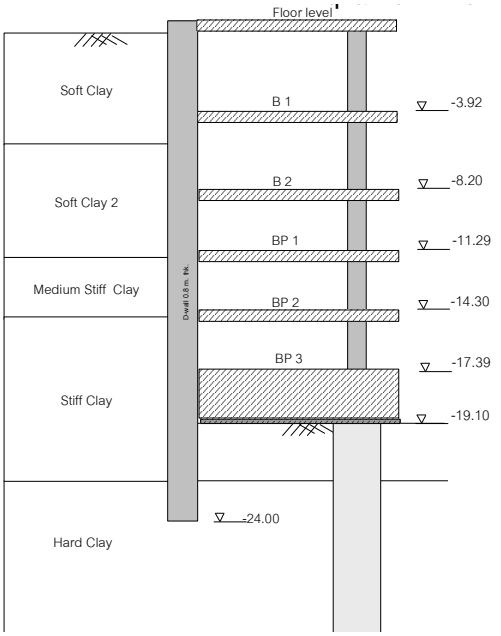
ในโครงการใหญ่ของภาคเอกชนหลายโครงการ ได้นำเอาระบบการก่อสร้างแบบก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top – Down Construction) มาใช้ร่วมกับกำแพง Diaphragm Wall เช่นที่โครงการโรงแรม แกรนด์ไชน่า ถนนเยาวราชซึ่งมีที่จอดรถใต้ดิน 6 ชั้น โครงการอาคารสำนักงาน โรยัลเจริญกรุง ถนนสีลมที่มีที่จอดรถใต้ดิน 6 ชั้น อาคารเอ็มไพล์ ทาวเวอร์ ถนนสาทรใต้ที่มีที่จอดรถใต้ดิน 6 ชั้น และโครงการโรงพยาบาลราชเวช ถนนพญาไท ซึ่งมีที่จอดรถใต้ดิน 4 ชั้น เป็นต้น ซึ่งทุกโครงการประสบผลสำเร็จด้วยดี

ต่อมาในภาครัฐได้นำระบบการก่อสร้างแบบก่อสร้างจากบนลงล่างมาใช้ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินร่วมกับกำแพง Diaphragm Wall ซึ่งในระหว่างการก่อสร้างได้มีการเปิดการจราจรให้ยวดยานสามารถวิ่งที่ระดับดินเหนือระดับการก่อสร้างใต้ดินได้ (รูปที่ 1)

โครงการกรณีศึกษาเป็น งานขุดดินลึกประมาณ 19.10 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 5 ชั้น (รูปที่ 2) โครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง ตั้งอยู่ริม ถนน บำรุงเมือง ใช้ระบบกำแพง Diaphragm Wall หนา 80 ซม. ลึก 24 เมตร เป็นระบบป้องกันดิน โดยออกแบบขั้นตอนการขุดดินด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง ใช้โครงสร้างพื้นอาคารเป็นระบบค้ำยันกำแพง



รูปที่ 1 การเปิดพื้นผิวจราจรในระหว่างการก่อสร้าง



รูปที่ 2 ลักษณะชั้นใต้ดิน 5 ชั้น ในโครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง

2. แนวทางการออกแบบ

2.1 โครงสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพง Diaphragm Wall

การออกแบบเสาเข็มเจาะสำหรับโครงการนี้ผู้ออกแบบได้กำหนดตำแหน่งเสาเข็มเจาะตรงกับตำแหน่งเสาอาคาร ดังนั้นเสาเข็มเจาะในแต่ละต้นจึงออกแบบตามการรับน้ำหนักของเสาอาคารแต่ละต้นซึ่งไม่เท่ากัน โดยพิจารณาทั้งแรงอัดและแรงดึงที่เกิดจากแรงดันน้ำใต้ดิน (Uplift Force) ในโครงการนี้ได้ออกแบบกำหนดความลึกเสาเข็มที่ -60 เมตร และจัดขนาดเสาเข็มตามภาระการรับน้ำหนัก ซึ่งมีหลากหลายขนาดดังแสดงในตารางที่ 1

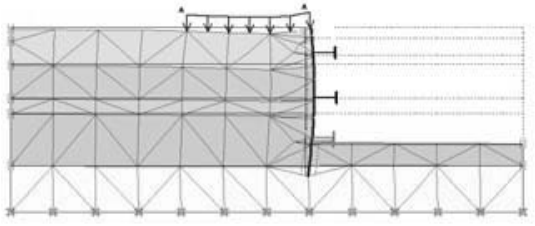
ตารางที่ 1 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแต่ละขนาดในโครงการ

ขนาดเสาเข็ม	น้ำหนักบรรทุกออกแบบ (ตัน)
เสาเข็มเจาะ ϕ 0.80 ม.	500
เสาเข็มเจาะ ϕ 1.00 ม.	750
เสาเข็มเจาะ ϕ 1.20 ม.	950
เสาเข็มเจาะ ϕ 1.50 ม.	1250
เสาเข็มเจาะ ϕ 1.65 ม.	1450
เสาเข็มเจาะ ϕ 1.80 ม.	1600
เสาเข็มแบเร็ต 0.80 x 3.00 ม.	1750

การวิเคราะห์เพื่อออกแบบกำแพง Diaphragm Wall ใช้ FEM โดยกำหนดขั้นตอนในการขุดดินและก่อสร้างพื้นเพื่อค้ำยันกำแพงในแต่ละความลึกที่ทำการขุด โดยมีขั้นตอนโดยสังเขปตามตารางที่ 2 รูปการแบ่ง Mesh ในการวิเคราะห์ FEM แสดงในรูปที่ 3

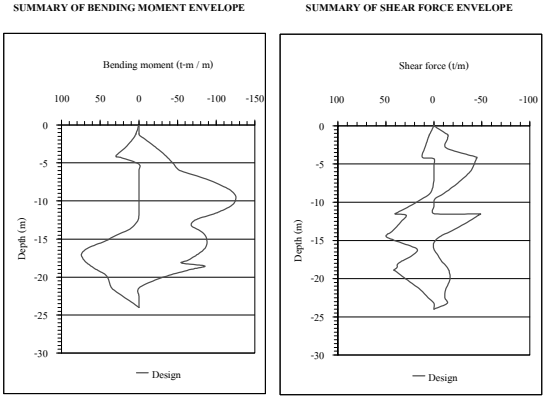
ตารางที่ 2 ขั้นตอนงานขุดดินโดยสังเขปเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	ขุดดินลึก -1.70 ม. และติดตั้งระบบค้ำยันชั่วคราวที่ระดับ -1.50 ม.
2	ขุดดินลึก -4.50 ม. และก่อสร้างพื้นชั้น B1
3	ปลดค้ำยันชั่วคราวที่ระดับ -1.50 ม.
4	ขุดดินลึก -11.80 ม. และก่อสร้างพื้นชั้น BP1
5	ขุดดินลึก -19.10 ม. และก่อสร้าง Mat foundation
6	ก่อสร้างพื้นชั้น BP2 B2 และ GF



รูปที่ 3 Finite Element Mesh

การออกแบบปริมาณเหล็กเสริมของ Diaphragm Wall ได้ออกแบบเพื่อต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดจากแรงดันดินในระหว่างการขุดดินในแต่ละขั้นตอน โดยครอบคลุมในทุกๆ ขั้นตอนงานขุดดินเพื่อก่อสร้างพื้นอาคาร (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์และแรงเฉือน

2.2 โครงสร้างเสาเหล็ก Stanchion

เนื่องจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินสำหรับโครงการนี้ก่อสร้างโดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion ไว้ที่หัวเสาเข็มเพื่อใช้รับน้ำหนักพื้นแต่ละชั้นที่กำหนดไว้ก่อนที่จะขุดถึงชั้นรากฐาน โดยออกแบบใช้เสาเหล็ก H-350 หรือ H-400 รับน้ำหนักในตำแหน่งเสาแต่ละต้น แล้วถ่ายแรงไปสู่เสาเข็มเจาะโดยผ่านแรงยึดเหนี่ยวตามระยะฝังไว้ในเสาเข็มแต่ละต้นเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุก ภายหลังงานขุดดินแล้วเสร็จเสาเหล็ก Stanchion ยังกำหนดให้ใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างเสาถาวรสำหรับรับน้ำหนักตัวอาคาร (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 ลักษณะเสาเหล็ก Stanchion ที่ใช้ในโครงการ

2.3 โครงสร้างพื้น

เนื่องจากการขุดดินด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง พื้นที่ทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยันจำเป็นต้องมีช่องเปิดให้สามารถลำเลียงวัสดุ เครื่องจักร ตลอดจนดินที่ขุดออก จึงต้องเปิดช่องพื้นชั่วคราวระหว่างการก่อสร้าง

การออกแบบพื้นได้มีการพิจารณาผลกระทบทางโครงสร้างของพื้นเมื่อมีการเปิดช่อง ลักษณะช่องเปิดสำหรับโครงการนี้ได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษะช่องเปิดสำหรับลำเลียงวัสดุ เครื่องจักรและดินที่ขุด

3. เทคนิคการก่อสร้าง

3.1 เสาเข็มเจาะและกำแพง Diaphragm Wall

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพง Diaphragm Wall ได้ดำเนินการควบคู่กันไป ขั้นตอนการก่อสร้างก็เหมือนกับการก่อสร้างโดยทั่วไป แต่มีขั้นตอนเพิ่มเติมที่การติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion บนหัวเสาเข็มเจาะ และเนื่องจากโครงการนี้ตั้งอยู่ในเขตเมือง การจัดส่งคอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะและ Diaphragm Wall จึงไม่สะดวกด้วยเหตุผลทางการจราจรและเวลา จึงได้มีการจัดตั้ง plant ชั่วคราวภายในหน่วยงานเพื่อผลิตคอนกรีตใช้ภายในหน่วยงาน (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 รูปแสดงการจัดตั้ง plant ชั่วคราวภายในหน่วยงานเพื่อผลิตคอนกรีตใช้ภายในหน่วยงาน

3.2 การติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion บนหัวเสาเข็มเจาะ

วิธีการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion บมจ. ซีฟโก้ ได้คิดวิธีการติดตั้งแบบติดตั้งภายหลังการเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะโดยกดเสาเหล็กให้จมลงในคอนกรีตหัวเสาเข็มภายหลังจากการเทคอนกรีตแล้วเสร็จ โดยใช้สกรูปรับระยะบังคับแนวกับตัวปลอกเหล็กชั่วคราว เป็นตัวควบคุมความเที่ยงตรงดังแสดงในรูปที่ 8



ก. สกรูปรับระยะบังคับแนวกับตัวปลอกเหล็กชั่วคราว



ข. รูปขณะติดตั้งเสาเหล็ก

รูปที่ 8 การติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion บนหัวเสาเข็มเจาะ

4. การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง

4.1 คุณภาพการก่อสร้างเสาเข็มเจาะและ Diaphragm Wall

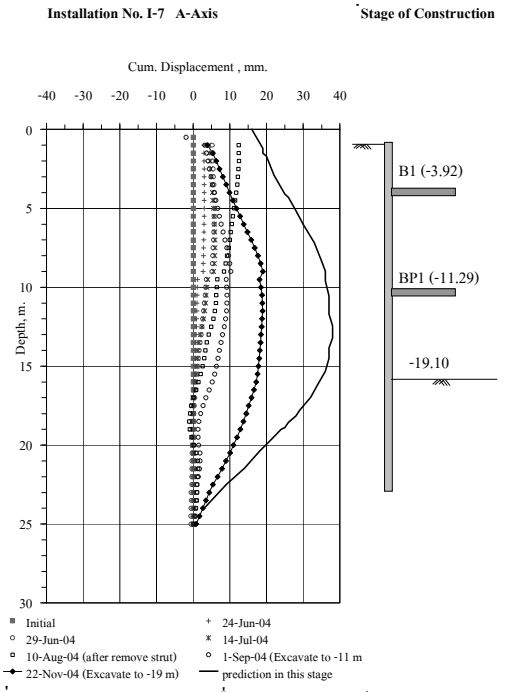
การขุดดินและก่อสร้างด้วยระบบบนลงล่าง จะอาศัยเสาเหล็ก Stanchion รับน้ำหนักโครงสร้างในระหว่างการก่อสร้างดังนั้นความเที่ยงตรงจึงเป็นหัวใจสำคัญเนื่องจากเมื่อใดก็ตามถ้าการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion เอียงซึ่งอาจเกิดจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเอียงหรือวิธีการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion เอง จะทำให้เกิดโมเมนต์กระทำที่ตัวเสาทำให้กำลังรับแรงในแนวแกนลดลง จนอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นมาตรฐานการก่อสร้างในโครงการนี้จึงให้ความสำคัญ ความระมัดระวังและการควบคุม เช่นการกำหนดการทำเสาเข็มเจาะต้องมีค่าความเอียงที่ยอมได้ไม่เกิน 1:100 ภายหลังการขุดเจาะดินได้มีการสุ่มทำการตรวจสภาพหลุมเจาะ โดยใช้เครื่องมือ Drilling Monitor และมีการตรวจสอบตำแหน่งเสาเหล็ก Stanchion ก่อนและภายหลังการติดตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 การตรวจสภาพหลุมเจาะ โดยใช้เครื่องมือ Drilling Monitor



รูปที่ 10 การตรวจสอบตำแหน่งเสาเหล็กก่อนและภายหลังการติดตั้ง



รูปที่ 11 ผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงด้วย Inclinometer

4.2 การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของกำแพง Diaphragm Wall ในระหว่างงานขุดดิน

ในการสอบทานความถูกต้องของกำแพง Diaphragm Wall ในขั้นตอนการทำงานขุดดินจริงกับขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ในหุ่นจำลอง (Model) ในการออกแบบพฤติกรรมของตัวกำแพงโดยใช้ FEM ต้องอาศัยผลการวัดการเคลื่อนตัวจริงของกำแพง Diaphragm Wall โดยใช้ Inclinometer การวัดการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนจะกำหนดเป็นค่าระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level) เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการควบคุมงาน นอกจากนั้นผลการวัดยังสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มการทรุดตัวของผิวดินบริเวณรอบบ่อขุดได้

ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงสำหรับโครงการนี้ซึ่งมีการติดตั้งท่อ Inclinometer จำนวน 8 ท่อ แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวของกำแพง Diaphragm Wall ที่วัดได้จริงในขั้นตอนภายหลังการขุดดินจนถึงความลึกสุดท้ายที่ -19.10 ม. (รูปที่ 12) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ทำนายไว้ในการออกแบบ



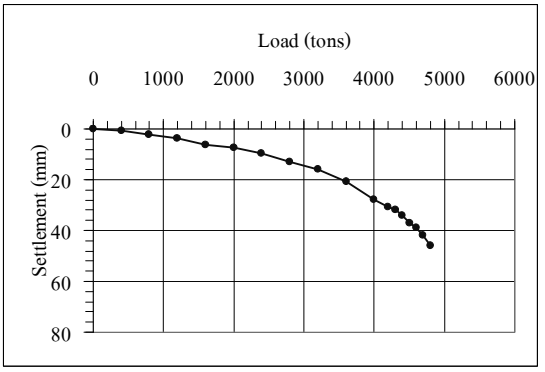
รูปที่ 12 รูปแสดงลักษณะหน้างานภายหลังการขุดดินจนถึงความลึกสุดท้ายที่ -19.10 ม.

4.3 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะ

ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะได้กำหนดให้ทำการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 ม. ซึ่งออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุก 1600 ตันที่สัดส่วนความปลอดภัย 2.5 ภาพแสดงการทดสอบและผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13 และ 14 (อี.ดี.อี, 2547 [2]) ซึ่งพบว่าเสาเข็มเจาะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ โดยในการทดสอบจริงได้ทำการทดสอบไปถึงน้ำหนักสูงสุด 300 % ที่ 4800 ตัน



รูปที่ 13 รูปแสดงการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 ม. x 60.0 ม.



รูปที่ 14 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 ม. x 60.0 ม.

5. สรุปผลการก่อสร้าง

การขุดดินและก่อสร้างชั้นใต้ดินลึก 5 ชั้น ที่ความลึกประมาณ -19.10 ม. ในโครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง ออกแบบให้ใช้ระบบการก่อสร้างด้วยระบบบนลงล่าง โดยใช้กำแพง Diaphragm Wall หนา 0.80 ม. ลึก -24.0 ม. และพื้นโครงสร้างอาคารเป็นระบบป้องกันดิน และใช้เสาเหล็ก Stanchion ที่ติดตั้งบนหัวเสาเข็มเจาะรับน้ำหนักโครงสร้างชั่วคราวในระหว่างการก่อสร้าง และเป็นส่วนของโครงสร้างเสาอาคารถาวรในภายหลัง ผลการก่อสร้างจนถึงปัจจุบันผ่านขั้นตอนงานขุดดินและก่อสร้างฐานราก Mat Foundation โดยอยู่ในระหว่างการเริ่มก่อสร้างโครงสร้างอาคารสูงส่วนบนดิน พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับตามขั้นตอนการออกแบบทุกขั้นตอน ทั้งนี้เนื่องจากความร่วมมือของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องทั้งผู้รับเหมา ผู้ควบคุมงาน และผู้ออกแบบ

การขุดดินภายใต้ระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top-down) ร่วมกับกำแพง Diaphragm Wall ซึ่งจัดเป็นระบบกำแพงที่แข็ง (Rigid Wall) ให้ค่าการเคลื่อนตัวน้อย โดยไม่เกิดผลกระทบกับข้างเคียงในด้านวิศวกรรม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้แต่งขอขอบคุณ บมจ. เพาเวอร์ไลน์ เอ็นจิเนียริ่ง ผู้รับเหมาหลักของโครงการและ บมจ. ซีฟโก้ ผู้รับเหมางานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพง Diaphragm Wall ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูล-รูปภาพร่วมกัน สำหรับใช้อ้างอิงในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Puller, M., 1996. Deep Excavation - a practical manual. Tomas Telford Publishing.

[2] บจ. อีดีอี, 2547. รายงานผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 เมตร ลึก 60.0 ม. โครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง

For further details, contact

Mr. Chanchai Submaneewong
SEAFCO Public Co., Ltd., 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klong Sam Wah, Bangkok 10510.
Tel. 0-2919-0090-7 ext. 112
E-mail: s_chanchai@yahoo.com

การก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลางด้วยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1] ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล [2] และชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ [3]

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

144 ถ. พระยาสุเรนทร์ แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510

โทร 0-2919-0090-7 โทรสาร 0-2518-3088

E-Mail: seafco@seafco.co.th

1. บทนำ

โครงการอาคารจอดรถใต้ดิน โรงพยาบาลกลาง ประกอบด้วย ลานเอนกประสงค์บนดิน และลานจอดรถชั้นใต้ดิน 4 ชั้น ตั้งอยู่ภายในเขตโรงพยาบาล บริเวณถนนหลวงตัดกับถนนเสือป่า โครงการนี้ประกอบด้วยชั้นใต้ดิน 4 ชั้น เพื่อใช้จอดรถยนต์และรถจักรยานยนต์ และพื้นชั้นหลังคาเป็นลานเอนกประสงค์เพื่อประกอบกิจกรรมต่างๆของโรงพยาบาล ตามรูปที่ 1 และรูปที่ 2

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างอาคารจอดรถ 4 ชั้น ที่ต้องทำการขุดดินลึกประมาณ 13 เมตรจากผิวดินระบบกำแพงกันดินได้ออกแบบให้ใช้ Diaphragm Wall เป็นกำแพงถาวรโดยรอบ และได้ถูกออกแบบให้ใช้เทคนิคการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top down Construction) โดยใช้คานและพื้นอาคารเป็นระบบค้ำยันถาวร เพื่อลดปริมาณการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบกำแพงเนื่องจากผลการขุดดิน



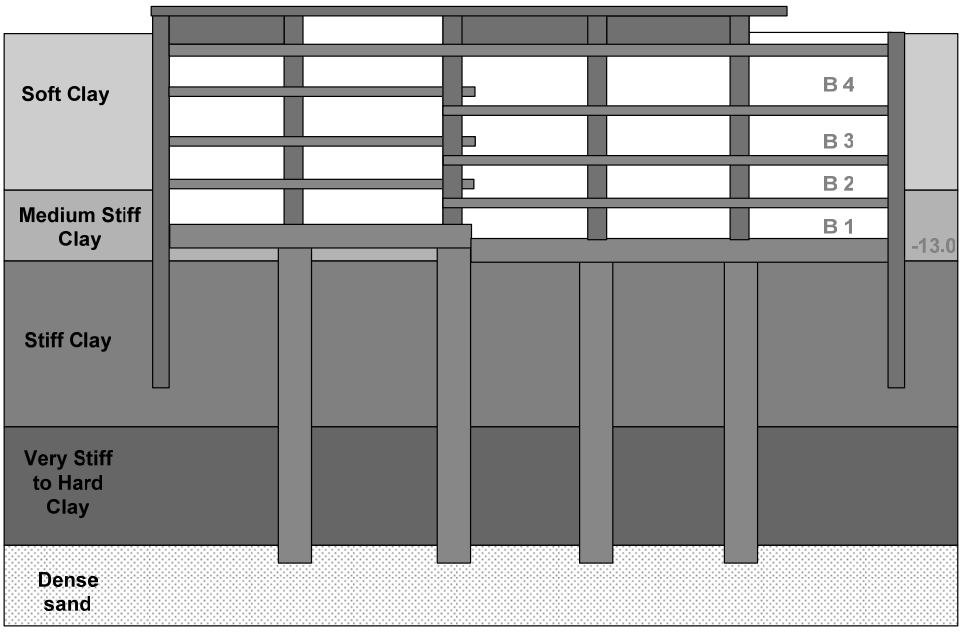
รูปที่ 1 รูปภาพแสดงลักษณะอาคารจอดรถใต้ดิน โรงพยาบาลกลางภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ

---

[1] กรรมการผู้จัดการใหญ่ บมจ. ซีฟโก้

[2] กรรมการรองผู้จัดการใหญ่ บมจ. ซีฟโก้

[3] วิศวกรปฐพี บมจ. ซีฟโก้



รูปที่ 2 ภาพตัดโดยสังเขปแสดงลักษณะอาคารจอดรถใต้ดิน โรงพยาบาลกลาง

2. ลักษณะโครงการโดยย่อ

โครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน โรงพยาบาลกลางมีรายละเอียดโครงการโดยสังเขปดังนี้

2.1 ชื่อโครงการ โครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน โรงพยาบาลกลาง

2.2 สถานที่ตั้งโครงการ โรงพยาบาลกลาง ถ.หลวง กรุงเทพฯ

2.3 ลักษณะอาคาร อาคารจอดรถยนต์ใต้ดิน 4 ชั้น
ลานเอนกประสงค์บนดิน 1 ชั้น
พื้นที่อาคารจอดรถประมาณ 2,800 ตารางเมตรต่อชั้น

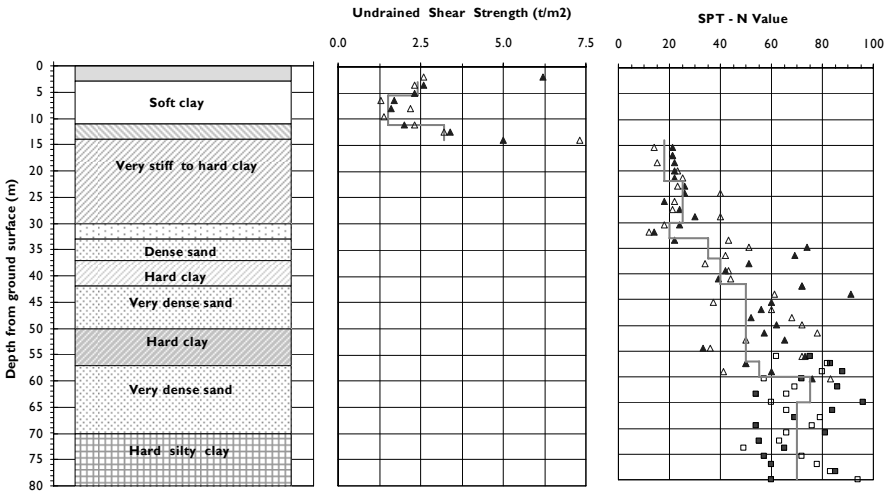
2.4 เจ้าของโครงการ สำนักการแพทย์ กรุงเทพมหานคร

2.5 ผู้รับเหมา บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

2.6 มูลค่าการก่อสร้าง 299,979,850 บาท

3. ลักษณะชั้นดิน

ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการจากผลการเจาะสำรวจชั้นดินใหม่ก่อนดำเนินการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบและยืนยันการออกแบบในโครงการนี้ซึ่งอาศัยผลการเจาะสำรวจดินพื้นที่ข้างเคียงภายในโรงพยาบาลเมื่อครั้งก่อสร้างตึก โดยผลการเจาะสำรวจใหม่ พบว่า ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการในช่วง 0-28 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนสลับดินเหนียวแข็ง และเริ่มพบชั้นทรายที่ความลึกประมาณ 29 เมตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะชั้นดินบริเวณโครงการ

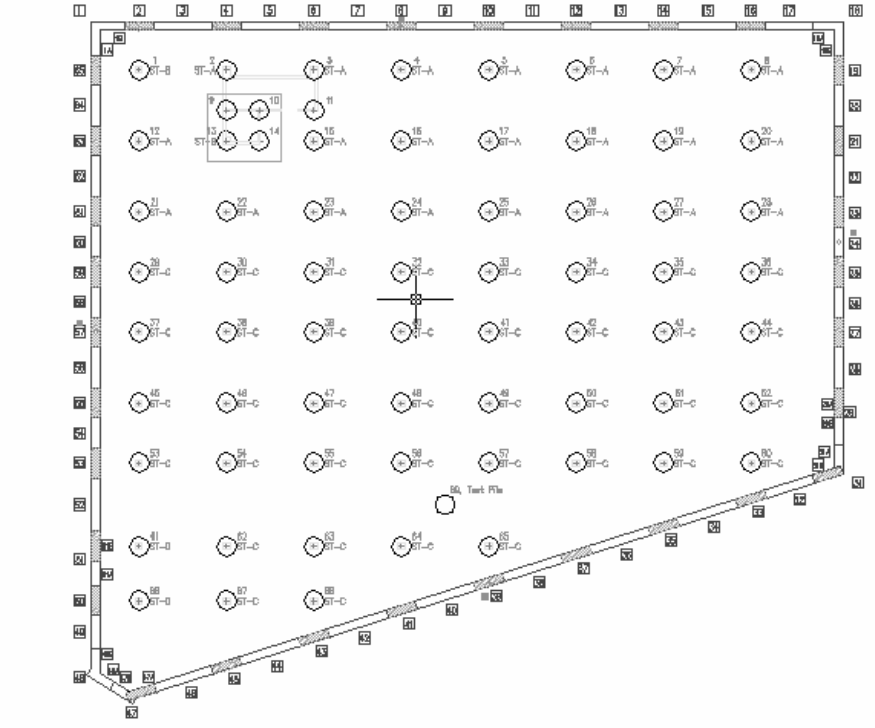
4. แนวทางการออกแบบ

4.1 โครงสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพง Diaphragm Wall

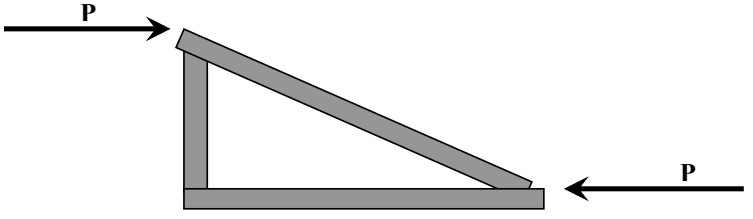
การออกแบบเสาเข็มเจาะสำหรับโครงการนี้ ได้กำหนดให้ตำแหน่งเสาเข็มเจาะตรงกับตำแหน่งเสาอาคาร พร้อมติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion ไว้ที่หัวเสาเข็มเพื่อใช้รับน้ำหนักพื้นแต่ละชั้นในระหว่างงานขุดดินเพื่อก่อสร้าง ดังนั้นเสาเข็มเจาะทุกต้นจึงออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักของเสาอาคารและต้องมีขนาดเหมาะสมเพื่อให้สามารถติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion ได้ ในโครงการนี้ใช้เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 เมตร ลึก 30 เมตร รับน้ำหนักปลอดภัยต้นละ 480 ตัน ค่าความปลอดภัย 2.5เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบเสาเข็มจำนวนประมาณ 69 ต้น โดยพิจารณาทั้งแรงอัดและแรงดึงที่เกิดจากแรงดันน้ำใต้ดิน (Uplift Force) แบบแปลนเสาเข็มเจาะแสดงในรูปที่ 4

การขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินออกแบบให้ใช้ Diaphragm Wall หนา 0.80 เมตร ลึก 20 เมตรสำหรับงานขุดดินลึกประมาณ 13 เมตร ด้วยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง การวิเคราะห์ออกแบบ Diaphragm wall ใช้ระเบียบวิธี Finite Element โดยกำหนดขั้นตอนในการขุดดินและก่อสร้างพื้นเพื่อค้ำยันกำแพง

ในแต่ละความลึกที่ทำการขุดดิน ซึ่งพื้นชั้นใต้ดินแต่ละชั้นของโครงการนี้มีลักษณะเป็นพื้นต่างระดับ (Split Level) ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโครงเหล็ก (Transfer Steel Frame) เพื่อถ่ายแรงดันดินระหว่างกำแพงในแต่ละด้านระหว่างขั้นตอนงานขุดดิน (รูปที่ 5)



รูปที่ 4 แบบแปลนเสาเข็มเจาะและแนว Diaphragm wall

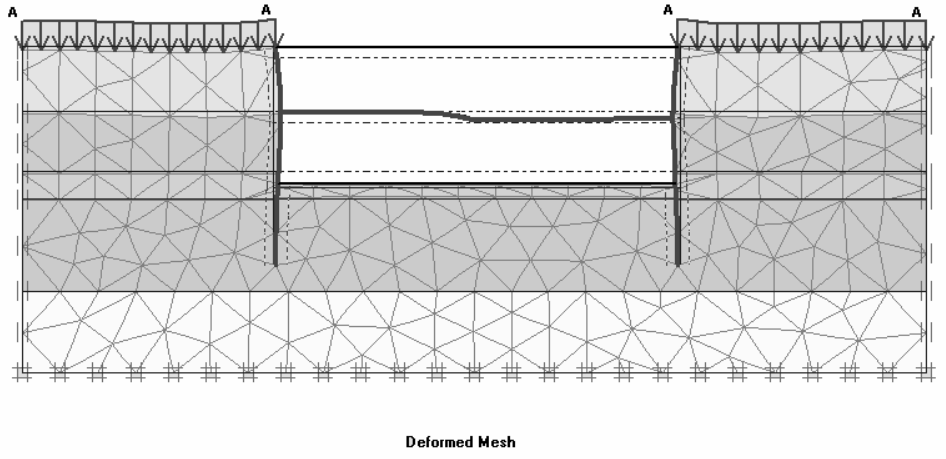


รูปที่ 5 คานเหล็กถ่ายแรง (Transfer frame)

ขั้นตอนงานขุดดินโดยสังเขปแสดงไว้ในตารางที่ 1 และรูปการแบ่ง Mesh ในการวิเคราะห์ FEM ณ ขั้นตอนขุดดินถึงความลึกสุดท้าย แสดงในรูปที่ 6

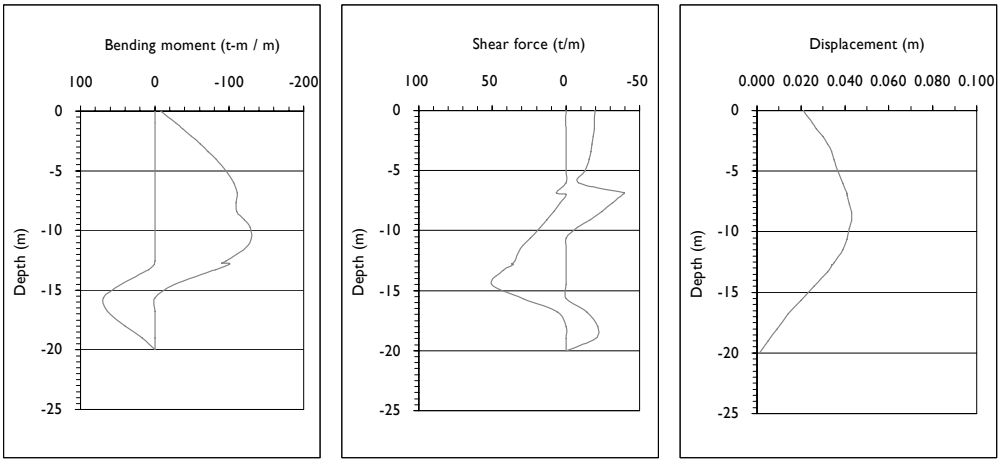
ตารางที่ 1 ขั้นตอนงานขุดดินโดยสังเขปเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน

ขั้นตอน	รายละเอียดการก่อสร้าง
1	ขุดดินลึก-1.00 ม.และก่อสร้างคานคสล.ถาวร(Skeleton Beam) ที่ระดับ-0.50 ม.
2	ขุดดินลึก-5.60 ม.และ-7.00 ม. และก่อสร้างพื้นชั้น B3 ที่ระดับ-5.30 และ -6.70 ม.
3	ขุดดินลึก-13.00 ม.และก่อสร้าง Mat foundation และพื้นชั้น B1
4	ก่อสร้างพื้นชั้น B2 ที่ระดับ-8.10 และ-9.50 ม.
5	ก่อสร้างพื้นชั้น B4 ที่ระดับ-2.50 และ-3.90 ม.
6	ก่อสร้างพื้นชั้น GF



รูปที่ 6 Finite Element Mesh

การออกแบบปริมาณเหล็กเสริมของ Diaphragm Wall ได้ออกแบบเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดจากแรงดันดินในระหว่างการขุดดินในแต่ละขั้นตอน โดยออกแบบให้ครอบคลุมในทุก ๆ ขั้นตอนงานขุดดินเพื่อก่อสร้างพื้นอาคาร(รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ แรงเฉือนและการเคลื่อนตัวโดยรวมของ Diaphragm wall

4.2 โครงสร้างเสาเหล็ก Stanchion

เนื่องจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินสำหรับโครงการนี้ก่อสร้างโดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่างจึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion ไว้ที่หัวเสาเข็มเพื่อใช้รับน้ำหนักพื้นแต่ละชั้นที่กำหนดไว้ก่อนที่จะขุดถึงชั้นฐานรากฐาน โดยออกแบบใช้เสาเหล็ก H-400 รับน้ำหนักในตำแหน่งเสาแต่ละต้น แล้วถ่ายแรงไปสู่เสาเข็มเจาะโดยผ่านแรงยึดเหนี่ยวตามระยะฝังไว้ในเสาเข็มแต่ละต้นเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุก ภายหลังงานขุดดินแล้วเสร็จ เสาเหล็ก Stanchion ยังกำหนดให้ใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างเสาถาวรสำหรับรับน้ำหนักตัวอาคาร (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 ลักษณะเสาเหล็ก Stanchion ที่ใช้ในโครงการ

4.3 โครงสร้างพื้นอาคาร

เนื่องจากการขุดดินด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่างใช้พื้นอาคารทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยันDiaphragm wall ดังนั้น ในการลำเลียงวัสดุ เครื่องจักร ตลอดจนดินที่ขุดขึ้นมา จำเป็นต้องกำหนดช่องเปิดชั่วคราวให้สามารถทำงานได้ในระหว่างการก่อสร้าง แต่สำหรับโครงการนี้ทางสถาปัตย์กำหนดให้โดยรอบอาคารมีช่องเปิดถาวรอยู่ 2 ด้านเพื่อเป็นช่องระบายอากาศและเพิ่มช่องแสงในตัวอาคารจอดรถใต้ดิน ทางโครงการจึงได้เลือกใช้ช่องเปิดเหล่านี้และช่องเปิดบริเวณ Ramp เป็นทางลำเลียง ลักษณะช่องเปิดสำหรับโครงการนี้ได้แสดงในรูปที่ 9



ก. ช่องเปิดสำหรับขุดดิน



ข. ภาพแสดงสะพานชั่วคราว (Temporary Platform)

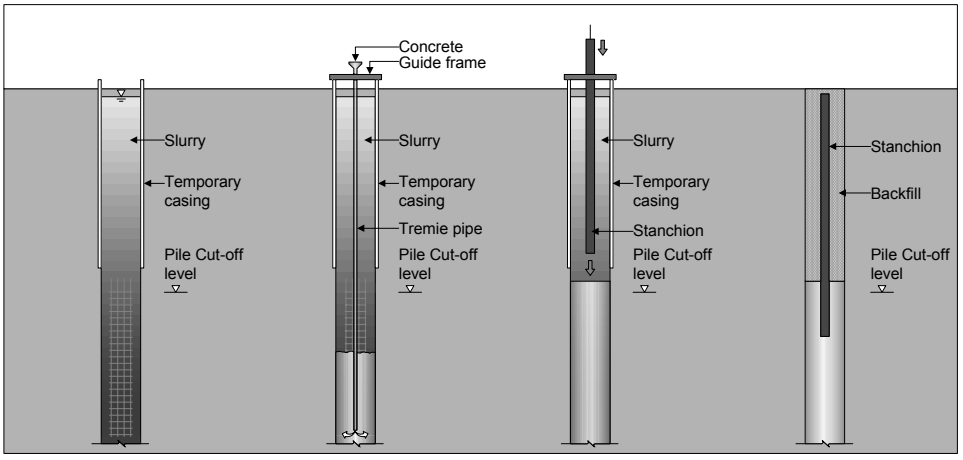
รูปที่ 9 ลักษณะช่องเปิดสำหรับลำเลียงวัสดุ เครื่องจักร ตลอดจนดินที่ขุดออก

5. เทคนิคการก่อสร้าง

5.1 การก่อสร้างเสาเข็มเจาะและ Diaphragm Wall

การก่อสร้างโครงการอาคารจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลาง เริ่มจากการก่อสร้าง Diaphragm Wall โดยใช้สารละลายเบ็นโทไนท์ในการขุดเจาะและเสาเข็มเจาะระบบเปียกภายใต้สารละลายโพลีเมอร์ควบคู่กันไป โดยการก่อสร้างเสาเข็มเจาะมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นมาเป็นพิเศษจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยทั่วไปคือ การติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion บนหัวเสาเข็มเจาะ วิธีการติดตั้งเสาเหล็กStanchion ใช้วิธีการติดตั้งแบบติดตั้งภายหลังการเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะโดยกดเสาเหล็ก Stanchion ให้จมลงในคอนกรีตหัวเสาเข็มภายหลังจากการเทคอนกรีตแล้วเสร็จ(Post-Concreting Installation Method)

การควบคุมแนวดิ่งของเสาเหล็ก Stanchion ใช้สกรูปรับระยะบังคับแนวยันกับตัวปลอกเหล็กชั่วคราว (Steel Casing) สี่ทิศทางพร้อมกับการตรวจสอบโดยกล้องสำรวจเป็นตัวควบคุมความเที่ยงตรงดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



เจาะดินและลงโครงเหล็กเสริม เทคอนกรีตใต้น้ำ ลงเสาเหล็ก Stanchion ถอนปลอกเหล็กพร้อมถมกลับหลุมเจาะ

รูปที่ 10 ขั้นตอนการติดตั้งเสาเหล็ก stanchion แบบติดตั้งภายหลังการเทคอนกรีตแล้วเสร็จ



รูปที่ 11 สกรูปรับระยะบังคับแนวกับตัวปลอกเหล็กชั่วคราว

5.1.1 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

เสาเข็มเจาะในโครงการออกแบบให้ใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 เมตร ลึก 30 เมตร ทำการเจาะระบบเปียกแบบใช้ก้านหมุนเจาะโดยใช้สว่านและหัวเจาะแบบถัง ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยสังเขปจะเริ่มจากการลงปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing) ยาวประมาณ 15 เมตรแล้วทำการขุดเจาะโดยใช้สว่านเจาะดิน เมื่อเจาะเกือบถึงระดับชั้นดินที่ไม่คงรูป จึงทำการเติมสารละลายโพลีเมอร์ลงไปในหลุมเจาะเพื่อสร้างแรงดันต้านแรงดันของชั้นดิน แล้วทำการเจาะดินต่อภายใต้สารละลายฯด้วยหัวเจาะแบบถัง (Bucket) จนถึงความลึกสุดท้ายที่-30 เมตร ทำการลงโครงเหล็กเสริม เทคอนกรีตผ่านท่อเท (Tremie Pie) ติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion และถอนปลอกเหล็กชั่วคราว

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปแสดงในรูปที่ 12



ก. กดปลอกเหล็กชั่วคราว



ข. เจาะดินโดยใช้สว่าน



ค. เจาะดินโดยใช้หัวเจาะแบบถัง(Bucket)



ง. ลงโครงเหล็กเสริม



จ. เทคอนกรีตผ่านท่อเท



ฉ. ติดตั้งเสาเหล็ก Stanchion



ช. Backfill ด้วยหินเกล็ด



ซ. ถอนปลอกเหล็กชั่วคราว

รูปที่ 12 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะโดยสังเขปในโครงการ

5.1.2 ขั้นตอนการก่อสร้าง Diaphragm wall

ระบบกำแพงกันดินใช้ระบบ Diaphragm Wall หนา 0.80 เมตร ลึก 20 เมตร โดยมี Pile Leg ซึ่งออกแบบให้รับน้ำหนักกำแพง Diaphragm Wall เป็นช่วงๆ โดย Pile Leg ออกแบบให้ใช้เสาเข็มBarrette ที่กำหนดความลึกให้เท่ากับระดับปลายเสาเข็มเจาะคือที่-30 เมตร จากผิวดิน ขั้นตอนการก่อสร้างจะเริ่มจากการก่อสร้างแนวคานบังคับร่อง และขุดเจาะโดยใช้หัวขุดระบบ Mechanical Hang Grab ภายใต้สารละลายเบ็นโทไนท์ ที่ใช้เป็นตัวต้านผนังดินไม่ให้เกิดการพังทลายเข้ามาในร่องเจาะหลังจากนั้นทำการลงโครงเหล็กเสริมที่ผูกเตรียมไว้ล่วงหน้า แล้วทำการเทคอนกรีตใต้น้ำ การก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall จะก่อสร้างไปทีละแผง โดยเมื่อถึงแผงที่กำหนดให้เป็นเสาเข็ม Barrette ก็จะทำการขุดต่อไปถึงระดับ-30 เมตร ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปแสดงในรูปที่ 13



ก. ก่อสร้างแนวคานบังคับร่อง



ข. ขุดเจาะดิน



ค. ลงโครงเหล็กเสริม



ง. เทคอนกรีตใต้น้ำ

รูปที่ 13 ขั้นตอนการก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall โดยสังเขปในโครงการ

และเนื่องจากโครงการนี้ตั้งอยู่ในเขตเมืองชั้นในซึ่งมีข้อกำหนดควบคุมทางสิ่งแวดล้อมและมลภาวะจากฝุ่น และเศษสิ่งสกปรกจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะอย่างเข้มงวดซึ่งในการทำงานต้องมีการขุดดินและมีการเทคอนกรีตในที่ ในบางครั้งจึงต้องมีการกองวัสดุก่อสร้างหรือกองดินที่ขุดเจาะขึ้นมาได้รอการขนถ่ายไปทิ้งนอกหน่วยงาน ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะไม่เกิดฝุ่นละออง เพื่อลดปัญหานี้ทางผู้รับเหมา(SEAFCO) จึงได้ทำการติดตั้งเครื่องล้างล้อ เพื่อทำความสะอาดล้อของพาหนะที่จะออกจากสถานที่ก่อสร้าง (รูปที่ 14)



รูปที่ 14 การล้างล้อพาหนะที่จะออกนอกหน่วยงานก่อสร้างโดยการติดตั้งเครื่องล้างล้ออัตโนมัติ

5.2 ขั้นตอนงานขุดดินและก่อสร้างตัวอาคาร

ภายหลังจากการก่อสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพง Diaphragm Wall แล้วเสร็จ จะเริ่มทำการก่อสร้างคาน คสล.รัดรอบ Diaphragm Wall และก่อสร้างคาน คสล.ถาวร (Skeleton Beam) ค้ำยันกำแพงที่ระดับความลึก -0.50 เมตร (รูปที่ 15) หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการติดตั้งระบบสะพาน(Platform) สำหรับการยืนขุดดินของรถขุดตลอดจนใช้ลำเลียง ขนถ่ายวัสดุ เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดน้ำหนักสมทบมากเกินไป ซึ่งจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบบ่อขุด ขั้นตอนงานขุดดินสำหรับงานขุดลึก 13.0 เมตร โดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง กำหนดตามการวิเคราะห์ออกแบบดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยออกแบบใช้ค้ำยันถาวร 2 ชั้น คือระบบคานค้ำยันกำแพง (Skeleton Beam) ที่ระดับ -0.50 เมตร (รูปที่ 15) และพื้นชั้น B3 ที่ระดับ-5.30 และ -6.70 ม. ซึ่งเป็นพื้นต่างระดับ (Split Level) ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโครงเหล็ก(Transfer Steel Frame) เพื่อถ่ายแรงดันดินระหว่างกำแพงในแต่ละด้านระหว่างขั้นตอนงานขุดดิน (รูปที่ 16)

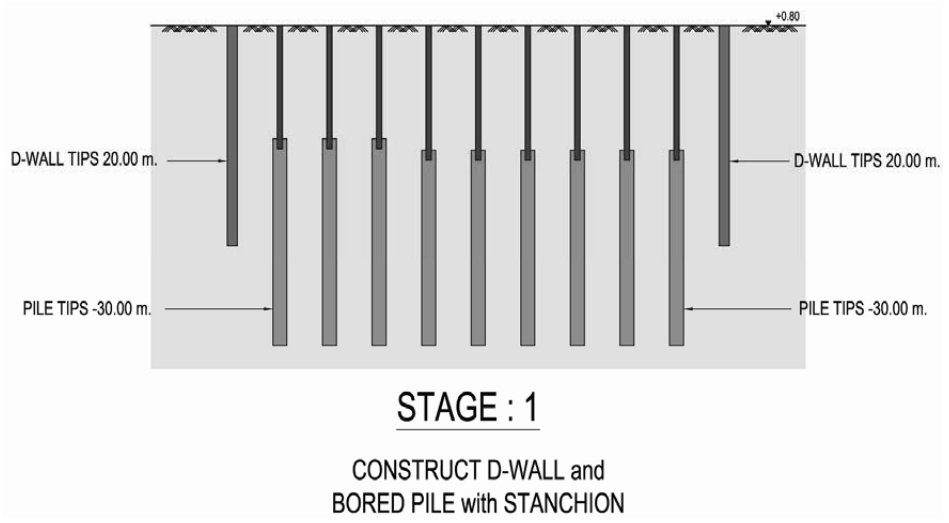


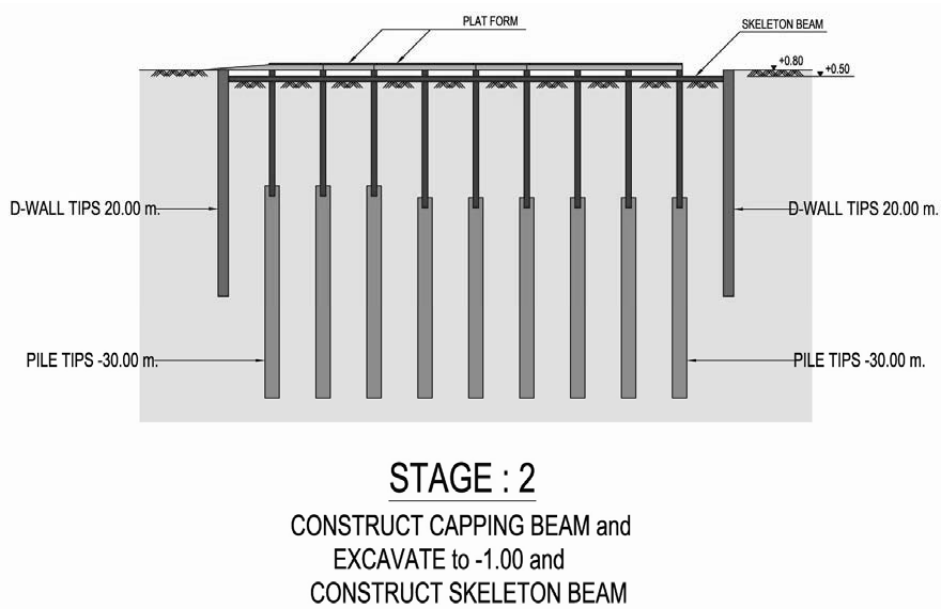
รูปที่ 15 ระบบคานค้ำยันกำแพง (Skeleton Beam)



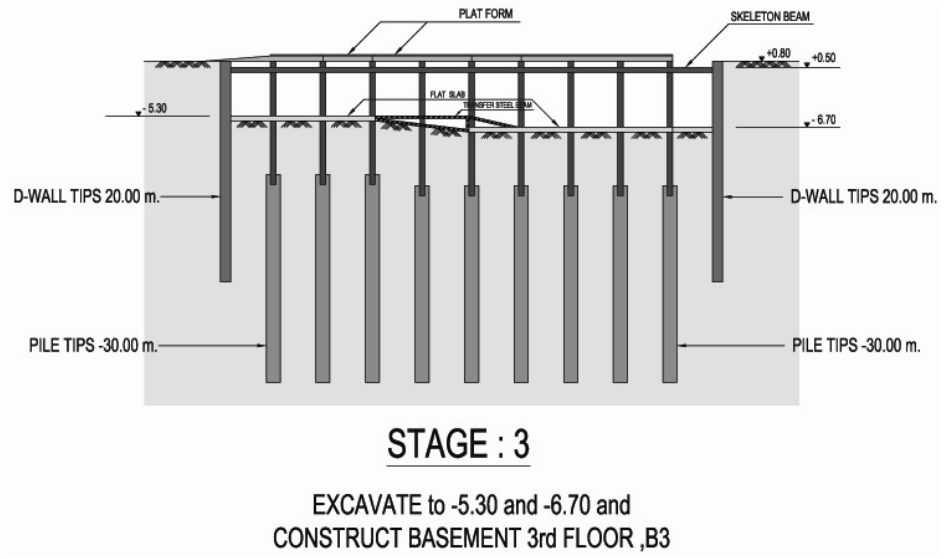
รูปที่ 16 โครงเหล็ก(Transfer Steel Frame) เพื่อถ่ายแรงดันดินระหว่างพื้นที่ต่างระดับ (Split Level)

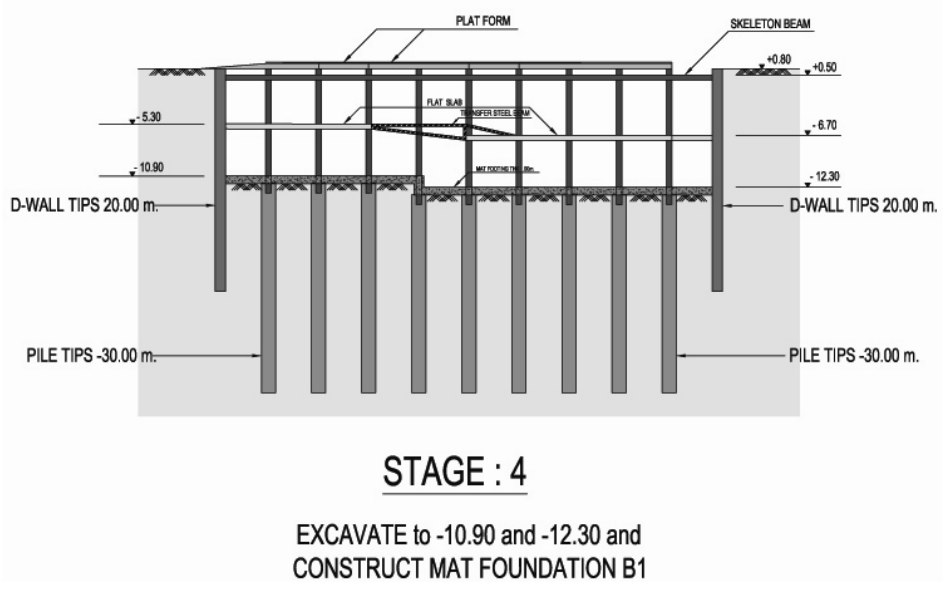
ขั้นตอนงานขุดดินสำหรับงานขุดดินลึก 13.0 เมตร โดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง แสดงไว้ในรูปที่ 17



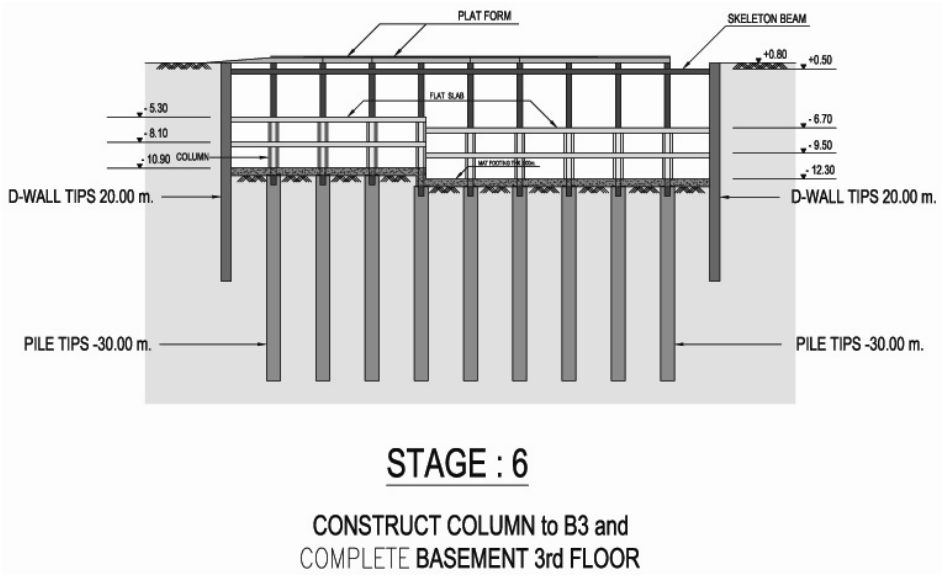


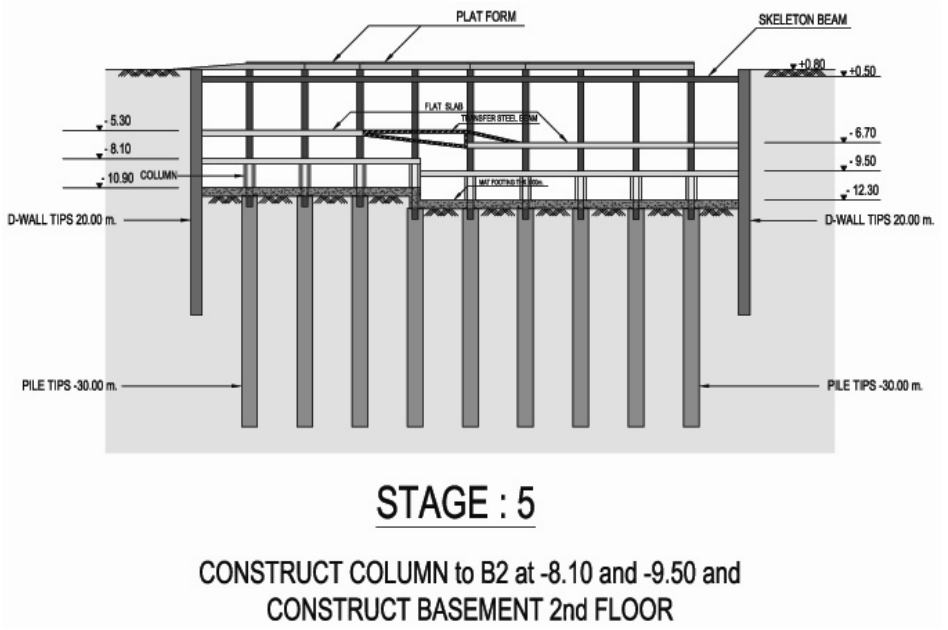
รูปที่ 17 ขั้นตอนงานขุดดินโดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง โครงการโรงพยาบาลกลาง



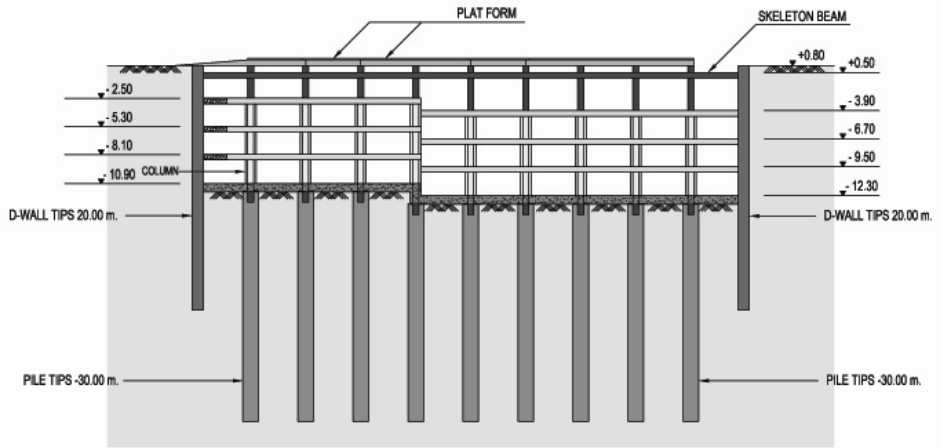


รูปที่ 17 (ต่อ) ขั้นตอนงานขุดดินโดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง โครงการโรงพยาบาลกลาง



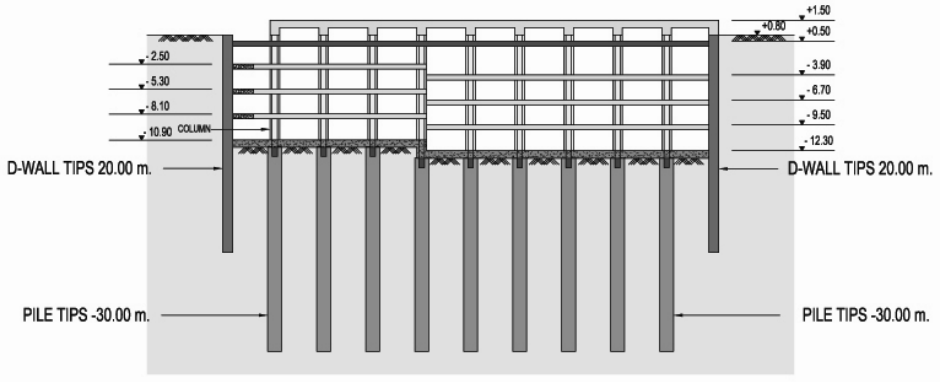


รูปที่ 17 (ต่อ) ขั้นตอนงานขุดดินโดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง โครงการโรงพยาบาลกลาง



STAGE : 7

CONSTRUCT COLUMN to B4 at -2.50 and -3.90 and
CONSTRUCT BASEMENT 4th FLOOR



STAGE : 8

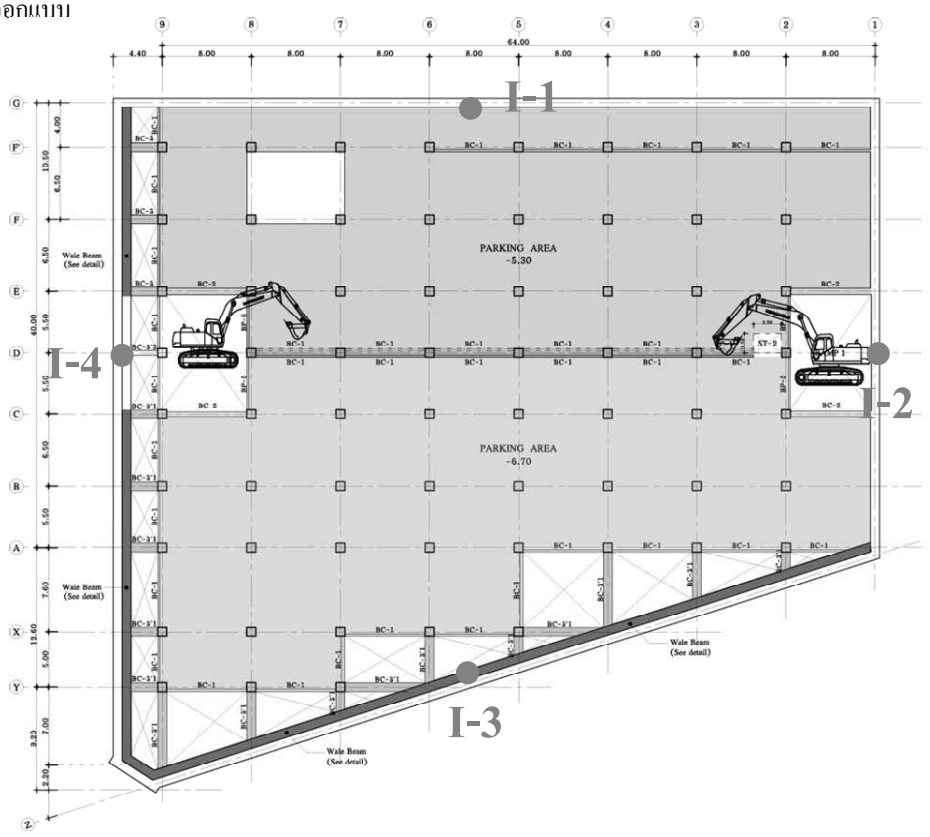
REMOVE PLATFORM , CONSTRUCT COLUMN to GROUND FLOOR and
CONNECT COLUMN and WALL to +1.50 ,CONSTRUCT BEAM

รูปที่ 17 (ต่อ) ขั้นตอนงานขุดดินโดยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง โครงการโรงพยาบาลกลาง

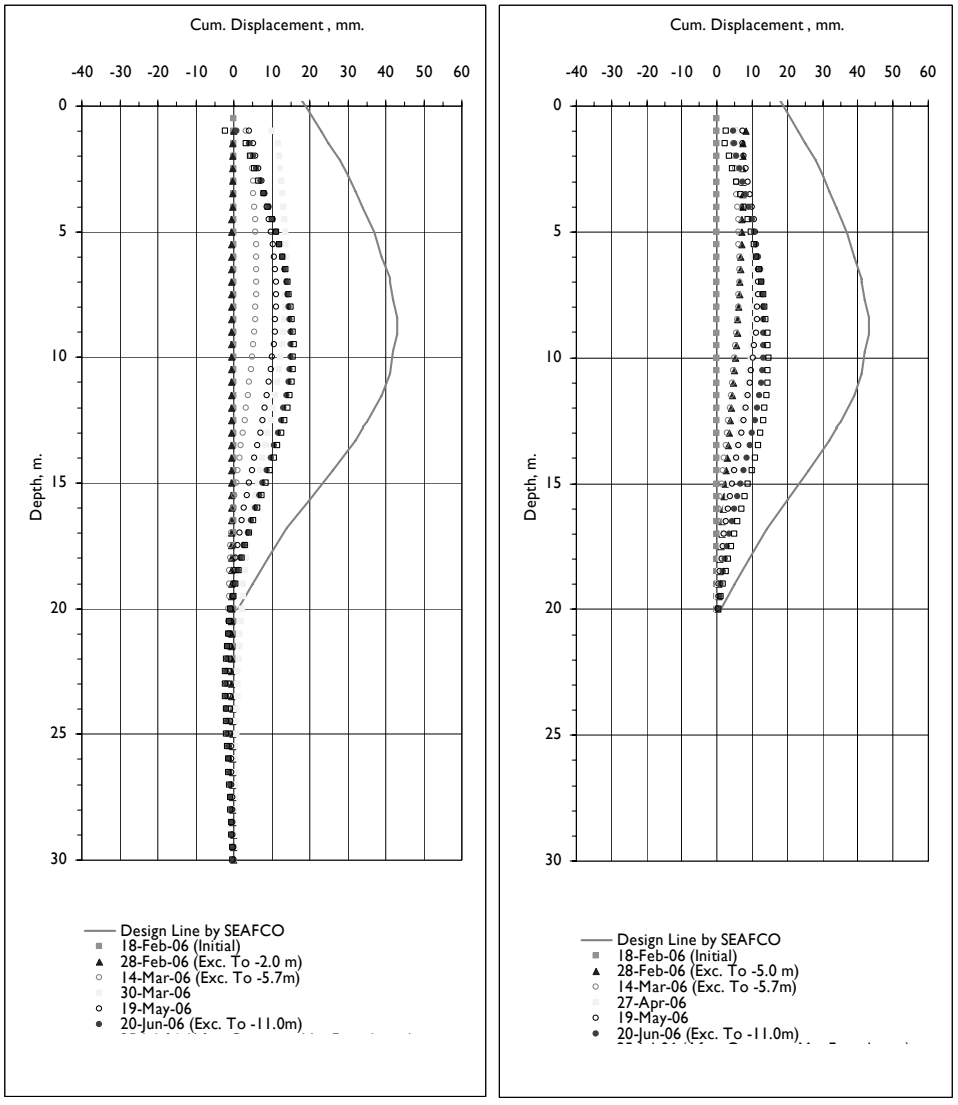
6. การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของ Diaphragm Wall ในระหว่างการก่อสร้าง

การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของ Diaphragm Wall ในแต่ละขั้นตอนการขุดดินมีไว้เพื่อสอบทานความถูกต้องของพฤติกรรม Diaphragm Wall ในขั้นตอนการทำงานขุดดินจริงกับขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบพฤติกรรมของตัวกำแพงโดยใช้ FEM การวัดการเคลื่อนตัวจริงของ Diaphragm Wall ใช้เครื่องมือ Inclinometer ฝังไว้ใน Diaphragm Wall วัดค่าการเคลื่อนตัวจริงที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวออกแบบที่กำหนดเป็นค่าระดับความระมัดระวังในการทำงาน(Trigger Level) เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการควบคุมงานและยังเป็นตัวส่งสัญญาณเตือนในกรณีเกิดปัญหาในระหว่างการก่อสร้างนอกจากนั้นผลการวัดยังสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มการทรุดตัวของผิวดินบริเวณรอบบ่อขุดได้

การตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงสำหรับโครงการนี้ซึ่งมีการติดตั้งท่อ Inclinometerจำนวน 4 ท่อ คือ I-1 I-2 I-3 และ I-4 แสดงในรูปที่ 18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงDiaphragm Wall ที่วัดได้จริงในขั้นตอนภายหลังการขุดดินจนถึงความลึกสุดท้ายที่ -13.00 ม.(รูปที่ 19) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ทำนายไว้ในการออกแบบ



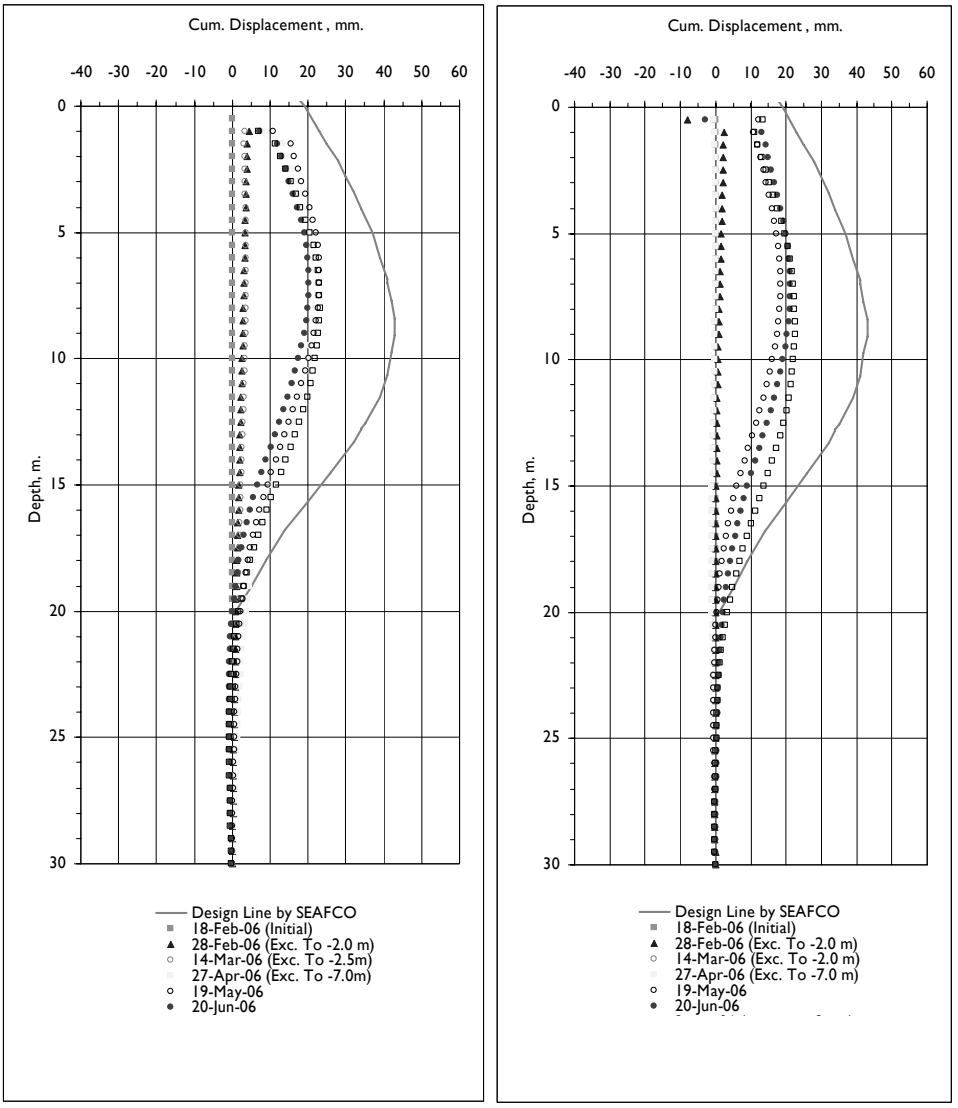
รูปที่ 18 ตำแหน่งติดตั้ง Inclinometer



ก) ท่อ Inclinometer I-1

ข) ท่อ Inclinometer I-2

รูปที่ 19 ผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงด้วย Inclinometer



ก) ท่อ Inclinometer I-3

ข) ท่อ Inclinometer I-4

รูปที่ 19 (ต่อ) ผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงด้วย Inclinometer

7. สรุปผลการก่อสร้าง

การขุดดินและก่อสร้างชั้นใต้ดินลึก 4 ชั้น ที่ความลึกประมาณ -30.0 ม. ในโครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน โรงพยาบาลกลางออกแบบให้ใช้ระบบการก่อสร้างด้วยระบบบนลงล่าง โดยใช้กำแพง Diaphragm Wall หนา 0.80 ม. ลึก-20.0 ม. และพื้นโครงสร้างอาคารเป็นระบบป้องกันดินในระหว่างการขุดดิน จนถึงระดับความลึกสุดท้าย โดยพื้นอาคารและระบบสะพาน Platform ใช้เสาเหล็กStanchion ที่ติดตั้งบนหัวเสาเข็มเจาะเป็นตัวรับน้ำหนักในระหว่างการก่อสร้าง และทำหน้าที่เป็นส่วนของโครงสร้างเสาอาคารถาวรในภายหลัง

ผลการก่อสร้างจนถึงปัจจุบันผ่านขั้นตอนงานขุดดินระดับสุดท้าย พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับตามขั้นตอนการออกแบบทุกขั้นตอน จึงสามารถสรุปได้ว่าการขุดดินในโครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลาง ภายใต้ระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top-down) ร่วมกับกำแพง Diaphragm Wall ซึ่งจัดเป็นระบบกำแพงที่แข็ง (Rigid Wall) ให้ค่าการเคลื่อนตัวน้อยโดยไม่เกิดผลกระทบกับอาคารข้างเคียงในด้านวิศวกรรม

เทคนิคงานก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยก

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน)

144 ถนนพระยาสุเรนทร์ แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ10510
โทร. 0-2919-0090 โทรสาร 0-2919-3363
E-mail: chanchai@seafco.co.th

1. บทนำ

ปัญหาการจราจรแออัดในเขตเมืองใหญ่โดยเฉพาะในกรุงเทพฯ เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคมเนื่องจากปริมาณรถยนต์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ถนนมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะในเวลาเร่งด่วนช่วงเช้าและช่วงเย็นในแต่ละวัน ที่บริเวณทางแยกหรือจุดตัดของถนนสายหลักมักจะมีปัญหาความหนาแน่นของรถยนต์ที่รอสัญญานไฟ แนวทางการปรับปรุงทางแยกเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรดังกล่าวทำได้ยากเนื่องจากปัญหาทางกายภาพของถนนเดิมซึ่งส่วนใหญ่จะถูกขยายจนเต็มเขตทางทุกด้านแล้ว ไม่สามารถจัดช่องจราจรเพิ่มเติมและปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพทางแยกระดับพื้น (At Grade) อีกต่อไป ดังนั้นแนวทางแก้ไขปัญหาการจราจรบริเวณทางแยกจึงต้องทำการก่อสร้างสะพานข้ามทางแยก (Overpass) หรืออุโมงค์ลอดทางแยก (Underpass) เพื่อช่วยลดปัญหาการจราจรให้รถยนต์วิ่งได้อย่างต่อเนื่องไม่ต้องจอดรอสัญญานไฟบริเวณทางแยก แต่ด้วยความต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาการบดบังทัศนียภาพในบริเวณทางแยกต่างๆซึ่งอยู่ในเขตชุมชน การเลือกใช้อุโมงค์ลอดทางแยกมักจะเป็นตัวเลือกแรกถึงแม้ว่าการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกจะมีราคาค่าก่อสร้างที่แพงมากกว่าและใช้เวลาก่อสร้างนานกว่าการก่อสร้างสะพานข้ามทางแยกก็ตาม

ปัจจุบันในเขตเมืองใหญ่ในประเทศไทยได้เริ่มมีการเลือกใช้อุโมงค์ลอดทางแยกตามถนนสายหลัก เช่น ทางลอดข่วงสิงห์ ทางลอดศาลเด็ก และทางลอดหนองประทีป อำเภอเมือง ในจังหวัดเชียงใหม่ สำหรับกรุงเทพฯ ได้เริ่มมีการก่อสร้างอุโมงค์รถยนต์เมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว อุโมงค์แรกคืออุโมงค์บางซื่อซึ่งเป็นอุโมงค์ที่ลอดทางรถไฟสายเหนือ สำหรับอุโมงค์ลอดทางแยกอุโมงค์แรกในกรุงเทพฯ คืออุโมงค์ดินแดง ซึ่งก่อสร้างในปี พ.ศ. 2539 เป็นอุโมงค์ลอดทางแยกที่ก่อสร้างโดยใช้ระบบกำแพง Diaphragm Wall หนา 1.00 เมตร ลึก -21 เมตร เป็นระบบป้องกันดิน (รูปที่ 1) นอกจากนี้ยังได้มีการก่อสร้างอุโมงค์กลับรถยนต์อุโมงค์

แรกขึ้นที่ถนนพัฒนาการ (รูปที่ 2) ในปี พ.ศ. 2545 ซึ่งใช้การขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงยึดหยุ่นและทำการหล่อกำแพง คสล. ขึ้นภายหลัง หลังจากนั้นก็ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกตัวอื่นเรื่อยมา โดยก่อสร้างแล้วเสร็จมากกว่า 10 โครงการ (ตารางที่ 1) และในอนาคตอันใกล้ก็มีแนวโน้มจะมีการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกอุโมงค์กลับรถ เพิ่มเติมในหลายจุดทางแยกที่สำคัญ เพื่อบรรเทาปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางแยกในเขตเมืองใหญ่ในหลายจังหวัด





รูปที่ 1 อุโมงค์ลอดทางแยกถนนวิภาวดี-รังสิตตัดกับถนนดินแดง





รูปที่ 2 อุโมงค์กลับรถถนนพัฒนาการ

ตารางที่ 1 อุโมงค์รถยนต์ที่ก่อสร้างในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

ลำดับ	โครงการ	ระบบกำแพง
1	อุโมงค์ลอดทางรถไฟบางซื่อ	R.C Wall
2	อุโมงค์ลอดทางแยกดินแดง	Diaphragm Wall & R.C Wall
3	อุโมงค์ลอดทางแยกหลักสี่	Diaphragm Wall & R.C Wall
4	อุโมงค์ลอดถนนพระราม 9 (รามคำแหง-พัฒนาการ)	Diaphragm Wall & R.C Wall
5	อุโมงค์ลอดทางแยกบางพลัด	Contiguous Bored Pile, Diaphragm Wall & R.C Wall
6	อุโมงค์ลอดทางแยกท่าพระ	Diaphragm Wall & R.C Wall
7	อุโมงค์ห้วยขวาง	Diaphragm Wall & R.C Wall
8	อุโมงค์สุทธิสาร	Diaphragm Wall & R.C Wall
9	อุโมงค์กลับรถพัฒนาการ	R.C Wall
10	อุโมงค์ลอดทางแยกปากเกร็ด	Diaphragm Wall & R.C Wall
11	อุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร	Contiguous Bored Pile & R.C Wall

การก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกซึ่งจัดเป็นโครงสร้างใต้ดินประเภทหนึ่ง จำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนก่อสร้างเป็นอย่างดี การเลือกระบบป้องกันดินแต่ละแบบก็มีผลต่อราคางานก่อสร้าง ระยะเวลาในการก่อสร้าง วิธีการก่อสร้าง และการเคลื่อนตัวของดินรอบๆบริเวณก่อสร้าง ดังนั้นการวางแผนเลือกระบบป้องกันดินและวิธีการก่อสร้างจะต้องทำในขั้นตอนการออกแบบเพื่อเลือกระบบป้องกันดินที่เหมาะสม โดยวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ไม่ทำให้ดินรอบๆบริเวณก่อสร้างเคลื่อนตัวในระดับที่เป็นอันตรายหรือเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียง
2. ไม่ทำให้ราคางานก่อสร้างโดยรวมทั้งโครงการมีราคาสูงเกินงบประมาณที่ตั้งไว้
3. ใช้ระยะเวลาก่อสร้างโดยรวมทั้งโครงการเหมาะสมกับแผนงาน
4. ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะหรือผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่ข้างเคียง

หลักเกณฑ์ในการเลือกระบบป้องกันดินและวิธีการก่อสร้างใต้ดินจะต้องพิจารณาจากภาพโดยรวมของการก่อสร้างเป็นหลัก เนื่องจากระบบป้องกันดินบางแบบอาจมีราคาก่อสร้างถูกกว่าแต่ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างมากกว่าซึ่งทำให้ราคางานก่อสร้างโดยรวมสูงกว่า ระบบป้องกันดินบางชนิดก็สามารถใช้ได้กับชั้นดินบางประเภทเท่านั้น ดังนั้นหลักในการพิจารณาในการเลือกระบบป้องกันดินและวิธีการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลดินในพื้นที่ก่อสร้าง
2. ระบบป้องกันดินที่สามารถเลือกใช้ได้ในพื้นที่ โดยไม่ต้องเสียค่าขนส่งจากพื้นที่ห่างไกล
3. ข้อกำหนดในระยะเวลาในการก่อสร้าง
4. การเคลื่อนตัวของดินที่ยอมให้สำหรับพื้นที่ข้างเคียง
5. ราคาของระบบป้องกันดิน และราคารวมของงานก่อสร้าง
6. ขนาดและข้อจำกัดด้านความสูงของพื้นที่ก่อสร้าง
7. การพิจารณาเลือกใช้ระบบป้องกันดินเป็นโครงสร้างถาวรหรือโครงสร้างชั่วคราว

บทความนี้จะนำเสนอแนวคิดการออกแบบ การเลือกใช้ระบบกำแพงป้องกันดิน และ เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็ม ระบบกำแพงป้องกันดินในแต่ละระบบที่อาจจะนำมาเลือกใช้ และวิธีการขุดดินแบบต่างๆ

2. ประเภทของกำแพงกันดินและการขุดดิน

ความลึกของงานขุดดิน ระดับน้ำใต้ดิน ลักษณะของชั้นดินและค่าการเคลื่อนตัวของดินที่ยอมให้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะเลือกวิธีการขุดดินว่าจะต้องมีกำแพงกันดินหรือว่าเลือกประเภทของกำแพงกันดินที่จะใช้ในโครงการนั้น ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบระบบป้องกันดินแบบต่างๆ

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบระบบกำแพงการดินประเภทต่างๆ

ระบบกำแพงกันดิน	ข้อดี	ข้อจำกัด
1. งานขุดที่ไม่ใช่กำแพงกันดิน (Open cut)	1. มีราคาถูก 2. ใช้เวลาก่อสร้างไม่มาก 3. มีขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างที่ง่าย	1. ใช้พื้นที่รอบข้างมาก 2. ไม่สามารถขุดดินที่มีความลึกมาก 3. ไม่สามารถกั้นน้ำใต้ดินได้ 4. เกิดการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณรอบข้างมาก
2. กำแพงเสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet pile)	1. มีราคาไม่แพงมาก 2. สามารถกั้นน้ำใต้ดินได้ 3. สามารถใช้เป็นกำแพงถาวรได้ 4. ใช้เวลาก่อสร้างไม่มาก	1. ไม่สามารถกดปลายกำแพงได้ลึกมาก 2. ไม่สามารถกดลงได้ในดินเม็ดหยาบ 3. การกดด้วยหัวเขย่าจะเกิดแรงสั่นสะเทือนและเสียงดัง
3. กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องแบบไม่ขบกัน (Contiguous pile)	1. เป็นกำแพงคอนกรีตที่มีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่น 2. สามารถเจาะลงได้ในดินทุกประเภท	1. ไม่สามารถกั้นน้ำได้เนื่องจากช่องว่างระหว่างเสาเข็ม นอกจากจะทำกำแพงกันน้ำอีกชั้น 2. ความลึกของเสาเข็มถูกจำกัดด้วยความดิ่งของเสาเข็ม
4. กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่องชนิดเสาเข็มแข็งคู่เสาเข็มอ่อน (Hard / Soft Secant pile)	1.สามารถกันน้ำได้ในขณะทำก่อสร้าง 2. สามารถใช้เครื่องเจาะเสาเข็มปกติได้ในการก่อสร้าง 3. สามารถเจาะลงได้ในดินทุกประเภท	1. ไม่สามารถกั้นน้ำได้ในระยะยาวเนื่องจากการซึมน้ำในเสาเข็มอ่อน นอกจากจะก่อสร้างกำแพงกันน้ำอีกชั้น 2. ความลึกของระดับขุดดินถูกจำกัดด้วยความดิ่งของเสาเข็ม ซึ่งควบคุมได้ยาก
5. กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่องชนิดเสาเข็มแข็งคู่เสาเข็มแข็ง (Hard / Hard Secant pile)	1. สามารถกันน้ำได้ในขณะทำการก่อสร้างและในระยะใช้งาน 2. สามารถใช้เป็นกำแพงถาวรได้ 3. สามารถเจาะลงได้ในดินทุกประเภท	1. ต้องใช้เครื่องเจาะเสาเข็มและเครื่องกดปลอกเหล็กที่แรงบิดสูง 2. ความลึกของระดับขุดดินถูกจำกัดด้วยความดิ่งของเสาเข็ม ซึ่งควบคุมได้ยาก
6. กำแพงแบบขุดเจาะ-หล่อในที่ (Diaphragm wall)	1. สามารถกันน้ำได้ในขณะทำการก่อสร้างและในระยะใช้งาน 2. สามารถใช้เป็นกำแพงถาวรได้ 3. สามารถเจาะลงได้ในดินทุกประเภท 4. มีรอยต่อระหว่างแผงน้อยกว่ากำแพงแบบอื่น	1. การก่อสร้างมีความซับซ้อนต้องใช้ผู้ชำนาญการเฉพาะทาง 2. ใช้พื้นที่ก่อสร้างมาก

ระบบกันดินที่ใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกโดยทั่วไปมี 2 ระบบคือ ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall) และระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)

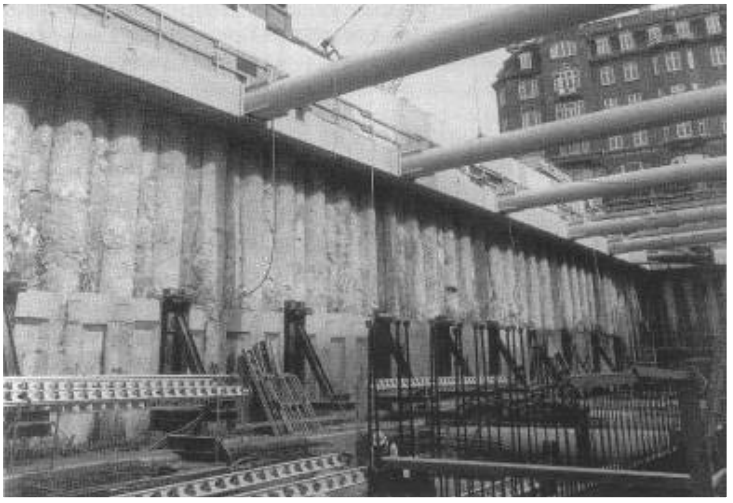
ระบบกำแพงแบบแข็งที่นิยมใช้คือกำแพงพืดกันดินชนิดขุดหล่อในที่ (Diaphragm Wall) กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่อง (Secant Bored Pile) และ กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous / Tangent Bored Pile) ดังแสดงในรูปที่ 3-5 ทั้งนี้ในบางโครงการอาจทำการก่อสร้างโดยเลือกใช้ระบบผสมของกำแพงแต่ละชนิดผสมกัน



รูปที่ 3 อุโมงค์ลอดทางแยกที่ก่อสร้างโดยใช้กำแพงพืดกันดินชนิดขุดหล่อในที่ (Diaphragm Wall)



รูปที่ 4 อุโมงค์ลอดทางแยกที่ก่อสร้างโดยใช้กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous / Tangent Bored Pile)



รูปที่ 5 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่อง (Secant Bored Pile)

สำหรับระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall) โดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นโครงสร้างกำแพงแบบชั่วคราวเพื่อป้องกันดินในระหว่างการขุดดินในโซนตื้นหรือที่ความลึกไม่เกิน 4 เมตร กำแพงประเภทนี้ได้แก่ กำแพงเสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile Wall) โดยอาจจะถูกถอนออกหรือฝังทิ้งไว้ถายหลังงานก่อสร้างแล้วเสร็จ (รูปที่ 6) ในบางโครงการมีการใช้ปลอกเหล็กกลมหรือเสาเข็มเหล็กมาเรียงต่อกันเป็นแนวกำแพงซึ่งกำแพงลักษณะนี้จัดเป็นระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 อุโมงค์ลอดทางแยกที่ก่อสร้างโดยใช้กำแพงเสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile Wall)



รูปที่ 7 อุโมงค์ลอดทางแยกที่ก่อสร้างโดยใช้กำแพงปลอกเหล็กกลม

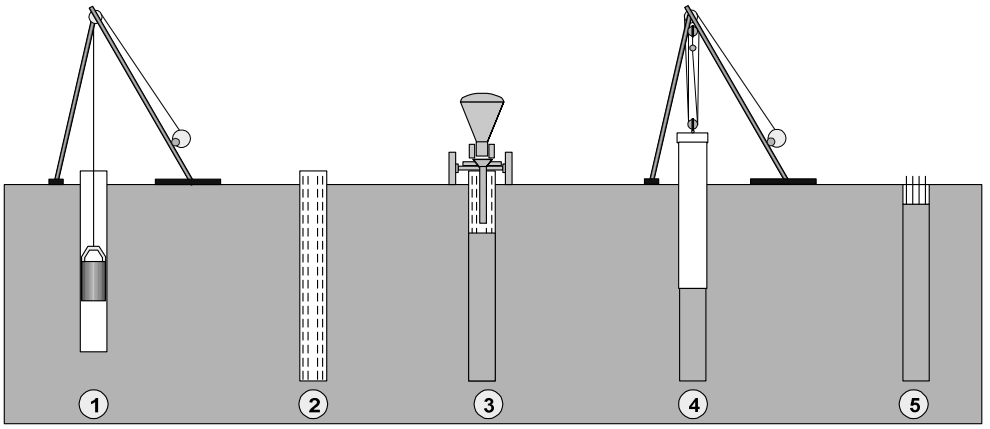
3. เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพงกันดิน

3.1 งานก่อสร้างเสาเข็ม

โดยทั่วไปเสาเข็มที่ใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกมักจะเป็นระบบเสาเข็มเจาะ ซึ่งอาจทำการก่อสร้างได้ 2 ระบบ คือ เสาเข็มเจาะระบบแห้ง (Dry Process Bored Pile) และเสาเข็มเจาะระบบเปียก (Wet Process Bored Pile)

3.1.1 การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบแห้ง (Dry Process Bored Pile)

เสาเข็มเจาะระบบแห้งจะใช้ในกรณีที่ชั้นดินอำนวยให้สามารถก่อสร้างเสาเข็มเจาะเป็นระบบแห้งได้ เช่นในชั้นดินเหนียวแข็ง หลุมเจาะอาจเจาะโดยไม่มีปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินพังนอกจากใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวสั้นๆ ที่ระดับดินเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดตำแหน่งเสาเข็ม หรือในชั้นดินที่มีชั้นดินอ่อนระดับตื้นและต่อด้วยดินเหนียวแข็ง จะต้องใส่ปลอกเหล็กกันชั้นดินอ่อนไว้ ในชั้นดินกรุงเทพฯ เสาเข็มเจาะระบบนี้จะมีความยาวเฉลี่ยโดยทั่วไปประมาณ 18-20 เมตร การเจาะเสาเข็มระบบแห้งสามารถใช้เครื่องเจาะแบบสามขาและเครื่องเจาะชนิดใช้ก้านหมุนเจาะโดยใช้สว่าน ขั้นตอนการก่อสร้างทั้งสองแบบโดยสังเขปตามรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบแห้งแบบสามขา

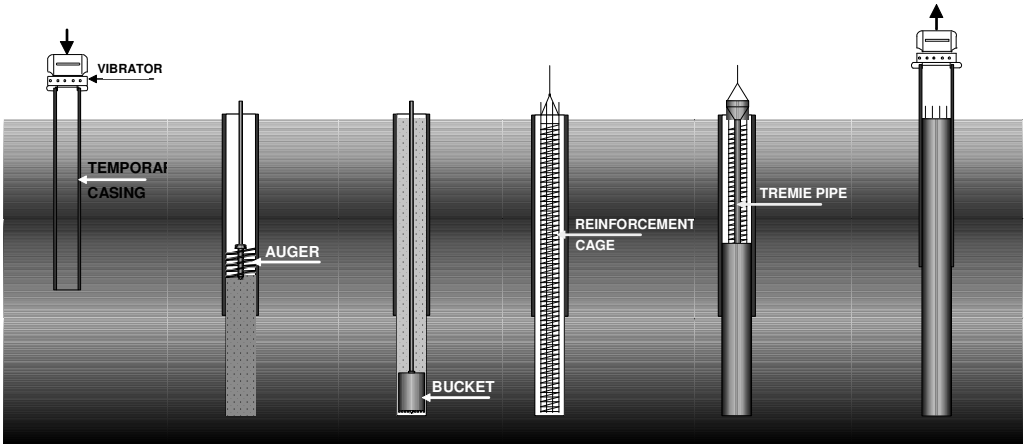


รูปที่ 9 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบแห้งแบบใช้ก้านหมุนเจาะโดยใช้สว่านในชั้นดินกรุงเทพฯ

3.1.2 การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก (Wet Process Bored Pile)

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่ไม่คงตัวเช่นในชั้นทรายที่มีน้ำใต้ดิน ซึ่งหลุมเจาะไม่สามารถมีเสถียรภาพ และลึกเกินกว่าที่จะกดปลอกกันดินชั่วคราวไปสร้างเสถียรภาพของหลุมเจาะ จึงใช้ของเหลวเช่นสารละลายเบ็นโทไนท์หรือสารละลายโพลีเมอร์มาเป็นตัวสร้างเสถียรภาพของหลุมเจาะ โดยสารละลายจะสร้างแรงดันภายในหลุมเจาะต้านแรงดันดินทำให้เกิดเสถียรภาพในหลุมเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีขั้นตอนคล้ายกับเสาเข็มเจาะแห้งโดยใช้ก้านหมุนเจาะโดยใช้สว่านคือ ชั้นดินอ่อนชั้นบนจะใช้ปลอกชั่วคราวกันดินพัง แต่ส่วนที่ลึกต่ำกว่าระดับปลายปลอกเหล็กชั่วคราว ใช้ของเหลวเป็นตัวพยุงเสถียรภาพของหลุมเจาะ ขั้นตอนโดยสังเขปเป็นไปตามรูปที่ 10 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 10 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกแบบใช้ก้านหมุนเจาะโดยใช้สว่านและหัวเจาะแบบถัง

3.2 การก่อสร้างหรือติดตั้งกำแพงกันดิน

3.2.1 กำแพงพืดกันดินชนิดขุดหล่อในที่ (Diaphragm Wall; D-Wall)

ขั้นตอนการก่อสร้า D-Wall จะเริ่มจากการก่อสร้างคานนำร่อง (Guide Wall) ทำการเจาะดินโดยใช้หัวเจาะแบบ Cable Mechanical Hang Grab (รูปที่ 11 ก.) หรือ Cable Hydraulic Grab (รูปที่ 11 ข.) หลังจากเจาะดินจนถึงความลึกที่ออกแบบแล้วก็ทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายฯ เบนโทไนท์ แล้วจึงทำการลงโครงเหล็กเสริมและทำการเทคอนกรีตใต้น้ำผ่านท่อ ขั้นตอนการก่อสร้าง D-Wall แสดงในรูปที่ 12

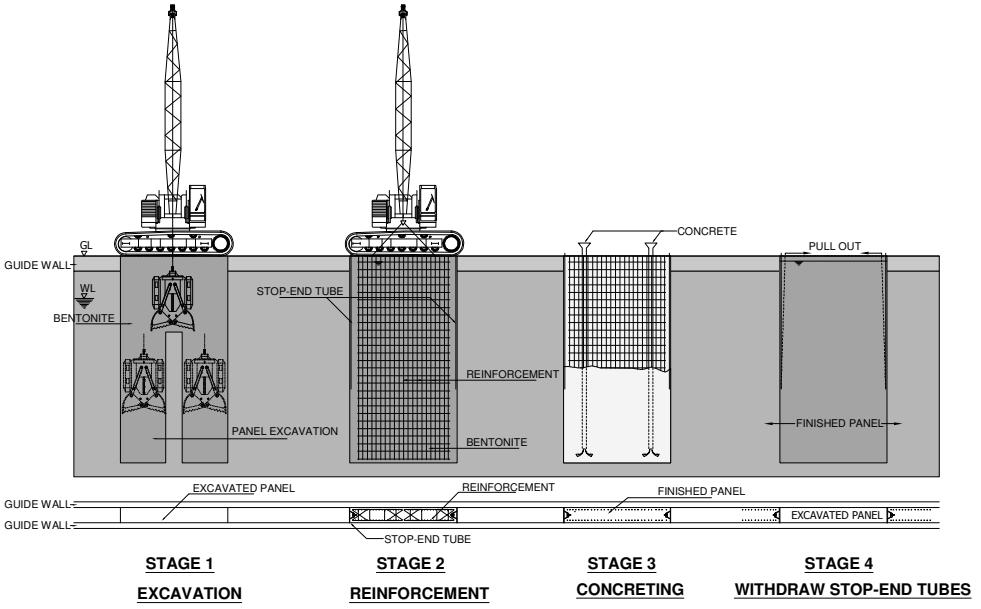


ก. Cable Mechanical Hang Grab



ข. Cable Hydraulic Grab

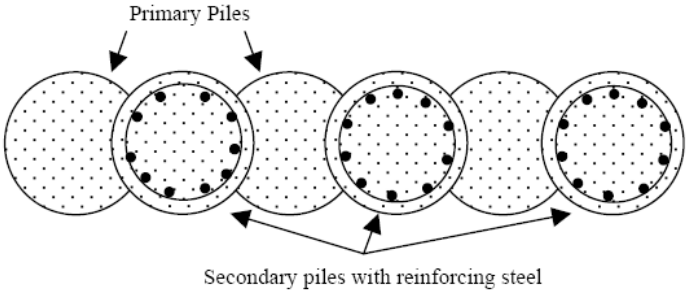
รูปที่ 11 เครื่องมือขุดเจาะ Diaphragm Wall



รูปที่ 12 ขั้นตอนการก่อสร้าง D-Wall

3.2.2 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่อง (Secant Bored Pile)

การก่อสร้างกำแพงระบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องซึ่งมีลักษณะเป็นเสาเข็มเจาะเฉือนขบกันไว้ วิธีการก่อสร้างใช้วิธีเดียวกับการทำเสาเข็มเจาะ อุโมงค์ที่ออกแบบโดยใช้กำแพงระบบนี้จะออกแบบให้มีเสาเข็มเจาะเรียงขบต่อเนื่องกัน การก่อสร้างเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องจะเริ่มจากติดตั้งเสาเข็มปฐมภูมิ (Primary pile) ซึ่งเป็นเสาเข็มที่มีกำลังอัดต่ำโดยเว้นระหว่างต้นไว้ติดตั้งเสาเข็มทุติยภูมิ (Secondary pile) (รูปที่ 13) ซึ่งจะเจาะและหล่อตามมาภายหลังให้เข้าขบเป็นกำแพงต่อเนื่อง ตามแนวคานนำร่อง (Guide wall) ที่ได้สร้างขึ้นก่อน (รูปที่ 14) ดังนั้นเสาเข็มทุติยภูมิจะ เป็นโครงสร้างหลักในการรับแรงดันดิน และยังสามารถออกแบบให้รับแรงตามแนวดิ่งได้ (Vertical loading)



รูปที่ 13 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่อง (Secant Bored Pile)



รูปที่ 14 คานนำร่องสำหรับกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงขบชิดกันต่อเนื่อง (Secant Bored Pile)

3.2.3 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous / Tangent Bored Pile)

กำแพงระบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเป็นการออกแบบโดยการนำเสาเข็มเจาะมาเรียงกัน โดยออกแบบให้มีช่องว่างระหว่างผิวเสาเข็ม ที่เพียงพอที่จะไม่ทำให้ดินไหลออกมา การก่อสร้างก็ใช้เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะทั่วไป

4. วิธีและขั้นตอนการขุดดิน

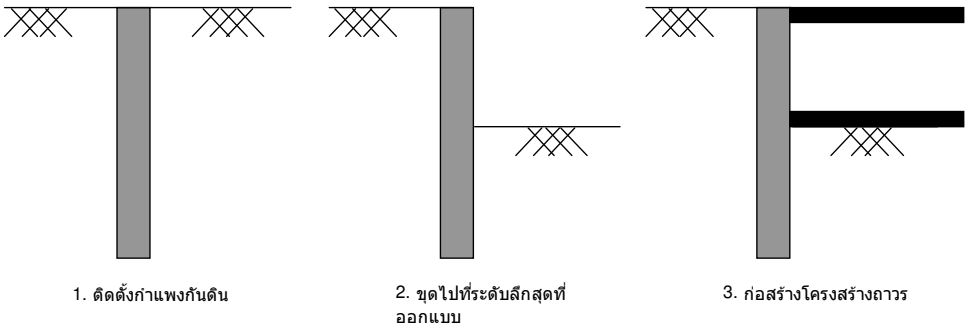
การเลือกวิธีและขั้นตอนการขุดดินจะต้องพิจารณาจากสิ่งเหล่านี้คือ ระยะเวลาในการก่อสร้าง ราคางานขุดดินและระบบป้องกันดิน พื้นที่สำหรับทำงาน การใช้ค้ำยันชั่วคราว การเลือกพื้นหรือโครงสร้างถาวรเป็นค้ำยัน เป็นต้น วิธีและขั้นตอนการขุดดินดังต่อไปนี้เป็นวิธีการขุดดินหลักที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

4.1 กำแพงกันดินแบบปลายยื่น

วิธีการก่อสร้างนี้มักใช้กับงานขุดที่มีความลึกไม่มาก และใช้ระยะเวลาในการขุดไม่มาก ตารางที่ 3 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการใช้กำแพงกันดินแบบปลายยื่น และ รูปที่ 15 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างดังกล่าว

ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อจำกัดของการใช้กำแพงกันดินแบบปลายยื่น

ข้อดี	ข้อจำกัด
1 มีขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ยุ่งยาก 2 ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อย 3 มีพื้นที่ในการขุดดินมากเนื่องจากไม่ถูกค้ำยันขวาง	1 ต้องใช้หน้าตัดกำแพงที่ใหญ่และความลึกกำแพงที่สูงกว่าการขุดแบบอื่น 2 มีการเคลื่อนตัวที่บริเวณหัวกำแพงสูง 3 อาจมีราคาแพงกว่าวิธีอื่นหากต้องขุดดินลึก



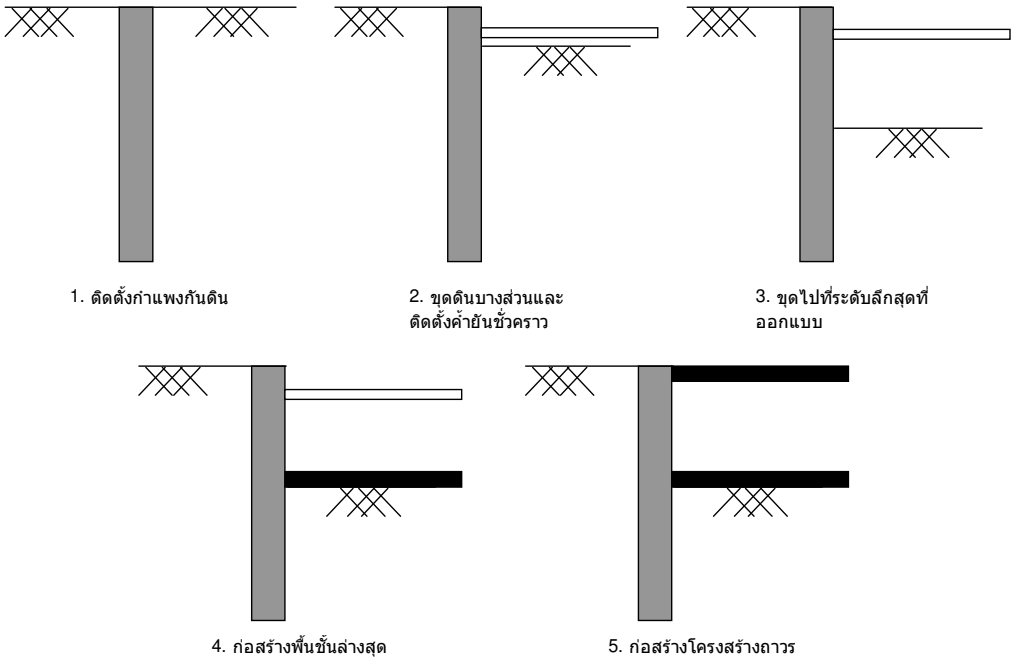
รูปที่ 15 ขั้นตอนการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินโดยใช้กำแพงแบบปลายยื่น

4.2 กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน (Bottom-Up Construction)

กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน โดยทั่วไปสามารถใช้ได้ทั้งระบบกำแพงแบบแข็งและระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น วิธีนี้ทำการก่อสร้างโดยติดตั้งค้ำยันชั่วคราวจากระดับบนจนถึงระดับล่างสุดโดยมีจำนวนชั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบ หลังจากขุดดินถึงระดับขุดสุดท้ายจึงก่อสร้างพื้น รวมถึงถอดค้ำยันชั่วคราวจากระดับล่างสุดขึ้นมาจนถึงระดับบน ตารางที่ 4 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน และ รูปที่ 16 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างดังกล่าว

ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อจำกัดของการใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน

ข้อดี	ข้อจำกัด
1 สามารถควบคุมการเคลื่อนตัวของดินรอบๆพื้นที่การขุดด้วยการออกแบบค้ำยันที่เหมาะสม 2 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กำแพงแบบปลายยื่น วิธีนี้สามารถลดขนาดหน้าตัดและความลึกของกำแพงลงไปได้ 3 การก่อสร้างโครงสร้างไม่ซับซ้อนและสะดวกกว่าการก่อสร้างโครงสร้างแบบบนลงล่าง	1 ต้องเสียค่าใช้จ่ายค่าค้ำยันชั่วคราว 2 ระบบค้ำยันชั่วคราวบางรูปแบบทำให้งานขุดดินทำได้ลำบาก 3 ใช้เวลาการก่อสร้างมาก



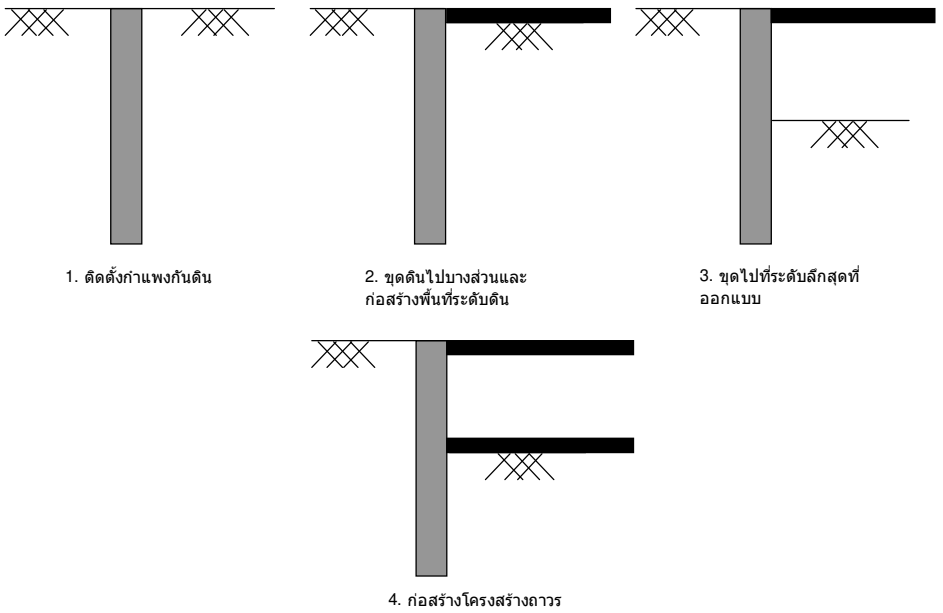
รูปที่ 16 ขั้นตอนการใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน

4.3 กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากบนลงล่าง (Top-Down Construction)

วิธีการก่อสร้างแบบนี้จะใช้พื้นถนนหรือโครงสร้างถาวรอื่นๆเป็นค้ำยันให้กับระบบป้องกันดินพัง โดยการก่อสร้างจะสร้างพื้นชั้นบนสุดและไล่ลงมาที่ระดับต่ำกว่าจนถึงระดับสุดท้าย ตารางที่ 5 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากบนลงล่าง และ รูปที่ 17 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างดังกล่าว

ตารางที่ 5 ข้อดีและข้อจำกัดของการใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากบนลงล่าง

ข้อดี	ข้อจำกัด
1 สามารถเริ่มทำการก่อสร้างโครงสร้างระดับเหนือพื้นดินได้ในเวลาเดียวกัน 2 ไม่เสียค่าใช้จ่ายสำหรับค้ำยันชั่วคราว 3 สามารถทำให้ค่าก่อสร้างกำแพงกันดินมีราคาถูกกว่าแบบอื่น 4 โดยทั่วไปมีการเคลื่อนตัวของดินรอบๆพื้นที่ขุดดินน้อยกว่าแบบอื่น	1 งานขุดดินทำได้ช้าและลำบากกว่าวิธีอื่น 2 ต้องเสียค่าใช้จ่ายค่าเสาเหล็กที่ต้องฝังในเสาเข็ม 3 ต้องสร้างช่องเปิดในพื้นเพื่อทำการขุดดินและสร้างพื้นในชั้นที่ลึกกว่า 4 น้ำหนักชั่วคราวลงพื้นขณะก่อสร้างอาจสูงกว่าน้ำหนักขณะใช้งานตามปกติ ทำให้ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการออกแบบพื้น



รูปที่ 17 ขั้นตอนการใช้กำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน ก่อสร้างโครงสร้างจากบนลงล่าง

5. การออกแบบระบบกำแพงกันดิน

ก่อนทำการวิเคราะห์แรง การเคลื่อนตัวและเสถียรภาพของงานขุด จะต้องกำหนดคุณสมบัติของกำแพง ความลึกกำแพงกันดินควรวางไว้ในชั้นดินแข็งและมีความลึกมากกว่าระดับขุดพอเพียงที่จะทำให้งานขุดมีเสถียรภาพ การป้องกันการเคลื่อนตัวของดินคือจำนวนค้ำยัน ระดับของค้ำยัน และขั้นตอนการก่อสร้าง อาจมีการเตรียมทางเลือกในการออกแบบมากกว่าหนึ่งแบบเพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาวิธีการก่อสร้างที่มีความเหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์แรง การเคลื่อนตัวและเสถียรภาพของงานขุด ในการขุดดินเพื่อก่อสร้างอุโมงค์ทางลอด สามารถทำได้โดยวิธีคำนวณจากสมการ (Conventional equation) หรือวิธีเชิงตัวเลข (Numerical analysis) ซึ่งสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องสอดคล้องกับสภาพชั้นดิน สภาพการก่อสร้าง เมื่อได้ผลจากการวิเคราะห์แล้วจึงทำการตรวจสอบว่าโครงสร้างกำแพงกันดิน ค้ำยันสามารถต้านแรงได้หรือไม่ และต้องตรวจสอบเสถียรภาพของงานขุดด้วยหากพบว่าโครงสร้างไม่สามารถต้านทานแรงได้ ต้องทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดกำแพง ความหนากำแพงกันดิน จำนวนหรือระดับของค้ำยัน ความลึกกำแพงกันดิน วิธีการก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้างหรืออาจต้องทำการปรับปรุงดิน การปรับเปลี่ยนดังกล่าวจะต้องทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ตามที่ออกแบบไว้

หลังจากได้แรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแล้วต้องทำการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินรอบๆกำแพงกันดิน บริเวณพื้นที่ข้างเคียงและทำการวิเคราะห์ผลกระทบต่อโครงสร้างรอบๆบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง หากผลการวิเคราะห์แสดงการเคลื่อนตัวที่เกินข้อกำหนด จะต้องทำการป้องกันการเคลื่อนตัวตั้งแต่ในขั้นตอนการออกแบบ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีคือ เพิ่มความหนากำแพงกันดิน เพิ่มความลึกกำแพงกันดิน เพิ่มจำนวน

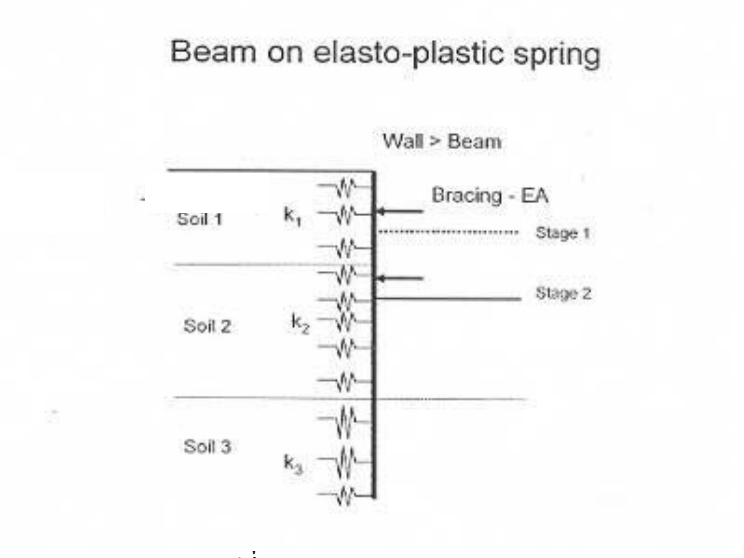
หรือความแข็งแรงของค้ำยัน เปลี่ยนวิธีหรือขั้นตอนการก่อสร้าง ทำการปรับปรุงดิน ทำการเสริมความแข็งแรงโครงสร้างข้างเคียง เป็นต้น ทั้งนี้วิธีการป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียงต้องมีความเหมาะสมต่อการก่อสร้างกำแพงกันดินและโครงสร้างใต้ดินด้วย

5.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมตัวกำแพง

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมตัวกำแพงปัจจุบันใช้การวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมระหว่างดินและกำแพงได้อย่างใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก การวิเคราะห์พฤติกรรมตัวกำแพงโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีมากมายหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มี 2 ประเภท คือ วิธี Beam on elasto-plastic spring และวิธี Continuum analysis

5.1.1 Beam on elasto-plastic spring

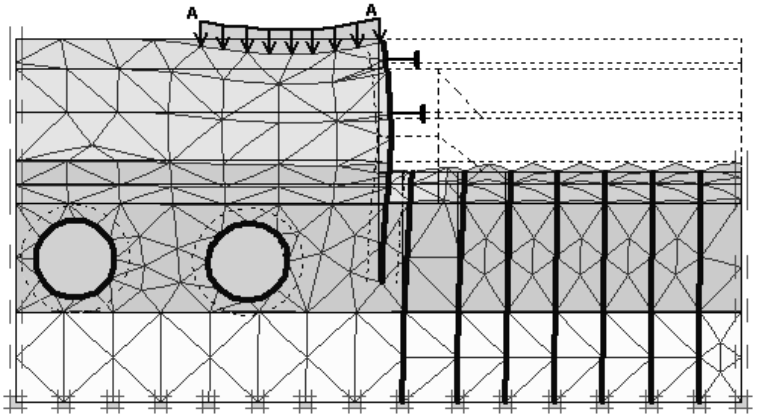
วิธีนี้จำลองดินเป็นอนุกรมของสปริง (รูปที่ 18) โปรแกรมที่นิยมใช้ได้แก่ WALLAP, RIDO และ PAROI เป็นต้น โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้คือค่าแรงดันดิน โมเมนต์และแรงเฉือน แรงในระบบค้ำยันและค่าการเคลื่อนตัวของกำแพง แต่ไม่สามารถแสดงค่าการทรุดตัวของดินโดยรอบบ่อขุด



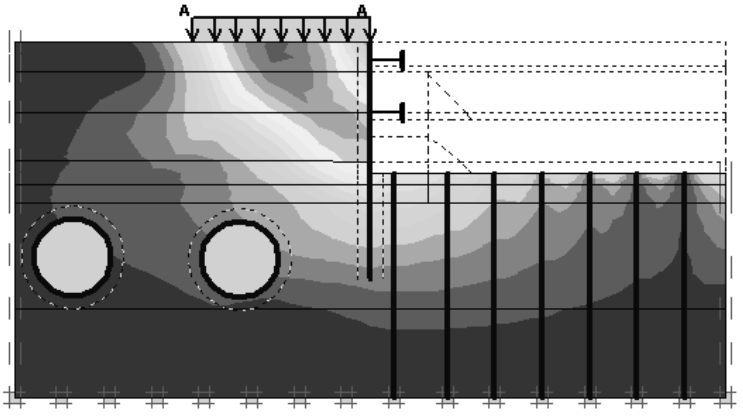
รูปที่ 18 Beam on elasto-plastic spring

5.1.2 Continuum analysis

วิธีนี้ให้ผลวิเคราะห์ได้เหมือนกับวิธี Beam on elasto-plastic spring และยังให้ผลการทรุดตัวและเคลื่อนของดินโดยรอบบ่อขุดซึ่งสามารถใช้ดูผลกระทบของการขุดดินต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ (รูปที่ 19) โปรแกรมที่นิยมใช้ได้แก่ PLAXIS, FLAC และ CRISP เป็นต้น



ก. Deformation mesh



ข. Total displacement shading

รูปที่ 19 ผลวิเคราะห์ FEM

5.2 การออกแบบค้ำยันชั่วคราวหรือค้ำยันถาวร

ค้ำยันในการขุดทำหน้าที่รองรับแรงดันจากดิน การจัดและออกแบบค้ำยันที่เหมาะสมต้องจัดวางเพื่อให้เกิดแรงในกำแพงกันดินให้น้อย ลดการเคลื่อนตัวของดินรอบๆกำแพงกันดิน ไม่กีดขวางการขุดดินและการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค้ำยันที่ใช้หากเป็นเหล็กก็ออกแบบหน้าตัดตามข้อกำหนดของการออกแบบโครงสร้างเหล็ก หากใช้พื้นหรือคานเป็นค้ำยันก็ใช้ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้ระบบกำแพงแบบแข็งสามารถเลือกระยะห่างของค้ำยันได้ตั้งแต่ 4.0 – 8.0 ม. ขึ้นอยู่กับการออกแบบการเสริมเหล็กเพื่อความเหมาะสมในการก่อสร้างพื้นชั้นใต้ดิน

5.3 ออกแบบการเสริมเหล็กกำแพงกันดินและจัดทำแบบรายละเอียด

เมื่อได้แรงจากกำแพงกันดินแล้วจึงทำการออกแบบรายละเอียดการเสริมเหล็กในกำแพงกันดินตามข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก บางกรณีสามารถใช้การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงในการออกแบบ ซึ่งมีใช้อยู่ในต่างประเทศ รายละเอียดเหล็กเสริมในกำแพงกันดินจะแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไปตรงที่ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต้องมากพอที่จะทำให้คอนกรีตไหลผ่านไปได้สะดวก และตัวโครงเหล็กเสริมต้องมีความแข็งแรงเพียงพอในการยกขึ้นและติดตั้งในหลุมเจาะ บางกรณีต้องทำการออกแบบรอยต่อระหว่างกำแพงและพื้นชั้นใต้ดิน นอกจากนี้ควรกำหนดตำแหน่ง จำนวนและขนาดของเครื่องมือวัดต่างๆที่ควรใช้ในงานขุดดินไว้ในการออกแบบกำแพงกันดิน เช่น Inclinometer, settlement point และ piezometer

6. ขั้นตอนการทำงานโครงสร้างอุโทงค์ทางลอด

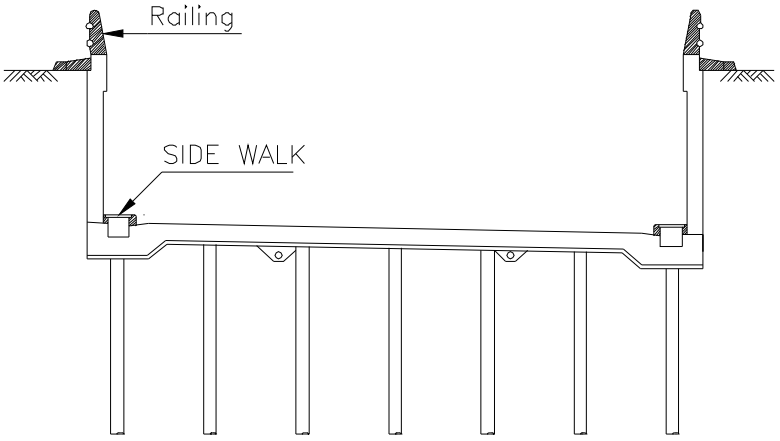
โครงสร้างทางลอดโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 โซนตามหน้าตัดของทางลอด คือ หน้าตัดกำแพงโซนตื้น (Shallow Wall Section) หน้าตัดกำแพงโซนลึก (Intermidiate Wall Section) และหน้าตัดกำแพงโซนลึกสุด (DeepWall Section) ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 การแบ่งโซนโครงสร้างทางลอด

6.1 หน้าตัดกำแพงโซนตื้น (Shallow Wall Section)

หน้าตัดกำแพงโซนตื้นจะอยู่ในช่วงทางลงทางลอดและบริเวณทางขึ้นของทางลอด (รูปที่ 21) ที่มีการขุดดินไม่ลึกมากนัก โดยทั่วไปความลึกจะไม่เกิน 4 เมตร ระบบกำแพงที่ใช้จะเป็นกำแพง คสล. หล่อภายหลังจากขุดดินถึงระดับขุดสุดท้าย การขุดดินจะใช้ Sheet Pile เป็นระบบกำแพงกันดินชั่วคราวร่วมกับการติดตั้งระบบค้ำยันชั่วคราว ดังแสดงในรูปที่ 22



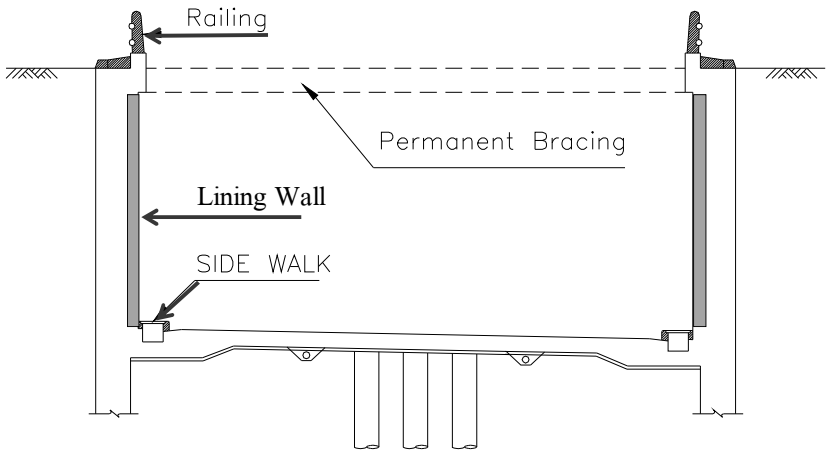
รูปที่ 21 หน้าตัดกำแพงโซนตื้น



รูปที่ 22 การขุดดินโดยใช้ Sheet Pile เป็นระบบกำแพงกันดินชั่วคราวสำหรับหน้าตัดกำแพงโซนตื้น

6.2 หน้าตัดกำแพงโซนลึก (Intermidiate Wall Section)

หน้าตัดกำแพงโซนลึก (รูปที่ 23) จะอยู่ในช่วงถัดจากกำแพงโซนตื้นต่อเนื่องไปถึงแนวกำแพงโซนลึกสุด การขุดดินในโซนนี้จะใช้ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall) ซึ่งอาจจะเป็นกำแพง Contiguous Pile กำแพง Secant Pile หรือ D-Wall และทำการขุดดินโดยใช้วิธีการก่อสร้างจากล่างขึ้นบน (Bottom-Up Construction) ดังแสดงในรูปที่ 24



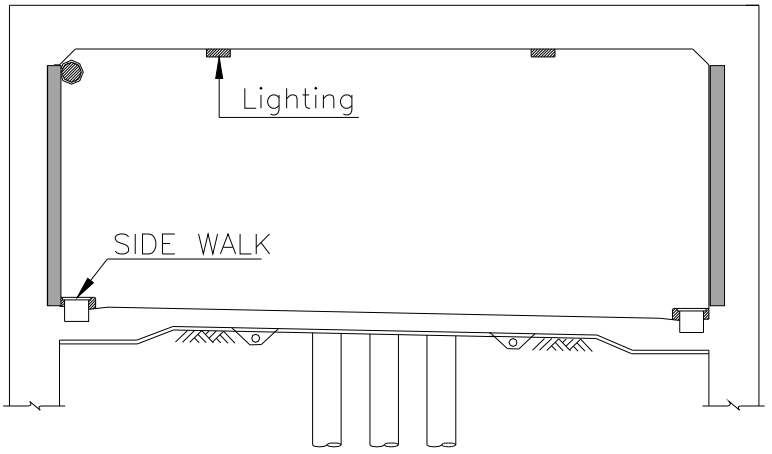
รูปที่ 23 หน้าตัดกำแพงโซนลึก



รูปที่ 24 การขุดดินโดยใช้ D-Wall เป็นระบบกำแพงกันดินสำหรับหน้าตัดกำแพงโซนลึก

6.3 หน้าตัดกำแพงโซนลึกสุด (Deep Wall Section)

หน้าตัดกำแพงโซนลึกสุด (รูปที่ 25) โดยทั่วไปจะอยู่ใกล้กึ่งกลางทางแยกหรือจุดตัดทางแยกซึ่งเป็นบริเวณที่อาจมีบ่อน้ำใต้ดิน (Water Sump) รวมด้วยทำให้เป็นบริเวณที่ลึกที่สุดของอุโมงค์ทางลอด การขุดดินในโซนนี้จะใช้ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall) และทำการขุดดินโดยใช้วิธีการก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top-Down Construction) โดยทำการก่อสร้างคาน คสล. และพื้นถนนก่อนการขุดดินเพื่อใช้เป็นระบบค้ำยันถาวรให้กับระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 25 หน้าตัดกำแพงโซนลึกสุด



รูปที่ 26 การขุดดินโดยใช้ D-Wall เป็นระบบกำแพงกันดินสำหรับหน้าตัดกำแพงโซนลึกสุด

7. การควบคุมการก่อสร้างและแนวทางลดปัญหาในระหว่างการก่อสร้างทางอุโมงค์ลอดทางแยก

7.1 ปัญหาการจราจรในระหว่างการก่อสร้าง

ปัญหาหลักจากการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกในทุกโครงการที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง (รูปที่ 27) ตั้งแต่เริ่มงานก่อสร้างเสาเข็มและกำแพงกันดินเรื่อยมาจนถึงงานขุดดิน ซึ่งจะต้องมีการวางแผนการจัดการจราจรระหว่างการก่อสร้างพร้อมกับการเบี่ยงเส้นทาง (รูปที่ 28) เพื่อให้การก่อสร้างสามารถทำได้อย่างต่อเนื่องในขณะเดียวกันก็ไม่ทำให้เกิดปัญหาการการจราจรมากเกินไป



รูปที่ 27 การจราจรติดขัดเนื่องจากพื้นที่ก่อสร้าง



รูปที่ 28 การทำแนวบี่ยงเส้นทางตามแผนการจัดการจราจรระหว่างการก่อสร้าง

7.2 การย้ายสาธารณูปโภคในพื้นที่ก่อสร้าง

ในงานก่อสร้างทางลอด จะประสบปัญหากับสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดินเป็นอย่างมาก อีกทั้งเป็นงานก่อสร้างในเขตเมืองทำให้มีสาธารณูปโภคทั้งบนอากาศและใต้ดินจากหลายหน่วยงานซึ่งมีตำแหน่งที่เกี่ยวพันซ้ำซ้อนกันอยู่ นอกจากนี้แนวสายไฟฟ้าทั้งบนดินและใต้ดิน ก็ยังเป็นอุปสรรคสำหรับการทำงานของเครื่องจักรตามแนวทางลอด โครงการฯและผู้รับจ้างจะต้องประสานงานอย่างใกล้ชิดตลอดเวลากับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อรื้อย้ายและติดตั้งคืนเป็นช่วงๆ

7.3 แผนการป้องกันอุบัติภัยระหว่างการก่อสร้าง

ในระหว่างการก่อสร้างทั้งกลางวันและช่วงกลางคืนจะต้องมีการติดตั้งป้ายและสัญญาณเตือนในพื้นที่ก่อสร้าง (รูปที่ 29) เพื่อป้องกันอุบัติภัยที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 29 การทำป้ายและสัญญาณเตือนบริเวณการก่อสร้าง

7.4 กำหนดแผนและขั้นตอนการทำงานก่อสร้าง

ก่อนการทำงานต้องศึกษาพื้นที่การก่อสร้างและพื้นที่ข้างเคียง ถ้าจำเป็นต้องทำการหาระยะวิกฤตเพื่อทดสอบผลกระทบก่อนการก่อสร้างและกำหนดแบ่งพื้นที่การก่อสร้างก่อน-หลัง เพื่อหลีกเลี่ยงให้เกิดผลกระทบที่น้อยที่สุด ซึ่งการกำหนดระยะวิกฤตมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

- พิจารณาจากผลของการทดสอบของโครงการที่ผ่านมา เช่น กำหนดระยะวิกฤตตามระยะห่างที่ได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ในกรณีที่ตำแหน่งการก่อสร้างฐานรากอยู่ห่างจากระยะ

วิกฤต ก็สามารถทำการก่อสร้างตามขั้นตอนปกติ แต่หากการก่อสร้างอยู่ภายในระยะวิกฤต ก็จะต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษ และอาจจะต้องเปลี่ยนขั้นตอนหรือวิธีการก่อสร้างให้เหมาะสม

- พิจารณาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โดยสามารถประมาณค่าการทรุดตัวจากการก่อสร้างได้ ทำให้ผู้รับเหมาทราบว่าการขุดดินอาจทำให้โครงสร้างข้างเคียงทรุดตัวเพียงใด ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอาจมีการทรุดตัวเกิดขึ้นในระดับสูงมากจนเกินที่ยอมรับได้ ก็ควรจะหามาตรการป้องกันเช่น เพิ่มความยาวของระบบกำแพงกันดิน เพิ่มความแข็งแรงของระบบค้ำยัน ปรับปรุงคุณภาพดิน หรือเลือกขั้นตอนการขุดดินที่สามารถลดขอบเขตของการทรุดตัว

7.5 แนวอุโมงค์ทางลอดอยู่ใต้โครงสร้างสะพาน

ในบางโครงการมีการวางแนวอุโมงค์ทางลอดอยู่ใตสะพานข้ามทางแยกหรือทางยกระดับ เช่นโครงการอุโมงค์ดินแดงและอุโมงค์ลอดทางแยกปากเกร็ด ซึ่งมีความสูงจำกัด (Limited Headroom) การก่อสร้างกำแพงกันดินบริเวณนั้นต้องใช้ระบบกำแพง D-Wall เท่านั้น ไม่สามารถใช้ระบบกำแพงชนิดอื่นเนื่องจากอุปกรณ์ขุดเจาะ D-wall สามารถทำการประยุกต์ให้ทำงานได้ภายใต้บูมของรถเครนที่ตัดสั้นลง (รูปที่ 30)



รูปที่ 30 หัวเจาะระบบ Mechanic สำหรับทำงานภายใต้ความสูงจำกัด (ทางลอดดินแดง)

7.6 การตรวจสอบผลการก่อสร้างในระหว่างการทำงาน

7.6.1 การตรวจวัดโดยการสังเกตการณ์

ขณะทำการก่อสร้างจะต้องทำการสังเกตโดยเบื้องต้น เช่นดูปริมาณฝุ่นด้วยสายตา ตรวจสอบความดังเสียงด้วยการฟัง ตรวจสอบแรงสั่นสะเทือนด้วยความรู้สึก และสังเกตโครงสร้างข้างเคียงว่ามีสิ่งที่ผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ เช่น ในงานขุดดิน ต้องคอยสังเกตดูระบบค้ำยันและถนนโดยรอบโครงการว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นหรือไม่ถ้าเกิดดังตัวอย่างในรูปที่ 31 ก็ต้องหาสาเหตุเพื่อแก้ไขต่อไป



รูปที่ 31 การทรุดตัวของถนนรอบบ่อขุดซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

7.6.2 การตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือวัด

7.6.2.1 การตรวจวัดค่าความสั่นสะเทือน (Vibration Test)

การตรวจวัดค่าความสั่นสะเทือนเป็นการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity, PPV) ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดค่าความสั่นสะเทือน (Vibration Monitor) ดังแสดงในรูปที่ 32 โดยติดตั้งหัวสัญญาณแบบ 3 ทิศทาง ค่าความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ จะถูกบันทึกและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือน

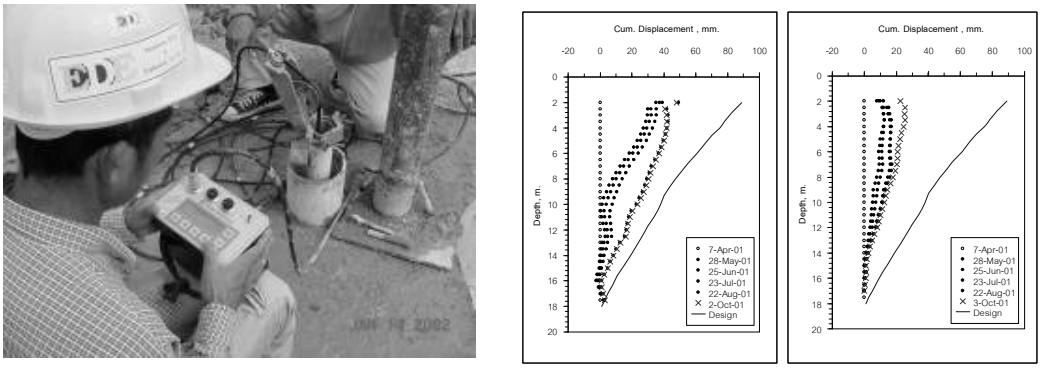




รูปที่ 32 การทดสอบวัดค่าความสั่นสะเทือนของอาคารประวัติศาสตร์ในขณะทำการลงปลอกเหล็กชั่วคราว

7.6.2.2 การวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินไม่ว่าจะเป็นกำแพง Sheet Pile กำแพง Diaphragm Wall หรือ กำแพงแบบ Secant Pile จะใช้เครื่องมือตรวจวัดที่เรียกว่า Inclinometer ดังตัวอย่างรูปที่ 33 ค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้ใช้สอบทานความถูกต้องในการออกแบบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ นอกจากนั้นผลที่ได้จากการวัดยังสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มการทรุดตัวของผิวดินบริเวณโดยรอบบ่อขุดได้



รูปที่ 33 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินโดยใช้เครื่อง Inclinometer

7.6.2.3 การตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน

การตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินด้วย Settlement Plate ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์วัดการทรุดตัวในแนวดิ่ง การติดตั้งควรจะเลือกติดตั้ง Plate ตามระยะห่างจากพื้นที่ก่อสร้าง ที่ได้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวทางทฤษฎีสูง การติดตั้ง Settlement plate ที่เหมาะสมควรจะติดตั้งตามตำแหน่งที่สามารถสร้างรูปตัดการทรุดตัวเทียบกับระยะห่างของพื้นที่ก่อสร้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 34



รูปที่ 34 การติดตั้ง Settlement plate เพื่อวัดค่าการทรุดที่ผิวดิน

7.6.3 การกำหนดระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level)

ในการขุดดินซึ่งมีการติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ เช่นติดตั้ง Inclinometer วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงหรือติดตั้ง Settlement Plate เป็นวัดค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง เพื่อสอบทานค่าการออกแบบกับค่าที่วัดได้จริงในสนาม ต้องกำหนดระดับความระมัดระวังในการทำงาน (Trigger Level) เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการควบคุมงาน โดยกำหนดเป็น 3 ระดับ (วันชัย, 2545) คือ

- Alert Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 70 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายต้องทำการตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้าง
- Alarm Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 80 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ผู้เกี่ยวข้องต้องปรึกษากับผู้ออกแบบเพื่อความมั่นใจว่าระบบการก่อสร้างมีความปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างข้างเคียง
- Action Level คือระดับความระมัดระวังเมื่อค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากกว่า 90 % ของค่าที่วิเคราะห์ได้ทางทฤษฎี ในระดับนี้ต้องหยุดการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยและผลกระทบต่อพื้นที่ประวัติศาสตร์และพื้นที่ข้างเคียงอย่างละเอียด

8. สรุป

อุโมงค์ลอดทางแยกและอุโมงค์กลับรถมีแนวโน้มที่จะเป็นทางเลือกอันดับแรกในการแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางแยกและจุดกลับรถต่างๆ ในเขตเมืองใหญ่ในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ชั้นในในเขตกรุงเทพฯ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ไม่บดบังทัศนียภาพ ถึงแม้จะมีค่าก่อสร้างมาก ปัญหาอุปสรรคในระหว่าการก่อสร้างมากกว่า และใช้ระยะเวลาก่อสร้างนานกว่า ตลอดจนต้องใช้เทคนิคการก่อสร้างที่ซับซ้อนกว่าการก่อสร้างสะพานข้ามทางแยก แต่ทั้งนี้ด้วยเทคโนโลยีการออกแบบและก่อสร้างที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้การก่อสร้างอุโมงค์รถยนต์หลายโครงการก่อสร้างแล้วเสร็จและมีการใช้เรื่อยมาจนกระทั่งปัจจุบัน

เทคนิคหลักสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกโดยทั่วไปประกอบด้วยงานก่อสร้างเสาเข็มซึ่งอาจจะเป็นเสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มตอก งานก่อสร้าง / ติดตั้งระบบกำแพงกันดิน และงานขุดดิน ซึ่งจะต้องพิจารณาเลือกระบบกำแพง และออกแบบขั้นตอนงานขุดดินให้เหมาะสม ในขณะเดียวกันในระหว่างการก่อสร้างต้องมีการวางแผนการก่อสร้างอย่างดีเพื่อลดผลกระทบต่างๆ จากการก่อสร้างเช่นปัญหาการจราจรติดขัดในระหว่างการก่อสร้าง ปัญหามลภาวะต่างๆ นอกจากนี้ในระหว่างการก่อสร้างควรมีการติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิค เช่นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว (Inclinometer) เครื่องมือวัดการทรุดตัว (Settlement Plate) หรือเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Piezometer) เพื่อใช้เป็นข้อมูลเพื่อสอบทานการออกแบบ

วิวัฒนาการงาน Diaphragm wall ในประเทศไทย

EVOLUTION OF DIAPHRAGM WALL WORKS IN THAILAND

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ (Chanchai Submaneewong)[2]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

[2]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) chanchai@seafco.co.th

บทคัดย่อ : Diaphragm wall เป็นกำแพงกันดินชนิดขุดเจาะและหล่อในที่ซึ่งนิยมใช้ในงานขุดดินเพื่อก่อสร้างฐานรากอาคารหรือโครงสร้างใต้ดินที่มีความลึกมากหรือทำการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายของโครงสร้างข้างเคียงสูง โดย Diaphragm wall ได้นำมาใช้เป็นโครงสร้างระบบป้องกันดินสำหรับงานขุดดินลึกในกรุงเทพฯ มาประมาณ 20 ปีแล้ว ในระยะแรกๆ ที่เริ่มใช้กำแพงระบบนี้ วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ประกอบการต่างก็ยังใหม่กับกำแพงระบบนี้ ในปัจจุบันมีหลายโครงการที่เลือกใช้ Diaphragm wall เป็นระบบป้องกันดินและก่อสร้างแล้วเสร็จ ทำให้ทั้งวิศวกรผู้ออกแบบและผู้ประกอบการต่างก็มีประสบการณ์ในการออกแบบและเทคนิคการก่อสร้างที่ดีกว่าในอดีตมากประกอบกับมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของกำแพงมาอย่างต่อเนื่อง บทความนี้จะนำเสนอวิธีการก่อสร้างและพัฒนาการของการออกแบบและก่อสร้าง Diaphragm wall ในประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ABSTRACT : Diaphragm wall is a cast in-situ reinforced concrete soil protection system which is suitable for deep basement construction or excavation in geotechnically sensitive area. It has been introduced in Bangkok for approximately 20 years. At the early stage of using this type of wall, the design engineers and the contractors were new to this system. Nowadays diaphragm walls have been utilized for excavation works in many projects, so the design engineers and the contractors have gained better experience in the design and construction technology of diaphragm walls than the past. Therefore there are many research works on the behaviours of supporting deep excavation works in Bangkok . This paper presents the design and construction development of diaphragm walls in Thailand from the past to present.

KEYWORDS : Diaphragm wall, Deep excavation, Top – down Construction, Bottom – up Construction

1. บทนำ

Diaphragm wall เป็นกำแพงกันดินชนิดขุดเจาะหล่อในที่ ซึ่งสามารถใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวหรือโครงสร้างถาวรในงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินที่มีความลึกมากได้เนื่องจากกำแพงระบบนี้เป็นระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid wall) มีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด (Bending moment) และแรงเฉือน (Shear) ที่เกิดจากแรงดันดินได้สูงและมีการโก่งตัวน้อยทำให้ปริมาณการเคลื่อนตัว (Displacement) ของดินเกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible wall) เช่น เข็มพืดเหล็ก (Sheet pile wall) ทำให้ปัญหาความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงในระหว่างการก่อสร้างเกิดได้น้อยมากหรือไม่เสียหายเลย

การก่อสร้าง Diaphragm wall ได้เริ่มต้นครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 ในประเทศอิตาลี [1] หลังจากนั้นการก่อสร้าง Diaphragm wall เริ่มแพร่หลายไปทั่วโลกและมีการนำเข้ามาใช้ในประเทศไทยนานกว่า 20 ปีแล้ว โดยใช้ในงานหลายประเภท ได้แก่งาน

ก่อสร้างห้องใต้ดิน ทางลอดใต้ถนน สถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน หรือปล่องอุโมงค์ลึก (ภาพที่ 1 ถึง 4)



ภาพที่ 1 Diaphragm wall ในงานก่อสร้างห้องใต้ดิน (Basement)



ภาพที่ 2 Diaphragm wall ในงานทางลอดใต้ถนน (Underpass)

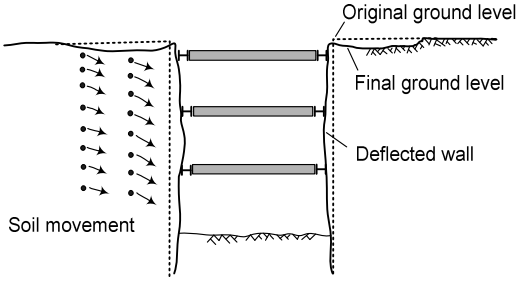


ภาพที่ 3 Diaphragm wall ในงานสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน (Subway station)



ภาพที่ 4 Diaphragm wall ในงานปล่องอุโมงค์ลึก (Deep shaft)

ปัจจุบันปัญหาความขัดแย้งระหว่างโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่กับอาคารเก่าข้างเคียงเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุทั้งจากกระบวนการก่อสร้างหรือจากปัจจัยอื่น ปัจจัยที่เห็นได้ชัดคือการเคลื่อนตัวและทรุดตัวของดินรอบบริเวณที่มีการขุดดิน (ภาพที่ 5) ซึ่งขาดการออกแบบที่ดีหรือเลือกใช้ระบบกำแพงที่ไม่เหมาะสม ทำให้ดินรอบบ่อขุดเกิดการเคลื่อนตัวมากส่งผลให้เกิดการทรุดตัวและอาจเกิดความความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ (ภาพที่ 6) ดังนั้นแนวโน้มในการใช้ Diaphragm wall ในเขตเมืองใหญ่จึงมีสูงเพื่อลดปัญหาผลกระทบจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน



ภาพที่ 5 การเคลื่อนตัวและทรุดตัวของดินรอบบ่อที่หลีกเลี่ยงได้ยาก [2]

ข้อดีสำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกโดยใช้กำแพงกันดินระบบ Diaphragm wall

- สามารถลดการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวของดินโดยรอบบ่อขุดได้ดีกว่าการใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet pile)
- สามารถใช้เป็นกำแพงถาวรภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จได้

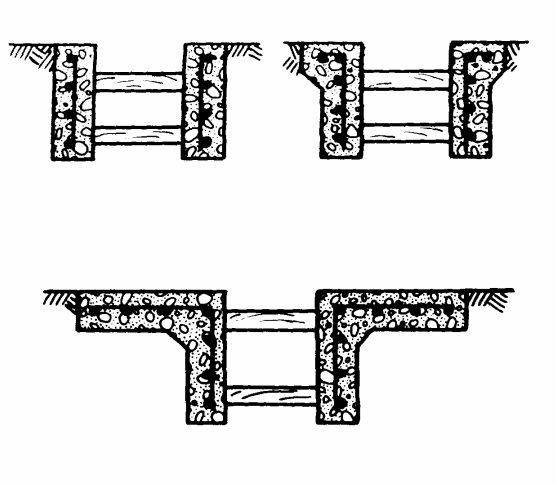
- สามารถทำการเจาะลงในดินทุกประเภทได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ
- สามารถทำการเจาะลงได้ถึงความลึกที่ออกแบบใช้กันน้ำใต้ดินในโครงสร้างใต้ดินที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียวได้ดี



ภาพที่ 6 ความเสียหายจากการเคลื่อนตัวและทรุดตัวของดินรอบบ่อขุด

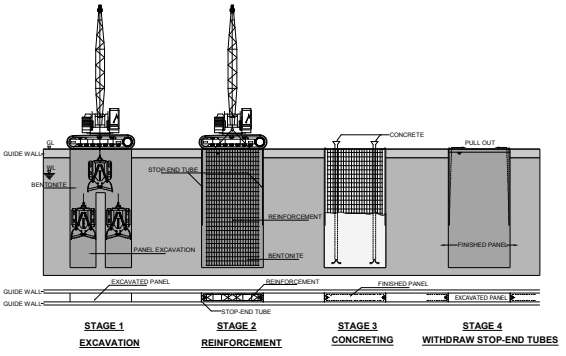
2. วิธีการก่อสร้าง

เนื่องจาก Diaphragm wall เป็นการก่อสร้างโดยตรงในชั้นดินไม่มีปลอกเหล็กป้องกันดินพัง เหมือนการทำเสาเข็มเจาะจึงต้องทำคานคู่บังคับแนวกำแพงและความตรงดิ่งของหัวเจาะ โดยทั่วไปคานนี้จะมีความลึกประมาณ 1.50-2.00 เมตร (รูปที่ 7) ผนังของ Guide wall ต้องเรียบและได้แนวดิ่งโดยเอียงจากแนวดิ่งไม่เกิน 1:200



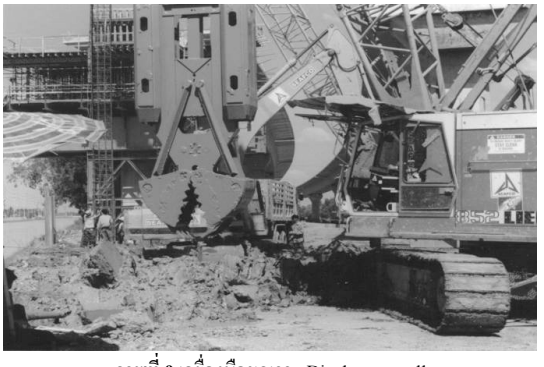
ภาพที่ 7 แบบต่างๆ ของ Guide Walls

ขั้นตอนการก่อสร้าง Diaphragm wall แสดงในภาพที่ 8 โดยมีรายละเอียด ดังนี้



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการก่อสร้าง Diaphragm Wall

- การขุดเจาะดินโดยทั่วไปใช้หัวเจาะแบบ Cable hang grab (ภาพที่ 9) อาจเป็นแบบ Mechanical หรือ Hydraulic การเจาะใช้ Grab ขุดดินในร่อง Guide wall ออกจนถึงระดับใต้ Guide Wall แล้ว จึงเติมของเหลวค้ำจุนชนิดเบ็นโทไนท์ (Bentonite support fluid) ลงไปในร่องให้ด้านแรงดันของดินมิให้บีบตัวหรือพังเข้ามา การเติมสารละลายต้องให้สูงกว่าระดับใต้ Guide wall ตลอดเวลา คุณสมบัติของของเหลวค้ำจุนที่เติมลงไปต้องมีคุณสมบัติดีพอที่จะต้านแรงดันของดินมิให้บีบตัวหรือพังทะลายเข้ามาในร่องที่เจาะไว้โดยต้องตรวจสอบทุกขั้นตอนคือ เมื่อผสมใหม่ ตอนกำลังขุดเจาะ และก่อนเทคอนกรีตโดยเก็บจากก้นหลุมมาทดสอบ



ภาพที่ 9 เครื่องมือขุดเจาะ Diaphragm wall

- เมื่อเจาะร่องกำแพงได้ความยาวและความลึกที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ต้องทำความสะอาดของเหลวค้ำจุนชนิดเบ็นโท

ไนท์ในหลุมเจาะโดยการ Recycle bentonite slurry จนกว่าคุณสมบัติของของเหลวค้ำจุนที่ก้นหลุมเจาะที่นำมาทดสอบ จะได้ตามรายการจึงทำการติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต (Stop end plates) ที่ปลายร่องขุด (ภาพที่ 10) จากนั้นทำการหย่อนโครงเหล็กที่ผูกเตรียมล่วงหน้าไว้แล้ว ลงในหลุมเจาะ (ภาพที่ 11) หากโครงเหล็กหนักและยาวเกินกว่าที่จะยกได้ในครั้งๆเดียวโดยไม่เกิดการบิดเบี้ยวหรือโค้งงอ ก็อาจผูกเป็น 2-3 ท่อน แล้วต่อที่ปากหลุมเจาะก็ได้ การลงเหล็กเสริมต้องจัดให้ได้ระดับและตรงตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 10 การติดตั้ง Stop end plate ที่ปลายร่องขุด



ภาพที่ 11 การหย่อนโครงเหล็กลงในหลุมเจาะ

- หลังจากลงโครงเหล็กเรียบร้อยแล้ว จึงทำการใส่ท่อเทคอนกรีตสำหรับเทคอนกรีตใต้น้ำ (Tremie concrete) แล้วเก็บตัวอย่างของเหลวค้ำจุนชนิดเบ็นโทไนท์จากก้นหลุมมาทดสอบคุณสมบัติให้ได้ตามรายการก่อนทำการเทคอนกรีต หากไม่ได้ตามข้อกำหนดต้อง Recycle เพิ่มเติมจนกว่าคุณสมบัติของของเหลวค้ำจุนจะได้ตามรายการ การใส่ท่อเทอาจใส่ท่อเดียวหรือมากกว่าก็ได้ ขึ้นอยู่กับความยาวของร่องที่ขุด โดยทั่วไปหากร่องขุดยาวเกิน 3.60 เมตร ควรจะใส่ 2 ท่อ (ภาพที่ 12) เพื่อให้คอนกรีตที่เทลงไปได้คุณภาพสม่ำเสมอ ของเหลวค้ำจุนชนิดเบ็นโทไนท์ที่ถูกแทนที่โดยคอนกรีตจะไหลล้นและถูกดูดไปทำความสะอาดโดย Desander & Desilter unit เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำอีก และในระหว่างเทคอนกรีตปลายของท่อเทคอนกรีตจะต้องฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีตไม่น้อยกว่า 1.50 เมตรตลอดเวลาแต่ไม่ควรฝังปลายท่อในคอนกรีตลึกเกินไป [3] และต้องควบคุมเวลานับหลังจากทำความสะอาดสารหลุมเจาะแล้วเสร็จจนถึงเริ่มเทคอนกรีตให้สั้นที่สุด Martin [4] แนะนำอย่าให้เกิน 5 ชั่วโมง



ภาพที่ 12 การเทคอนกรีตใต้น้ำ (Tremie concrete)

3. วิวัฒนาการของงาน Diaphragm wall ในประเทศไทย

3.1 การออกแบบและก่อสร้าง Diaphragm wall ยุคแรกช่วงปี พ.ศ. 2528 - 2540

Diaphragm wall ได้เริ่มนำมาใช้ในประเทศไทยเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2520 ในการก่อสร้างชั้นใต้ดินชั้นเดียวของอาคารสำนักงานใหญ่ ธนาคารกรุงเทพ จำกัด ถ. สีลม ประสงค์ [5] ออกแบบใช้ Diaphragm wall หนา 0.50 ม. และในปี พ.ศ. 2528 ในโครงการ International Trade Center ที่ถนนเยาวราช โดยออกแบบ Diaphragm wall หนา 0.82 ม. สำหรับงานขุดดินลึก 18.50 ม.โดยในยุคแรก หัวเจาะที่ใช้ในการก่อสร้าง Diaphragm wall จะเป็นหัวเจาะแบบ Mechanical hang grab ซึ่งควบคุมโดยสลิง (ภาพที่ 13) ขุดเจาะดินภายใต้ของเหลวค้ำจุนชนิดเบ็นโทไนท์

ในการออกแบบเสถียรภาพของ Diaphragm wall ในยุคแรกๆ มักจะออกแบบให้ปลายกำแพงฝังอยู่ที่ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) ที่ความลึกประมาณ 25-30 ม.

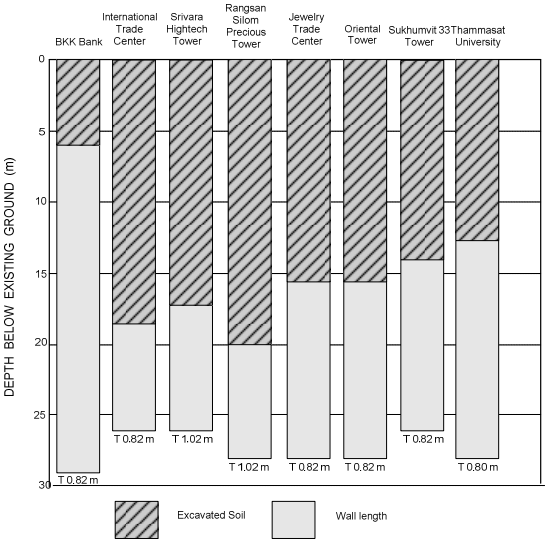
ตารางที่ 1 และภาพที่ 14 แสดงตัวอย่างขนาด Diaphragm wall ที่งานความลึกขุดใดๆในช่วงยุคแรก



ภาพที่ 13 หัวเจาะแบบ Mechanical Hang Grab

ตารางที่ 1 งานขุดดินโดยใช้ Diaphragm wall ในยุคแรก

ปี	โครงการ	ความหนา (ม.)	ระดับปลาย (ม.)	ความลึกขุด (ม.)
2520	Bangkok Bank (Silom)	0.50	-14 -33 (Barrette)	-6.00
2528	International Trade Center	0.82	-26	-18.50
2534	Srivara Hightech Tower	1.02	-26	-17.20
2535	Silom Precious Tower	1.02	-28	-20.00
2535	Jewelry Trade Center	0.82	-28	-15.60
2535	Oriental TOwer	0.82	-28	-15.50
2535	Sukhumvit 33 Tower	0.82	-26	-14.00
2537	Thammasat	0.80	-28	-12.70



ภาพที่ 14 ความลึกของ Diaphragm wall และระดับดินขุดในยุคแรก



ภาพที่ 15 หัวเจาะแบบ Hydraulic hang grab

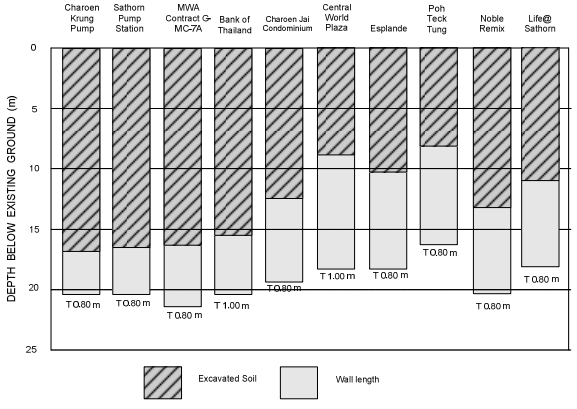
3.2 การออกแบบและก่อสร้าง Diaphragm wall ยุคปัจจุบัน ช่วงปี พ.ศ. 2540 - 2552

เครื่องมือที่ใช้การก่อสร้าง Diaphragm wall ในยุคปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยได้เริ่มนำหัวเจาะแบบ Hydraulic grab (ภาพที่ 15) มาใช้ในการขุดดินซึ่งช่วยลดเวลาการก่อสร้าง

และสามารถควบคุมความดิ่งได้ดีขึ้น สำหรับการออกแบบ Diaphragm wall ได้เริ่มมีการนำระเบียบวิธี Finite element (FEM) มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์พฤติกรรมเพื่อออกแบบ โดยปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมายที่นำเสนอพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการออกแบบ Diaphragm wall ด้วยโปรแกรม FEM ที่เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ ทำให้สามารถออกแบบ Diaphragm wall ได้ดีและประหยัดขึ้น

ตารางที่ 2 งานขุดดินโดยใช้ Diaphragm wall ในยุคปัจจุบัน

ปี	โครงการ	ความหนา (ม.)	ระดับปลาย (ม.)	ความลึกขุด (ม.)
2540	Charoen Pump Station	0.80	-20.00	-16.50
2540	Sathorn Pump Station	0.80	-20.00	-16.20
2545	MWA GMC-7A	0.80	-21.00	-16.00
2546	BOT	0.80	-20.00	-15.20
2546	Charoenjai Condominium	0.80	-12.20	-20.00
2547	Central World	1.00	-18.00	-9.00
2547	BumrungMeung Plaza	0.80	-24.00	-19.00
2548	Esplanade	0.80	-18.00	-10.00
2549	Por Teck Tung Office	0.80	-16.00	-8.00
2550	Noble Remix	0.80	-20.00	-13.00
2551	Life@Sathorn	0.80	-18.50	-10.50



ภาพที่ 16 ความลึกของ Diaphragm wall และระดับดินขุดในยุคปัจจุบัน

ในการออกแบบเสถียรภาพของ Diaphragm wall ในยุคปัจจุบัน มักจะออกแบบให้ปลายกำแพงอยู่ที่ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff to very stiff clay) ที่ความลึกประมาณ 18-25 ม. ขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นใต้ดิน ตารางที่ 2 และภาพที่ 16 แสดงตัวอย่างขนาด Diaphragm wall ที่งานความลึกขุดใดๆในช่วงยุคปัจจุบัน

4. ระบบงานขุดดินโดยใช้ Diaphragm wall เพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินลึก

วิธีการขุดดินโดยใช้ Diaphragm wall เพื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินลึกมีวิธีหลักๆ 2 แบบคือ การก่อสร้างใต้ดินแบบมีค้ำยันก่อสร้างจากล่างขึ้นบน (Bottom – up construction) และการก่อสร้างใต้ดินแบบมีค้ำยันก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top – down construction) ขั้นตอนการก่อสร้างต่างๆ มีผลต่อโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่วิเคราะห์ได้ในกำแพงกันดิน ความหนาของกำแพง ความลึกกำแพงกันดินและการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ กำแพง ลักษณะค้ำยันที่ใช้ก็มีหลายประเภทการเลือกใช้ค้ำยันจะต้องพิจารณาให้มีความเหมาะสม สามารถรับแรงได้ตามที่ออกแบบ ไม่กีดขวางการขุดดิน และมีความประหยัด

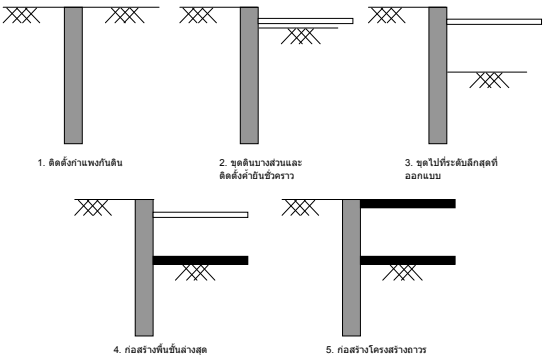
4.1 การก่อสร้างจากล่างขึ้นบน (Bottom – up construction)

วิธีนี้ทำการก่อสร้างโดยขุดดินพร้อมติดตั้งค้ำยันชั่วคราวจากระดับบนลงมาตามจำนวนค้ำยันที่ออกแบบไว้จนถึงระดับขุดสุดท้าย แล้วจึงทำการก่อสร้างพื้น รวมถึงปลดค้ำยันชั่วคราวจากระดับล่างสุดขึ้นมาจนถึงระดับบนสุดท้าย [6]

ตารางที่ 3 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน และภาพที่ 17 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างดังกล่าว

ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อจำกัดของการก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. สามารถควบคุมการเคลื่อนตัวของดินรอบบ่อขุดด้วยการออกแบบระบบค้ำยัน	1. เสียค่าใช้จ่ายระบบค้ำยันชั่วคราว
2. สามารถลดขนาดและความลึกของ Diaphragm wall เมื่อเปรียบเทียบกับกำแพงยื่น	2. ระบบค้ำยันบางรูปแบบทำให้งานขุดดินยาก
3. ขั้นตอนการขุดดินและการก่อสร้างไม่ซับซ้อน	3. ใช้เวลาการก่อสร้างมาก



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการก่อสร้างโครงสร้างจากล่างขึ้นบน

รูปแบบระบบค้ำยันสำหรับการก่อสร้างจากล่างขึ้นบนใช้ระบบค้ำยันชั่วคราวโดยสร้างขึ้นจากเหล็กรูปพรรณ ติดตั้งระหว่างกำแพงด้านหนึ่งไปยังอีกด้าน บางกรณีหากต้องการลดการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ กำแพงก็สามารถทำการอัดแรง (Pre load) ทำค้ำยันชั่วคราวในแนวนอนได้ ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่างของค้ำยันในแนวนอน



ภาพที่ 18 รูปแบบระบบค้ำยันชั่วคราวโครงการลานคนเมือง [7]

4.2 การก่อสร้างจากบนลงล่าง (Top – down construction)

วิธีการก่อสร้างแบบนี้จะใช้พื้นชั้นใต้ดินในแต่ละชั้นหรือคาน คสล. ถาวรอื่นๆ เป็นระบบค้ำยัน Diaphragm wall โดยการก่อสร้างจะเริ่มจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างพื้นชั้นบนสุดและพื้นชั้นอื่นๆ ไล่ลงมาที่ระดับต่ำกว่าจนถึงระดับสุดท้าย [8] ระบบการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกในระหว่างการก่อสร้างจะใช้เสาเหล็ก Stanchion (Prefounded steel column) (ภาพที่ 19) เป็นเสารับน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงสู่เสาเข็ม โดยเสาเหล็ก Stanchion จะทำการติดตั้งไว้ล่วงหน้าก่อนในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

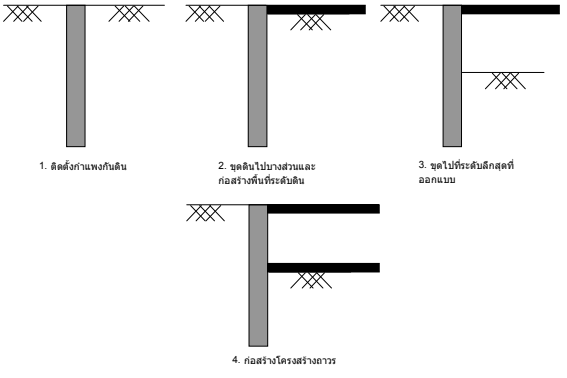


ภาพที่ 19 เสาเหล็ก Stanchion สำหรับระบบการก่อสร้างจากบนลงล่าง โครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง [8]

ตารางที่ 4 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการก่อสร้างชั้นใต้ดินด้วยระบบการก่อสร้างจากบนลงล่าง และภาพที่ 20 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างดังกล่าว

ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อจำกัดของการก่อสร้างโครงสร้างจากบนลงล่าง

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. สามารถก่อสร้างโครงสร้างเหนือดินในเวลาเดียวกัน	1. งานขุดดินทำได้ช้าและยากกว่า
2. ไม่เสียค่าใช้จ่ายสำหรับระบบค้ำยันชั่วคราว	2. เสียค่าใช้จ่ายเสาเหล็ก Stanchion
3. การเคลื่อนตัวของดินรอบบ่อขุดมีค่าน้อยกว่า	3. ต้องเตรียมช่องเปิดในพื้นสำหรับขนถ่ายดิน



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการก่อสร้างโครงสร้างจากบนลงล่าง

การก่อสร้างโครงสร้างแบบบนลงล่างใช้พื้นชั้นใต้ดินหรือคาน คสล. ถาวร (Skeleton beam) เป็นตัวค้ำยันผนัง Diaphragm wall (ภาพที่ 21 และ 22) ในระหว่างงานขุดดิน



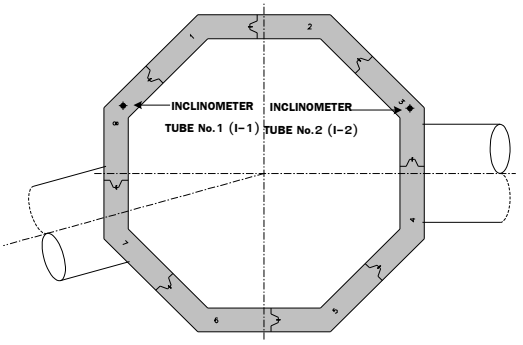
รูปที่ 21 การค้ำยันด้วยพื้นชั้นใต้ดิน โครงการโบ๊เบ๊ บำรุงเมือง [8]



รูปที่ 22 การค้ำยันด้วยคาน คสล. ถาวร (Skeleton Beam) โครงการจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลาง [9]

4.3 การก่อสร้างแบบขุดดินในพื้นที่บ่อรูปวงกลม

ในกรณีบ่อขุดเป็นรูปวงกลม การเลือกใช้ Diaphragm wall เป็นระบบกำแพงกันดินจะสามารถก่อสร้างได้โดยต้องจัดแผงกำแพงในลักษณะรูปหลายเหลี่ยมเข้าใกล้วงกลม (Polygonal Shape) ในการก่อสร้างได้แบ่งกำแพง Diaphragm wall ออกเป็นแผงๆ (ภาพที่ 23 และภาพที่ 24)โดยรอยต่อในแต่ละแผงมีลักษณะเป็น Shear key พฤติกรรมของตัวกำแพงจะต้านทานแรงดันดินสถิต (At rest earth pressure) ภายนอก ในลักษณะ Hoop compression stress ซึ่งเป็นแรงดันดินบริเวณรอบปล่องอุโมงค์ การถ่ายแรงดันดินภายนอกจะผ่านตัวกำแพงโดยรอบ ดังนั้นในการขุดดินในปล่องอุโมงค์ลักษณะนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีระบบค้ำยันภายใน กำแพงจะมีเสถียรภาพด้วยตัวเอง และไม่จำเป็นต้องฝังปลายกำแพงให้ลึกมากโดยความยาวระยะฝังของกำแพง Diaphragm wall จะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของดินก้นปล่องอุโมงค์ซึ่งต้องมีความยาวเพียงพอเพื่อมิให้เกิดสภาวะดินอูดหรือสภาวะ boiling ในชั้นดินเหนียวและทรายแล้วแต่กรณี [10]



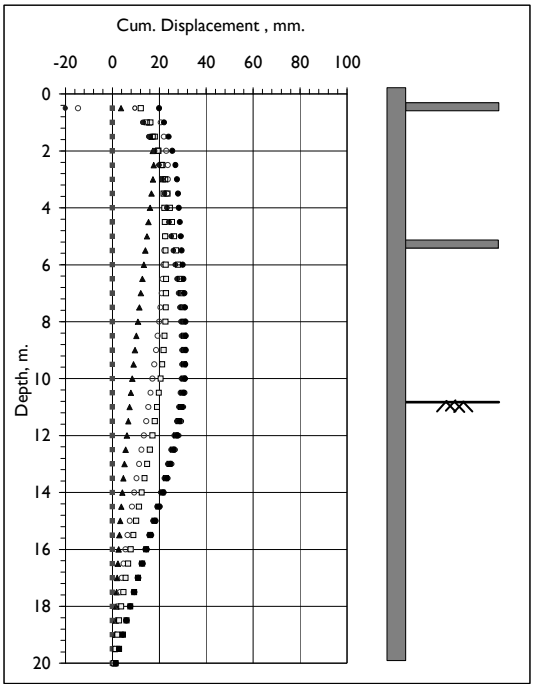
ภาพที่ 23 การแบ่งกำแพง D-wall ออกเป็นแผงๆ



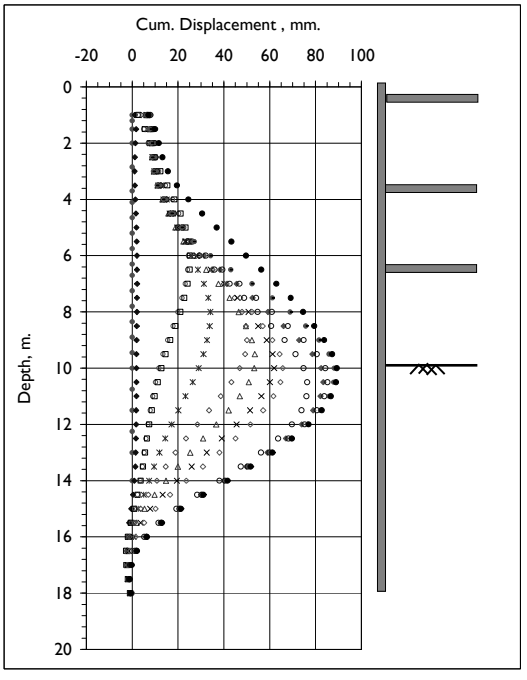
ภาพที่ 24 รูปถ่ายปล่องอุโมงค์ภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ

5. Diaphragm Wall กับการเคลื่อนตัวของดินรอบบ่อขุด

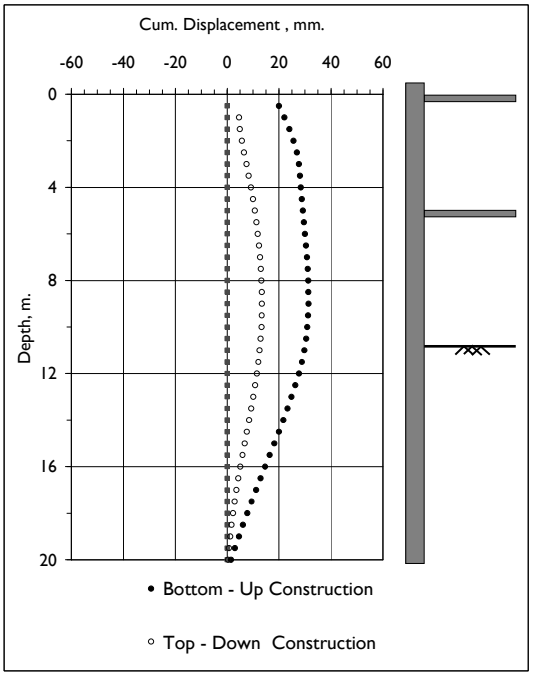
กำแพงกันดินสำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึก โดยทั่วไปมีสองประเภทใหญ่ๆ คือ กำแพงชนิดโก่งงอได้ง่าย (Flexible wall) เช่น เสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet pile wall) และ กำแพงชนิดแข็ง (Rigid wall) เช่น Diaphragm wall, Contiguous pile wall, และ Secant pile wall การจะเลือกใช้ระบบกำแพงชนิดใดต้องพิจารณาหลายๆ องค์ประกอบและความเหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปกำแพงชนิดโก่งงอได้ง่ายเหมาะสมกับงานขุดดินที่ไม่ลึกมาก เนื่องจากกำแพงประเภทนี้จะให้ค่าการเคลื่อนตัวค่อนข้างสูง แต่สำหรับงานขุดดินลึกโดยเฉพาะในเขตเมืองอาจต้องเลือกใช้ระบบกำแพงชนิดแข็งเพื่อลดค่าการเคลื่อนตัวของดินและผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง



ภาพที่ 25 ผลการอ่านค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ในงานขุดดินลึกประมาณ -10 เมตร



ภาพที่ 26 ผลการอ่านค่าการเคลื่อนตัวของ Sheet pile wall ในงานขุดดินลึกประมาณ -10 เมตร



ภาพที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดของโครงการที่ใช้ระบบการก่อสร้างแตกต่างกัน

สำหรับค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่เกิดจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดินในกรุงเทพฯ รวบรวมข้อมูลโดย Phienwej et al. [11] ได้รายงานในรูปค่าอัตราส่วนของค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกงานขุดดิน ($\delta max/H$) พบว่า $\delta max/H$ มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 2.5% สำหรับ Steel sheet pile และ $\delta max/H$ มีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.8% สำหรับ Diaphragm wall และพบว่าการเคลื่อนตัวสำหรับ Diaphragm wall จะมีค่ามากในขั้นตอนงานขุดดินเริ่มแรกก่อนติดตั้งค้ำยันในโหมดคานยื่น (Cantilever mode)

ภาพที่ 25 และ 26 แสดงตัวอย่างค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall และ Sheet pile wall ในงานขุดดินลึกประมาณ 10 เมตร ทำการก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างจากล่างขึ้นบน จะเห็นว่าการเคลื่อนตัวของ Sheet pile ซึ่งมีจำนวนค้ำยันมากกว่าจะมีแนวโน้มสูงกว่าค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall มาก

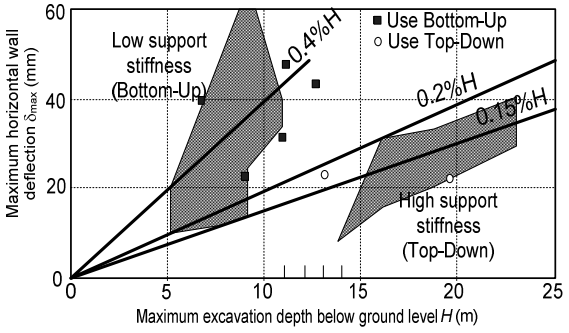
การก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่างโดยใช้กำแพงระบบ Diaphragm wall ซึ่งใช้พื้นโครงสร้างอาคารชั้นใต้ดินเป็นระบบค้ำยันถาวร จะช่วยลดค่าการเคลื่อนตัวของ Diaphragm wall ให้เกิดน้อยกว่าการก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างจากล่างขึ้นบนซึ่งใช้ระบบค้ำยันเหล็กเนื่องจากตัวพื้นอาคารที่เป็นค้ำยัน มี

ความแข็งแรงมากกว่า ภาพที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดของโครงการ ก) และโครงการ ฉ) ในตารางที่ 5 ซึ่งมีระดับขุดมากสุดประมาณ 11 เมตร โดยใช้ Diaphragm wall ขนาด 0.80 เมตร ลึก -20 เมตร และมีจำนวนค้ำยัน 2 ชั้น เท่ากันแต่ใช้วิธีการก่อสร้างแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า โครงการ ฉ) ซึ่งใช้ระบบก่อสร้างจากบนลงล่างให้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำกว่าโครงการ ก) ซึ่งก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างจากล่างขึ้นบน

ตารางที่ 5 กรณีศึกษางานขุดดินในโครงการที่ใช้ Diaphragm Wall

โครงการ	D-Wall		H	δ_{max}/H
	Thick (m)	Tip (m)	(m)	(%)
Bottom – Up Method				
ก) Millennium Sukhumvit	0.80	-20	-11.0	0.29
ข) BMA Art Museum	0.80	-16	-9.5	0.26
ค) Thammasat	0.80	-28	-12.7	0.31
ง) Sathorn Complex	0.80	-18	-14.0	0.24
จ) Belgavia	0.80	-16	-6.50	0.60
Top-Down Method			-	
ฉ) Central Hospital	0.80	-20	-11.0	0.17
ช) Bobae Bumrungmeung	0.80	-24	-19.0	0.10

จากการพล๊อตค่าต่างๆ ในตารางที่ 5 ลงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับขุดมากสุดกับค่าการเคลื่อนตัวมากสุดที่เสนอโดย St. John et al. [12] ในภาพที่ 28 พบว่าจุดพล๊อตสอดคล้องกับค่าที่เสนอ



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวมากสุดกับความลึกในการขุดดิน

6. สรุป

Diaphragm wall คือกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กขุดเจาะหล่อในดิน เป็นระบบกำแพงที่นิยมใช้สำหรับงานขุดดินลึกในบริเวณพื้นที่มีชั้นดินอ่อน โดยเฉพาะกรุงเทพฯ เนื่องจากเป็นระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid wall) สามารถออกแบบให้ต้านทานโมเมนต์ดัดได้มากและลดการเคลื่อนตัวของดินรอบกำแพงซึ่งจะลดปัญหาความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียงในระหว่างการก่อสร้างหรือไม่เกิดความเสียหายขึ้นเลย

ในปัจจุบันโครงการขนาดใหญ่ๆ ในกรุงเทพฯ ที่มีชั้นใต้ดินลึกมาก ผู้ออกแบบนิยมเลือกใช้ Diaphragm wall เป็นระบบกำแพงป้องกันดินในการขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินเพื่อลดปัญหาผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงในระหว่างการขุดดิน

โดยทั่วไป การประยุกต์ใช้ของ Diaphragm wall สามารถใช้เป็นกำแพงกันดินชั่วคราวขณะก่อสร้างห้องใต้ดิน และส่วนใหญ่จะออกแบบให้ปรับเปลี่ยนให้เป็นส่วนของโครงสร้างถาวรหลังการก่อสร้างห้องใต้ดินเสร็จแล้ว นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างกำแพงทางลอดหรือปล่องอุโมงค์ลึก (Deep Shaft) ในงานดันท่อ (Pipe Jacking) เนื่องจากเป็นกำแพงที่มีความแข็งแรง (High stiffness wall) มีความเรียบร้อยและสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Puller M. 1996. Deep Excavations; a practical manual, Thomas Telford.

[2] Williams, B.P and Waite, D. 1993. The design and construction of sheet - piled cofferdams. Construction Industry Research and Information Association (Special Publication 95), Thomas Telford Publication.

[3] ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์ 2542. สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพ, การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2542, จัดโดย วสท.

[4] Martin, W. S. 1996. Site Guide to Foundation Construction, CIRIA Special Publication 136.

[5] ประสงค์ ธาราไชย 2524. ประสบการณ์การควบคุมงานก่อสร้างไดอะแฟรมวอลล์, การสัมมนาเรื่องประสบการณ์การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, จัดโดย วสท. .

[6] ฉรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ 2549. กรณีศึกษาเทคนิคงานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินใกล้แนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน. การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11.

ประสบการณ์ในการตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะ โดย โซนิก อินเทก'กริที เทสติ้ง

EXPERIENCE ON THE SONIC INTEGRITY TESTING IN BORED PILING PRACTICE

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ [1], ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์ [2] และจรุง หิรัญอ่อน[3]

[1] กรรมการผู้จัดการ, [2] ผู้อำนวยการโครงการ, [3] วิศวกรโยธา
บริษัท ซีฟโก้ จำกัด กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ: การตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะทางอ้อมโดยวิธี โซนิก อินเทก'กริที เทสท์ (Sonic Integrity Test) หรือที่รู้จักกันในชื่ออื่นว่า Seismic Test หรือ Echo Test นั้น ได้รับความนิยมทั่วโลก เพราะสามารถตรวจได้รวดเร็วและราคาไม่แพง แต่มีข้อจำกัดที่ต้องดำเนินการโดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญที่รอบรู้ทั้งงานเสาเข็มและชั้นดินจึงจะวิเคราะห์และแปลคลื่นสัญญาณออกมาได้ถูกต้องน่าเชื่อถือ ซึ่งในหลายประเทศได้ป้องกันความผิดพลาดโดยการจัดทำข้อกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบและการวิเคราะห์ไว้ ซึ่งแตกต่างจากประเทศไทยที่มีการใช้เสาเข็มเจาะกันมากประเทศหนึ่งในโลก แต่ยังไม่มีสถาบันทางวิศวกรรมกำหนดหรือควบคุมการตรวจสอบ ให้การรับรองหรือกำหนดคุณสมบัติของผู้ตรวจและวิเคราะห์การตรวจสอบโดยวิธีนี้ไว้ ทำให้ผู้ประกอบการที่มีประสบการณ์ไม่เพียงพอเสนอตัวเข้ามาทำการตรวจสอบ และพบว่ารายงานสรุปการตรวจสอบในหลายกรณีโดยผู้มีประสบการณ์ไม่พอเพียงให้ผลไม่สอดคล้องกับสภาพจริง (Features) ของตัวเสาเข็ม บทความนี้จึงได้รวบรวมข้อแนะนำ วิธีการวิเคราะห์และการแปลสัญญาณจากแหล่งต่างๆ ตลอดจนจากประสบการณ์บางส่วนของผู้เขียนเอง เพื่อให้ผู้ที่อาจเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบโดยวิธีนี้นำไปใช้พิจารณาประกอบการวิเคราะห์และสรุปผลตามควรแก่กรณี

Abstract: Indirect testing of integrity of bored piles by Sonic Integrity Testing (SIT) also known as Seismic Test or Echo Test. has been widely used around the world as a method of testing is quick and economy. But reliable evaluation and interpretation of the testing results must be carried out by specialist engineers who have a good practice both in piling construction and subsoil properties. Manny countries, have set up the practical guidelines for testing and evaluation of trace signals to be followed. In Thailand where bored piles are commonly used, but no engineering organization has established the guideline in certifying and controlling the professional interpretators. As a result, some conclusions which were interpreted by inexperience testing firm were found not correspond to the real feature of the piles. This paper presents the method of evaluation and interpretation on trace signals collected from various references and from authors own experiences. The parties involved may take these methods into consideration on their testing and interpretation works as appropriate.

KEYWORDS: Low Strain Sonic Integrity Test, Seismic Test and Impedance

---

For further details, contact *Mr. Narong Thasnanipan, Seafco Co., Ltd. 26/10 Rarm Intra 109, Bangchan, Klongsamwah, Bangkok 10510,Thailand.*

1.บทนำ

การตรวจความสมบูรณ์ (Integrity) ของเสาเข็มเจาะโดยวิธี Low-Strain Sonic Integrity Testing (LST) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจทางอ้อม (Indirect Testing) ได้รับความนิยมแพร่หลายระบบหนึ่งเนื่องจากตรวจได้รวดเร็วและราคาประหยัด แต่การวิเคราะห์ผลต้องอาศัยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ทั้งเรื่องเสาเข็มและสภาวะของชั้นดินที่อาจมีอิทธิพลต่อคลื่นสัญญาณสะท้อนกลับที่ตรวจจับได้โดย Sensor ที่หัวเสาเข็ม ซึ่งอาจมีสาเหตุทั้งที่เกิดจากสภาพโครงสร้างของเสาเข็มเอง (Structural Conditions) หรือจากสภาพชั้นดิน (Geotechnical Conditions) รอบเสาเข็มอยู่ก็ได้ หากการวิเคราะห์กระทำอย่างง่ายๆโดยผู้ที่มีความรู้หรือประสบการณ์ที่จำกัดแล้ว การแปลสัญญาณอาจผิดพลาดไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เนื่องจากเสาเข็มเจาะมีราคาต้นละหลายหมื่นถึงหลายแสนบาท ผู้เกี่ยวข้องจึงควรพิจารณาอย่างรอบคอบในการว่าจ้างผู้ตรวจสอบโดยไม่ควรพิจารณาเฉพาะราคาเท่านั้น.ในหลายประเทศมีการป้องกันโดยกำหนดมาตรฐานการทดสอบไว้ เช่นออสเตรเลีย มี AS 2159-1995 Section 8.5[3], อเมริกา มี ASTM D 5882[1], จีน มี JGJ/T93-95 [4], ฝรั่งเศสมี Norme Francaise NFP94-160-2[7], สหราชอาณาจักรมี ICE Specification for Piling [5], เยอรมัน มี German Society for Geotechiques E.V. Dynamic Pile Integrity Tests-Draft[6] เป็นต้น บทความนี้จึงรวบรวมข้อแนะนำจากแหล่งต่างๆร่วมกับประสบการณ์ของผู้เขียนที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบเสาเข็มโดยวิธีนี้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 โดยจะกล่าวถึงตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อคลื่นสัญญาณที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมในการสรุปผลการตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงของตัวเสาเข็ม

2. คำจำกัดความต่างๆที่เกี่ยวกับ Sonic Integrity test

Pile Integrity; คือการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพของรูปร่างเสาเข็ม, ความต่อเนื่องของตัวเสาเข็มและคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้หล่อตัวเสาเข็ม โดยใช้คลื่นสั่นสะเทือน (Stress Wave) วิ่งผ่านคอนกรีตสู่ด้านล่างและจับคลื่นที่สะท้อนกลับมาที่หัวเสาเข็มโดยอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ที่ติดตั้งไว้ที่หัวเสาเข็ม การสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณที่จับได้อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินได้เช่นกัน

Impedance,(z); คือพฤติกรรมการตอบสนองของเสาเข็มต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นสั่นสะเทือน (Stress Wave) ที่เกิดจากการกระตุ้นทางกลให้กระจายผ่านในวัสดุเสาเข็มเป็นสำคัญ หากคุณสมบัติของวัสดุเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแด๊นจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย และจะมีผลต่อการกระจายหรือการสะท้อนกลับของคลื่นในเสาเข็ม เสาเข็มที่หน้าตัดและคุณสมบัติของคอนกรีตสม่ำเสมอตลอดทั้งต้นจะมีค่าอิมพีแด๊นที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่า Impedance, (z) สำหรับ Low Strain Integrity Test จะหาได้ตามสมการที่ (1)

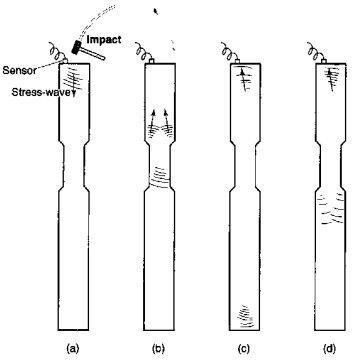
$$z = \rho .c. A \qquad (1)$$

(ρ = pile material density , c = propagation velocity of the wave, A = cross - sectional of the pile)

Pile Defects; หมายถึงเสาเข็มที่ก่อสร้างแล้วมีโครงสร้างไม่เป็นตามที่กำหนดไว้ หากเกิดขึ้นอย่างเด่นชัด (Major Defect) แล้วอาจกระทบต่อการรับน้ำหนักทั้งระยะสั้นและยาวได้ ในเสาเข็มเจาะอาจยอมให้มีความไม่สมบูรณ์ส่วนน้อย (Minor Defect) เกิดได้โดยจะไม่มีผลกระทบต่อความมั่นคงในการรับน้ำหนักที่ออกแบบไว้ Turner, [10]

3.หลักการในการตรวจสอบ

การทดสอบกระทำโดยใช้ฆ้อนขนาดเล็กเคาะคอนกรีตที่หัวเสาเข็มและจับคลื่นสะท้อนกลับโดย Sensor ที่หัวเสาเข็ม ตามรูปที่ 1 แรงจากค้อนขนาดเล็กที่เคาะจะก่อให้เกิดคลื่นสั่นสะเทือน (Compressive shock wave) เคลื่อนลงสู่ปลายด้านล่างและสะท้อนกลับขึ้นสู่หัวเสาเข็มทั้งหมดหรือแต่เพียงบางส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า Impedance ว่าเกิดมีการเปลี่ยนแปลงที่ปลายเสาเข็มหรือจากตำแหน่งใดๆในตัวเสาเข็มหรือไม่ หรือจากสภาพของตัวเสาเข็มเอง การที่คลื่น Stress wave เคลื่อนที่ผ่านไปตามวัสดุตัวตัวเสาเข็มด้วยอัตราความเร็ว c, ใช้เวลาเท่ากับ t (คิดจากเวลาที่เริ่มเคาะถึงเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับถึงหัวเสาเข็ม) ทำให้สามารถหาระยะทางที่คลื่น Stress wave เดินทางได้จากสมการ $t = 2L/c$ หรือ $L = c.t/2$ โดย L คือระยะทางจากหัวเสาเข็มถึงระดับที่คลื่นสะท้อนกลับ ถ้าประเมินค่า c ได้ใกล้เคียงและบันทึกเวลา t ไว้ได้ถูกต้องก็จะคำนวณหาความยาวของเสาเข็มหรือระดับที่คลื่นสะท้อนกลับได้ ซึ่งสามารถนำไปเทียบกับข้อมูลที่ก่อสร้างไว้ หากการเปรียบเทียบได้ความยาวตรงกันจะทำให้หาระดับที่คลื่นสะท้อนกลับที่จุดใดๆได้ถูกต้องด้วย แต่หากการเปรียบเทียบขัดแย้งกันมากจะต้องทำการตรวจสอบหาสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อแตกต่างนี้ โดยอาจจะเป็นผลกระทบจากสภาพของเสาเข็ม (Feature) หรือจากเรื่องอื่นๆ เช่นสภาวะชั้นดิน เป็นต้นก็ได้



Principle of time-based low strain integrity test (a) initial impact on pile; (b) partial reflection and partial transmission at change of section; (c) arrival of reflection from change of section at sensor; (d) arrival of reflection from pile toe at sensor

รูปที่ 1 หลักการทดสอบ (after Turner,1997)

4. การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณในตัวเสาเข็ม

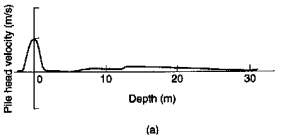
Low Strain Sonic Integrity Test (LST) คือการตรวจสอบที่ใช้การวิเคราะห์คลื่นสะท้อนกลับขึ้นสู่หัวเสาเข็มเป็นหลัก โดยทั่วไปคลื่นจะสะท้อนกลับจากระดับที่เกิดมีการเปลี่ยนแปลงเช่น คุณสมบัติของวัสดุ ขนาดของหน้าตัด หรือจากระบบการยึดเกาะกันของเสาเข็มกับดินโดยรอบ (Pile-Soil System) เสาเข็มแม้จะฝังในชั้นดินที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอเป็นชนิดเดียวกัน (Uniform Homogeneous Soils) แต่การเดินทางของคลื่นลงสู่เบื้องล่างก็ยังมีปัจจัยหรืออิทธิพลเกี่ยวข้องได้อีก คือ (ก) คุณสมบัติของวัสดุเสาเข็มเอง (ข) ความอ่อนหรือแข็ง (Stiffness) ของชั้นดิน (ค) ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงภายนอกหรือคุณสมบัติภายในของเสาเข็มเป็นต้น เสาเข็มที่มีอิมพีแด๊นสม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลงแต่ถ้ามีความยาวมากๆ แล้วคลื่นสัญญานมักไม่มีการสะท้อนกลับมาที่หัวเสาเข็มแต่จะซึมซับหายเข้าไปในชั้นดิน ส่วนเสาเข็มที่ฝังในชั้นดินที่มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ (None Homogeneous Soils) นั้น อิทธิพลของชั้นดินจะมีผลต่อ Stress wave ได้ เช่น ชั้นดินเปลี่ยนจากดินเหนียวอ่อนเป็นดินเหนียวแข็งจะทำให้คลื่นเกิดสะท้อนกลับแต่เพียงบางส่วนหรือทั้งหมดในลักษณะคล้ายกับอิมพีแด๊นของเสาเข็มเกิดการเปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแด๊นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทั้งของเสาเข็มและของชั้นดิน ดังนั้นแม้ว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแด๊น แต่ก็ยังสรุปโดยทันทีไม่ได้ว่าการแปลี่ยนแปลงนั้นมีสาเหตุตายตัวมาจากข้อหนึ่งหัวข้อใด เช่น ก)ขนาดเสาเข็ม, ข) คุณภาพวัสดุเสาเข็ม หรือ ค) เปลี่ยนแปลงของชั้นดิน แต่ต้องนำข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องทั้งหมดมาพิจารณาประกอบอย่างละเอียดก่อนทำการตัดสินใจสรุป

5.การแยกหมวดหมู่ของคลื่นสัญญาณทดสอบที่ตรวจจับได้

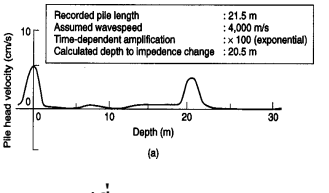
เนื่องจากอิมพีแด๊นอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นได้จากสาเหตุหลายประการ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์และแปลความหมายทำได้ง่ายและถูกต้องมากขึ้น Turner, [10] จึงได้เสนอการจัดหมวดหมู่ของคลื่นสัญญาณสะท้อนกลับที่ตรวจจับได้ที่หัวเสาเข็มไว้เป็น 3 ประเภทคือ

5.1 Type 0 signal: เป็นคลื่นสัญญาณที่ไม่สามารถตรวจจับคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากปลายเสาเข็มได้ เนื่องจากคลื่นสัญญาณถูกซึมซับ (Damping Effect) โดยชั้นดินรอบๆเสาเข็มจนเจือจางมากทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากอุปกรณ์ตรวจจับ ดังนั้นคลื่นสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้จะบอกเป็นนัยว่าในระดับความลึกประสิทธิผลที่คลื่นสามารถผ่านลงไปได้นั้นไม่ปรากฏว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแด๊นของตัวเสาเข็มมากพอที่จะสามารถตรวจจับได้จากการทดสอบแสดงว่าเสาเข็มไม่มีปัญหา และคลื่นสัญญาณชนิดนี้ตาม รูปที่ 2

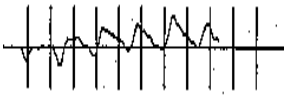


รูปที่ 2 Type 0 Signal
(after Turner, 1997)

5.2 Type 1 Signal: แสดงคลื่นสัญญาณสะท้อนกลับให้เห็นอย่างชัดเจนหนึ่งตำแหน่ง แสดงว่าเสาเข็มต้นที่ทดสอบนี้ค่าอิมพีแด๊นมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนอยู่หนึ่งตำแหน่งซึ่งอาจเป็นที่ตำแหน่งปลายเสาเข็มหรือที่ระดับความลึกอื่นในตัวเสาเข็มแล้วแต่กรณีโดยไม่ปรากฏว่ามีคลื่นสะท้อนอื่น ๆ ที่สำคัญให้เห็นในสัญญาณทดสอบอีก (คลื่นสะท้อนอื่น ๆ ที่สำคัญหมายถึงคลื่นสะท้อนที่มีระดับความเข้มประมาณ50%ของคลื่นสะท้อนจากปลายเสาเข็ม) สัญญาณ Type 1 Signal ตามรูปที่ 3 นี้ คล้ายกับสัญญาณปกติตามทฤษฎีและสามารถเข้าใจได้ไม่ยาก ในกรณีที่อิมพีแด๊นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากหรือคอนกรีตตัวเสาเข็มขาดความต่อเนื่องคลื่นสัญญาณจะเกิดการสะท้อนกลับซ้ำที่ตำแหน่งเดิม โดยจะแสดงให้เห็นจากคลื่นสัญญาณสะท้อนซ้ำๆ เกิดขึ้นเป็นระยะทางเท่าๆ กันตามรูปที่ 4 แสดงว่าเสาเข็มเกิดปัญหา

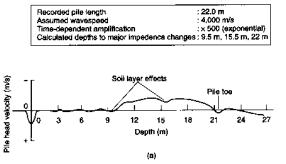


รูปที่ 3 Type 1 Signal
(after Turner,1997)



รูปที่ 4 คลื่นสะท้อนกลับซ้ำๆ

5.3 Type 2 Signal: เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยคลื่นสะท้อนกลับที่สำคัญมากกว่าหนึ่งตำแหน่งและมีการทับซ้อนกันของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากตำแหน่งที่ต่างกันในตัวเสาเข็มจนทำให้การแปลความหมายคลื่นสัญญาณเป็นไปด้วยความยุ่งยากมากกว่า Type 0 และ Type 1 การแปลคลื่นสัญญานแบบนี้จะยุ่งยากคือการที่สามารถเห็นคลื่นสัญญาณที่สะท้อนกลับจากตำแหน่งปลายเสาเข็มตามความยาวที่คาดหมายไว้ได้อย่างชัดเจนและยังมีคลื่นสะท้อนกลับจากตำแหน่งอื่นในเสาเข็มที่อิมพีแด๊นเกิดมีการเปลี่ยนแปลงมาให้เห็นด้วย ตามรูปที่ 5 ในบางกรณี คลื่นสัญญาณ Type 2 นี้อาจมีคลื่นสะท้อนหลายตำแหน่งแต่คลื่นดังกล่าวไม่แสดงความชัดเจนใดๆ ให้เห็นเลยก็ได้ คลื่นสัญญาณในลักษณะ Type 2 นี้จะมีสารพัดรูปแบบจนการอธิบายคลื่นสัญญาณจะกระทำแบบปกติโดยผู้ไม่ชำนาญไม่ได้ Turner [10]ได้แสดงความเห็นไว้ว่าคลื่นสะท้อนกลับจากปลายเสาเข็มในคลื่นสัญญาณแบบ Type 2 นี้ จะสามารถจำแนกออกได้จากประสบการณ์และวิจารณญาณของวิศวกรผู้ตรวจสอบที่เชี่ยวชาญเท่านั้นในขณะที่



รูปที่ 5 Type 2 Signal
(after Turner, 1997)

Amir, [2] กล่าวว่าให้ระวังผู้เชี่ยวชาญการวิเคราะห์ประเภทใช้วาทะศิลป (Artistical Approach) ใช้วิธีการแบบหมอดูลายมือ (Palm Readers) คือจะดูแต่รูปสัญญาณโดยไม่สนใจข้อมูลอื่นพิจารณาประกอบ ซึ่งผู้เชี่ยวชาญกลุ่มนี้จะชอบคลื่นสัญญาณที่ดูยุ่งยากมากเนื่องจากจะแปลอย่างไรก็ได้ (the more ambiguous the reflectogram ,the better.) และ Sliwinski and Fleming,[5] ก็ได้กล่าวไว้ว่าว่างานตรวจสอบโดยวิธีนี้เป็นงานของผู้ที่มีประสบการณ์เท่านั้นไม่ใช่งานที่เหมาะสมสำหรับมือสมัครเล่น(Experience and skill are necessary in the execution and interpretation of all such tests and that it is not a suitable activity for unskilled amateurs.)

6. ขั้นตอนการวิเคราะห์และแปลความหมายของคลื่นสัญญาณ

การจะวิเคราะห์และแปลความหมายคลื่นสัญญาณที่ตรวจจับได้ที่หัวเสาเข็ม (Reflectogram) ให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือและมีความถูกต้องนั้น โดยทั่วไปจะต้องดำเนินการเป็นสองขั้นตอนคือ

-ในขั้นแรกให้คำนวนหาระดับความลึกที่อิมพีแด๊นมีการเปลี่ยนแปลงจากคลื่นสัญญาณ โดยควรวิเคราะห์รูปแบบที่เปลี่ยนแปลงให้เห็นถึงรูปลักษณ์ของเสาเข็ม เช่น เป็นการเพิ่มหรือลดอิมพีแด็นของตัวเสาเข็มเองใช่หรือไม่ (หากใช่ก็แสดงเป็นนัยว่าเป็น Structural Impedance Change) ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาจากคลื่นสัญญาณทดสอบ (Acoustic Interpretation) อย่างเดียวก่อน

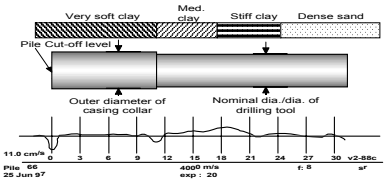
-ขั้นตอนที่สองเป็นการแยกแปลความหมายของรูปลักษณะหรือสภาพของเสาเข็ม (Features) แต่ละรูปแบบจากข้อมูลของการก่อสร้างเสาเข็ม ซึ่งต้องพิจารณาข้อมูลต่างๆทุกชนิดที่เกี่ยวข้องประกอบ เช่นชั้นดินในหน่วยงาน, ระเบียนการก่อสร้างเสาเข็มโดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องของระบบเสาเข็ม (เจาะแห้งหรือเจาะเปียก, ความยาวปลอกเหล็กชั่วคราว, ปริมาณคอนกรีตที่ใช้และปัญหาในระหว่างการก่อสร้าง เป็นต้น)

หลังจากนั้นจึงตั้งสมมุติฐานตามลักษณะคลื่นสัญญาณว่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแด๊นเกิดจากอะไร, มาจากสาเหตุเดี่ยวหรือจากหลายๆสาเหตุรวมกัน การแปลความหมายสองส่วนข้างต้นจะสามารถเห็นความแตกต่างระหว่างการรู้อะไรจากผลการวิเคราะห์ และอะไรคือการสรุปที่ต้องใช้ข้อมูลมากกว่าที่คลื่นสัญญาณทดสอบจะให้ได้ ซึ่งรวมถึงการใช้ขอบเขตวิจารณญาณและประสบการณ์ของผู้แปลสัญญาณด้วย และต้องพึงระลึกเสมอว่าการตรวจสอบด้วยวิธี Low Strain Sonic Integrity Test นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สภาพของเสาเข็ม (Pile Features) ไม่ใช่เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือหรือของวิศวกรผู้เชี่ยวชาญว่าดีจริงหรือไม่ ดังนั้นผู้เกี่ยวข้องจึงต้องให้ข้อมูลแก่วิศวกรผู้เชี่ยวชาญให้มากที่สุดเท่าที่มีอยู่ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ทำได้ถูกต้องมากที่สุด

7. การแปลสัญญาณโดยใช้ Beta Method

ได้มีผู้ตรวจสอบบางรายนำ Beta - method (β) ที่ใช้ในงานทดสอบ Dynamic Load Test ที่แนะนำโดย Rausche and Goble [8] มาใช้ในการตรวจสอบโดย LST ซึ่งไม่น่าจะถูกต้องเพราะLST ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงจากค้อนขนาดเล็กที่หัวเสาเข็ม และเครื่องมือไม่สามารถแยกแยะเองได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแด๊นเกิดจากโครงสร้างเปลี่ยนแปลง (Structural Change), ชั้นดินเปลี่ยนแปลง (Geotechnical Change) หรือจากวิธีการก่อสร้าง (Construction Method) กันแน่เปรียบเช่นการ X-Ray หรือ Ultra Sound ในทางการแพทย์ที่เครื่องระบุไม่ได้ว่าคนไข้เป็นอะไรต้องให้แพทย์ผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ฟิล์มร่วมกับประวัติคนไข้ฉันใด การตรวจเสาเข็มวิศวกรผู้เชี่ยวชาญก็ต้องวิเคราะห์คลื่นสัญญาณร่วมกับข้อมูลอื่นของเสาเข็มฉันนั้น โดยธรรมชาติของเสาเข็มเจาะในชั้นดินอ่อน

กรุงเทพฯ 15 เมตรบนต้องใช้ปลอกเหล็กชั่วคราวจนทำให้เสาเข็มส่วนบนมีขนาดใหญ่กว่าปกติเสมอ (รูปที่ 6) หากตรวจโดยระบบ β อาจคิดว่าเสาเข็มมีปัญหาแต่แท้จริงแล้วเสาเข็มมีสภาพสมบูรณ์ตามธรรมชาติของงานเพียงแต่ช่วง 15 เมตรบนมีขนาดใหญ่กว่าแบบซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 7 ที่ถ่ายจากงานขุดห้องใต้ดิน 4 ชั้นทำให้มองเห็นหัวเสาเข็มที่อยู่สูงกว่าปลายปลอกเหล็กชั่วคราวเล็กน้อยว่ามีขนาดใหญ่กว่าเสาเข็มที่ระดับต่ำกว่าปลายปลอกเหล็ก



รูปที่ 6 รูปร่างลักษณะโดยทั่วไปของเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯและภาพสัญญาณการตรวจสอบความสมบูรณ์ (after Thasnanipan et al, 2000)



รูปที่ 7 เสาเข็มช่วงบนใหญ่กว่าส่วนที่ต่ำกว่าปลอกเหล็ก

8. บทสรุป

การตรวจสอบความสมบูรณ์เสาเข็มเจาะโดยวิธี โซนิกอินเทก'กรีที เทสติ้ง เป็นวิธีที่เหมาะสม, ทำได้รวดเร็วและราคาประหยัด แต่ต้องทำการวิเคราะห์และแปลคลื่นสัญญาณโดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญผู้ที่รู้เรื่องงานเสาเข็มเจาะและชั้นดินด้วยเท่านั้นจึงจะแปลได้ถูกต้อง การแปลโดยระบบ "เบต้า" ต้องใช้อย่างระมัดระวัง เพราะเครื่องอาจแปลความหมายผิดพลาดไม่สอดคล้องกับสภาพจริงของตัวเสาเข็มได้ง่าย สถาบันทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องควรยกระดับคุณภาพการตรวจสอบโดยจัดทำมาตรฐานการตรวจสอบให้เท่าเทียมกับนานาประเทศออกมาสำหรับเป็นคู่มือใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

1. ASTM D5882-96 Standard Test Method of Low Strain Integrity Testing of Piles. American Society for Testing and Materials., 1916 Race Street., Philadelphia, PA 19103
2. Amir, J. M., A Buyer Guide to Pile Integrity Testing., DFI 24th Annual Member's Conference., Decades of Technology Advancing into the Future. Michigan. Pp.213-223, 1999.
3. Australian Standard AS2159-1995 Piling Design and Installation. Published by Standard Association of Auatralia.,1 the Crescent, Homebussh, NSW 2140, ISBN 0 7262 9884 0.
4. JGJ/T93-95 Specification for Low Strain Dynamic Testing of Piles.The Ministry of Building and Construction of the People s Republic of China.& The Ministry of Geology and Mineral of the PRC.
5. Institution of Civil Engineers. Specification for Piling and Embedded Retaining Walls. Thomas Telford. London 1996
6. German Society for Geotechniques E.V. Dynamic Pile Integrity Tests. Draft of September 1997.
7. Norme Francaise NFP94-160-2 Sols:reconnaissance et assals, Auscultation d un element de foundation; Partie 2 Methode par reflexion. L association francaise de normalisation (afnor) Tour europe cedex 792049, Paris la defense, November 1993.
8. Rausche, F. and Goble, G.G., Determination of Pile Damage by Top Measurements. Behavior of Deep Foundations, American Society for Testing and Material, 1979 ASTM STP-670, pp 500-506.
9. Thasnanipan, N., Muang, A. W., Navaneethan, T. and Aye, Z. Z., None- Destructive Testing on piles Founded in Bangkok Subsoil. Proc. of the 6th Intl. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to piles. Quality Assurance on Land and Offshore Piling. Säu Paulo/Brazil. Pp. 171-177, 2000.
10. Turner, M. J., Integrity Testing in Piling Practice. Construction Industry Research and Information Association.(CIRIA Report 144) , 1997.

การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะลึกมากก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพ โดยวิธี Sonic Logging และการแปลคลื่นสัญญาณ

Integrity Tests on Deep Bored Piles Constructed in Bangkok Subsoil by Sonic Logging Method & Signals Interpretation

ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, จรุง หิรัญอ่อน, และ สมบูรณ์ พิมสาร

บริษัท ซีฟโก้ จำกัด

61/141 ถนนพระราม 9 ห้วยขวาง กรุงเทพ 10320

โทร 6439561─72, 2472290-4, โทรสาร 2462177

Home page: www.seafco.co.th

E-mail: seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ

Sonic Logging Test เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะ (Bored Pile) กำแพงกันดิน (Diaphragm Wall) ,เสาเข็มเหลี่ยม (Barrette Pile) รวมทั้ง Caissons ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สำหรับในประเทศไทย Sonic Logging Test ได้ถูกนำมาใช้ตรวจสอบในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น สะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาหลายแห่ง , ทางด่วนยกระดับ และการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้า ใต้ดิน ฯลฯ

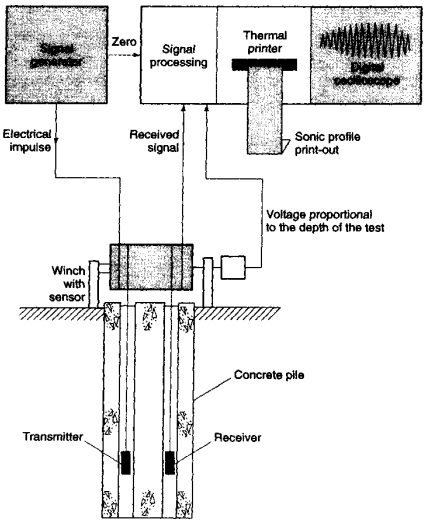
บทความฉบับนี้จะรายงานผลการทดสอบที่แสดงถึงความผิดปกติ (Anomalies) ของคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบกับเข็มตัวอย่างจำลอง (Model Piles) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซม. ความยาว 1.0 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 9 ตัวอย่าง โดยนำคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับสภาพความสมบูรณ์ของเข็มตัวอย่างจำลองที่จัดเตรียมไว้ก่อน เพื่ออาจนำผลการเปรียบเทียบนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการแปล (Interpretation) คลื่นสัญญาณจากการทดสอบจริงในงานสนามได้ นอกจากนี้ในรายงานนี้ได้นำตัวอย่างคลื่นสัญญาณที่ได้จากการทดสอบของเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 เมตร โครงการหนึ่งมาประกอบเป็นกรณีศึกษาด้วย

ABSTRACT

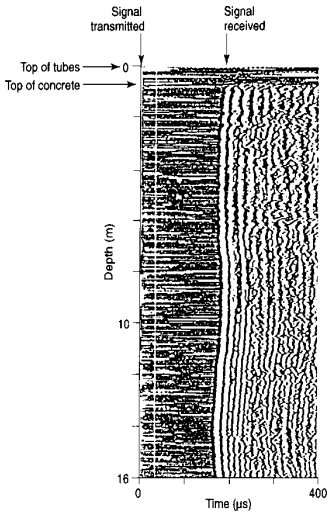
Sonic logging test is one of the testing methods to check the integrity of pile foundations such as cast in-itu bored piles, diaphragm walls, barrettes and caissons. Sonic logging test has been used in Thailand in many projects ; bridges crossing the Chao Phraya river, expressways, subway stations, etc. This paper presents discussion on test results with anomalies shown by test signals obtained from 9 tested model piles ; diameter 80 cm. and 1.0 m in length. The interpretation on the test signals and the actual integrity of piles were compared. The findings from the model pile tests may be used as interpretation guides for the field tests. Samples of test signals tested on bored piles of diameter 120 cm. from one of the major infrastructure projects are also presented

1. บทนำ (Introduction)

Sonic Logging Test เป็นวิธีการตรวจสอบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นกับตัวเข็ม ซึ่งมีหลักการสำคัญคือ การวัดระยะเวลา (Transit Time or Travelling Time) ที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น Sonic/Ultrasonic ระหว่างท่อ 2 ท่อ ซึ่งถูกติดตั้งลงไปในขั้นตอนของการลงเหล็กก่อนเทคอนกรีต โดยลูกตุ้ม (Piezo-Electric Probe) ทั้งสองอัน อันหนึ่งคือตัวส่งสัญญาณ (Transmitter or Emitter) อีกอันหนึ่งคือตัวรับสัญญาณ (Receiver) จะถูกหย่อนลงไปในท่อที่มีน้ำอยู่เต็มสำหรับเป็นสื่อกลางในการส่งผ่านสัญญาณ ดังแสดงในแผนภาพ Schematic (รูปที่ 1) ในขณะที่ Probes ทั้งสองถูกดึงขึ้นมาพร้อม ๆ กัน สัญญาณคลื่น Sonic/Ultrasonic ที่ส่งจาก Probe ตัวส่งสัญญาณผ่านคอนกรีตไปยังตัวรับสัญญาณที่อยู่อีกท่อหนึ่ง จะถูกเปลี่ยนให้เป็น Density Log ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นแนวเส้นขาว-ดำ โดยเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่นขณะที่ดึง Probe ขึ้นในแต่ละระดับความลึกจะถูกบันทึกบนแกน X ส่วนระดับความลึกจะถูกบันทึกบนแกน Y ดังรูปที่ 2

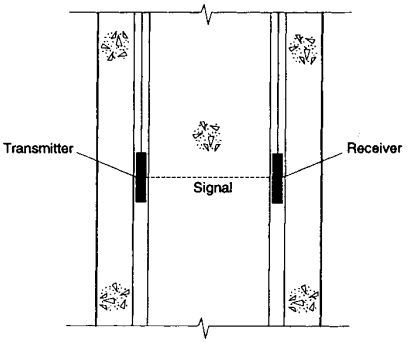


รูปที่ 1 Elements of sonic logging system
(after Strain and Williams,1991)

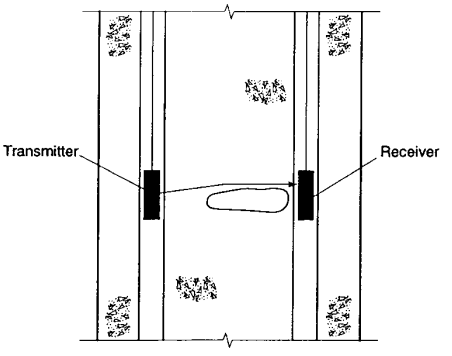


รูปที่ 2 Typical Sonic profile from sonic logging

จาก Sonic Logging Profile จะแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ (homogenous concrete) ตลอดทั้งต้น สัญญาณที่ได้จากการทดสอบ Sonic Logging Test จะไม่แสดงความผิดปกติใด ๆ (no anomalies) เพราะคลื่น sonic จะเดินทางเป็นเส้นตรงทำให้ความเร็วที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่นคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนคอนกรีตที่เป็นรูพรุนหรือมีกำลังต่ำ ความเร็วคลื่น sonic จะลดลง และคอนกรีตที่มีสิ่งเจือปน เช่น ก้อนดิน สารละลายเบนโทไนท์ คลื่น sonic จะเดินทางเบี่ยงรอบสิ่งเจือปนนั้น ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทั้ง 2 กรณีทำให้เวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวส่งถึงตัวรับเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้สัญญาณของ Sonic Profile จางลง ลักษณะของแนวคลื่นจะผิดปกติไปไม่ต่อเนื่อง โดยส่วนที่จางหรือผิดปกติไปจะเป็นส่วนสำคัญสำหรับช่วยในการวิเคราะห์ผลต่อไป



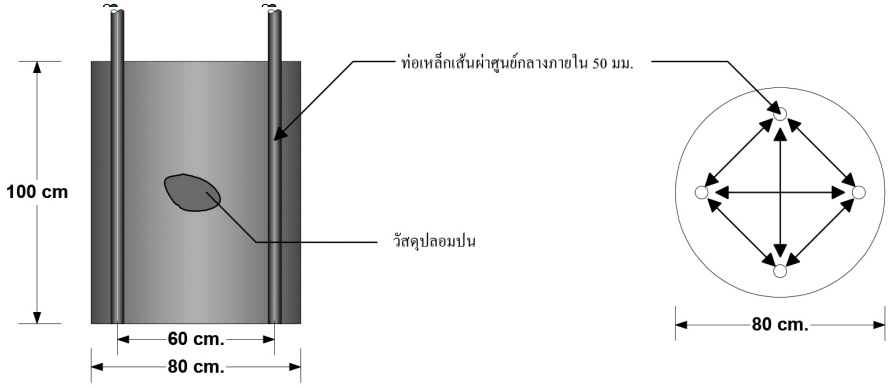
รูปที่ 3 Typical horizontal positioning of probes



รูปที่ 4 Possible diversion of signal

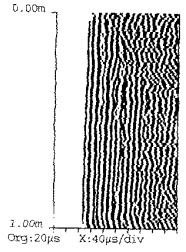
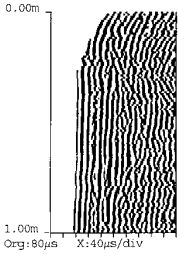
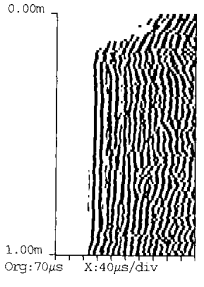
2. การทดสอบเข็มตัวอย่างจำลอง (Model Tests)

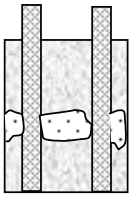
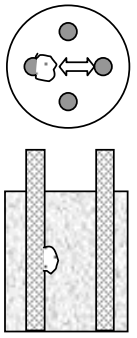
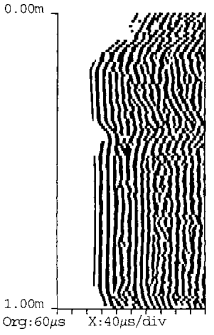
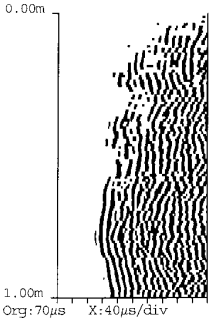
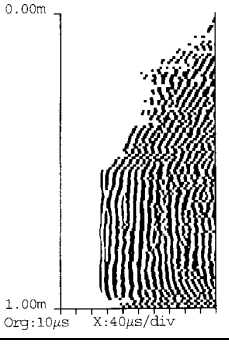
เข็มตัวอย่างจำลองที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซม. ความยาว 100 ซม. ก่อนการเทคอนกรีตจะทำการติดตั้งท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 50 มม. เอาไว้ โดยมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 60 ซม. ดังรูปที่ 5 ในเข็มตัวอย่างจำลองแต่ละต้นจะมีการใส่วัสดุปลอมปนนอกเหนือไปจากคอนกรีต เช่น ก้อนดิน ทราย กรวด สารละลายเบนโทไนท์ลงไปแล้วแต่กรณี ดังรายละเอียดในตารางที่ 1.

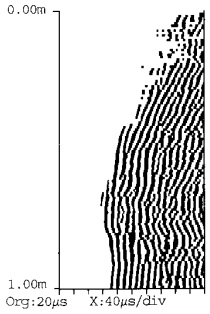
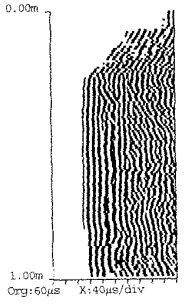


รูปที่ 5 รายละเอียดของเสาเข็มตัวอย่างจำลอง

ตารางที่ 1 **ผลของ Sonic Logging Profiles ที่ได้จากการทดสอบเข็มตัวอย่างจำลองในกรณีต่าง ๆ โดยทำการทดสอบหลังจากเทคอนกรีตเป็นเวลา 30 วัน**

Case	Concrete & Material Properties	Profile	Discussion of signal
1	Standard good concrete pile with clean tubes and clean water		ผลของ Sonic Logging Profile ปกติสัญญาณคลื่นต่อเนื่องไม่พบสิ่งผิดปกติใด ๆ (no -anomaly)
2	Good concrete pile with dirty tubes and clean water		ผลของ Sonic Logging Profile ปกติ ยกเว้นตรงหัวเข็มที่ผิดปกติ เนื่องจาก คอนกรีตเกิด Bleeding ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง
3	Good concrete pile with dirty tubes and dirty water (contaminated with bentonite slurry) filled		ผลของ Sonic Logging Profile ปกติ ยกเว้นตรงหัวเข็มที่ผิดปกติ เนื่องจาก คอนกรีตเกิด Bleeding ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง เช่นเดียวกับในกรณีที่ 2

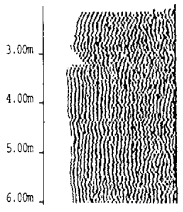
Case	Concrete & Material Properties	Profile	Discussion of signal
4	Good concrete with Layer of bentonite Slurry,sand,gravel filled (30 cm. Thickness whole Section) at middle of the pile 		ผลของ Sonic Logging Profile แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ผิดปกติขาดช่วงตั้งแต่ระดับความลึก 0.40 ม. –0.70 ม. เนื่องจากคลื่นใช้เวลาเดินทางเพิ่มขึ้นมาก
5	Good concrete with Clay on surface of one tube (50 cm. from top of concrete 		ผลของ Sonic Logging Profile เห็นสัญญาณผิดปกติ แหว่งที่ระดับความลึก 0.50 ม. เนื่องจาก คลื่นใช้เวลาในการเดินทางเพิ่มขึ้น
6	Concrete mixed with bentonite slurry		ผลของ Sonic Logging Profile แสดงคลื่นสัญญาณผิดปกติไม่สม่ำเสมอ สัญญาณไม่ชัดเนื่องจากผ่าน Poor concrete, non-homogenous concrete
7	Thin smear of 2 ม ม . Bentonite slurry on tubes (50 cm. from top of concrete)		ผลของ Sonic Logging Profile แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความลึกตั้งแต่ 0 – 0.50 ม. จาก top of concrete ลงไป สัญญาณผิดปกติคลื่นจะขาดหายไป ไม่ชัดเจนเนื่องจากคลื่นใช้เวลาในการเดินทางเพิ่มขึ้น

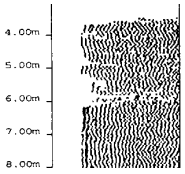
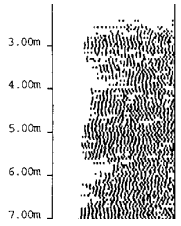
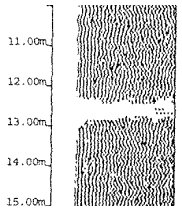
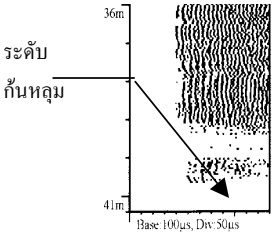
Case	Concrete & Material Properties	Profile	Discussion of signal
8	Thick smear of 5 มม . Bentonite slurry on tubes (50 cm. from top of concrete)		ผลของ Sonic Logging Profile แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความลึกตั้งแต่ 0 – 0.50 ม. จาก top of concrete ลงไป สัญญาณผิดปกติคลื่นจะขาดหายไป ไม่ชัดเจนเนื่องจากคลื่นใช้เวลาในการเดินทางเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับในกรณีที่ 7
9	Weak concrete(high w/c ratio)		ผลของ Sonic Logging Profile แสดงให้เห็นว่าคลื่นสัญญาณปกติสม่ำเสมอ เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังต่ำสม่ำเสมอตลอดทั้งต้น (homogenous low strength concrete)

3. ทดสอบเสาเข็มใช้งาน (Test on working piles)

ตัวอย่างคลื่นสัญญาณที่มีความผิดปกติ (Anomalies) ได้จาก ในสนาม และทำการสำรวจจนพบถึงสาเหตุดังรายละเอียดในตารางที่ 2 การทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 ม. ความลึก 41 ม

ตารางที่ 2 Anomaly signals and causes

ลักษณะสัญญาณที่ผิดปกติ (Anomaly signals)	สาเหตุที่ทำให้สัญญาณผิดปกติ (Causes of anomaly signals)
	Sonic Logging Profile แสดงคลื่นสัญญาณผิดปกติโดยสัญญาณขาดแหว่งบริเวณด้านบนของเสาเข็มที่ระดับ 3 ม. เมื่อทำการขุดดินจนถึงระดับคอนกรีต ในระดับนั้นพบก้อนดินแทรกตัวอยู่ใกล้ชิดกับเสาเข็มตัวอย่างจำลอง ในกรณีที่ 5

ลักษณะสัญญาณที่ผิดปกติ (Anomaly signals)	สาเหตุที่ทำให้สัญญาณผิดปกติ (Causes of anomaly signals)
	Sonic Logging Profile แสดงคลื่นสัญญาณผิดปกติบริเวณหัวเข็ม เมื่อทำการขุดดินถึงระดับ พบว่าคอนกรีตเป็นปูนทราย (mortar) เนื่องจากคอนกรีต Bleeding คล้ายกับตรงหัวเสาเข็มตัวอย่างจำลองในกรณีที่ 2 และ 3
	Sonic Logging Profile แสดงคลื่นสัญญาณผิดปกติที่ระดับ 3.0 – 7.0 ม. เมื่อขุดดินถึงระดับดังกล่าวเพื่อซ่อมแซม พบคอนกรีตกำลังต่ำมีตะกอนเบนโท-ไนท์ปน คล้ายกับเสาเข็มตัวอย่างจำลองในกรณีที่ 6
	Sonic Logging Profile แสดงคลื่นสัญญาณผิดปกติโดยขาดหายไปที่ระดับ 12.5 – 13.0 ม. เมื่อทำการเจาะ Coring เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับดังกล่าว พบว่ามีตะกอนดินปนเปื้อนน้ำยาเบนโทไนท์ คล้ายกับเสาเข็มตัวอย่างจำลองในกรณีที่ 4
	Sonic Logging Profile แสดงคลื่นสัญญาณขาดหายไปที่บริเวณก้นหลุมเจาะ เนื่องจากก้นหลุมมีตะกอนมาก คอนกรีตที่เทลงไปไม่สามารถแทนที่ตะกอนก้นหลุมได้หมด และคอนกรีตผสมกับสารละลายเบนโทไนท์เต็มหน้าตัด ทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำ จากผล coring พบคอนกรีตแยกตัวผสมสารละลายเบนโทไนท์ที่ปลายเสาเข็ม

4. บทการวิเคราะห์ และแปลสัญญาณ (Analysis and Interpretation)

ความถูกต้องในการวิเคราะห์และแปลสัญญาณขึ้นอยู่กับความชำนาญส่วนหนึ่ง และจากการรวบรวมข้อมูลการทดสอบในอดีตในเชิงสถิติอีกส่วนหนึ่ง ในประเทศไทยยังไม่มีการเก็บสถิติและกำหนดเกณฑ์ในการแปล (Interpretation) อย่างเป็นรูปธรรม ประเทศแถบยุโรปได้มีการทดสอบด้วยวิธีนี้กันมานานแล้วจึงได้มีผู้วิจัยหลายท่านเสนอเกณฑ์ในการแปลความหมายของสัญญาณทดสอบ เช่น Faiella et al (1998) ได้วิเคราะห์ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะจาก 37 หน่วยงาน เสาเข็ม 6,865 ต้น โดยกำหนดหมู่เกณฑ์ในการวิเคราะห์ตามตารางที่3 และ4

ตารางที่ 3. Defect classification criteria monitored by means of 2 tubes

Ta/Ts	*Tk/D*	*TYPE OF DEFECT*
<1.15	-	Non-homogeneous concrete
1.15+1.45	<3	Light
	>3	Probably serious
1.45+2.0	<1	Light
	>1	Probably serious
>2.0	<0.5	Probably serious
	>0.5	Light

ตารางที่ 4. Defect classification criteria for piles monitored by means of 3 and 4 tubes

Ta/Ts	*Pa/Pt*	*Tk/D*	*TYPE OF DEFECT*
<1.15	Pa<Pt	-	Non-homogeneous concrete
	Pa=Pt		
1.15+1.45	Pa<Pt	<3	Non-homogeneous concrete
		>3	Light
	Pa=Pt	<3	Light
		>3	Serious
1.45+2.0	Pa<Pt	<1	Non-homogeneous concrete
		1+3	Light
		>3	Serious
	Pa=Pt	<1	Light
		>1	Serious
>2.0	Pa<Pt	<0.5	Light
		0.5+3	Serious
		>3	Serious
	Pa=Pt	<0.5	Light
		>0.5	Serious

Where:
T_a = Travel time of sonic waves in the anomalous zone
T_s = Travel time of sonic waves in the sound concrete
T_k = Thickness of the anomalous zone
P_a = Number of measurement paths affected by sonic anomalies
P_t = Total number of travel paths for each pile
D = Pile diameter

5. บทสรุป (Conclusion)

จากผลของ Sonic Logging Profiles ที่ได้จากการทดสอบเข็มตัวอย่างจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ในกรณีที่คอนกรีตมีความไม่ต่อเนื่องเต็มทั้งหน้าตัด สัญญาณของ Sonic Logging จากทุก Profile จะขาดหายไป ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น (Transit time) เพิ่มขึ้นอย่างมากจนไม่สามารถปรากฏบนจอแสดงคลื่นสัญญาณได้ ดังแสดงในเข็มตัวอย่างจำลองกรณีที่ 4 และสอดคล้องกับผลทดสอบเสาเข็มจริงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 ม. ในโครงการหนึ่ง

5.2 การที่มีสารละลายเบนโทไนท์มาเคลือบท่อ Sonic ทั้งในกรณีที่เคลือบหนา 2 มม. และ 5 มม. สัญญาณคลื่นขาดหายไปและบางส่วนไม่ชัดเจนเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น (Transit time) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในเข็มตัวอย่างจำลองกรณีที่ 7 และกรณีที่ 8

5.3 การที่มีก้อนดินมาติดกับท่อ Sonic แล้วเทคอนกรีตทับลงไป สัญญาณของ Sonic Logging จะขาดหายหรือแหว่งเป็นบาง Profile ในระดับที่มีก้อนดินแทรกอยู่ เนื่องจากคลื่นต้องวิ่งอ้อมก้อนดิน ทำให้เวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น (Transit time) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในเข็มตัวอย่างจำลองกรณีที่5 และสอดคล้องกับผลทดสอบเสาเข็มจริงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 ม. ในโครงการหนึ่ง

5.4 การเทคอนกรีตโดยใช้คอนกรีตเหลวตลอดทั้งต้น สัญญาณของ Sonic Logging จากทุก Profile จะต่อเนื่องสม่ำเสมอ เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังต่ำสม่ำเสมอตลอดทั้งต้น (homogenous low strength concrete) Transit time ที่ใช้ในแต่ละระดับจึงไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในเข็มตัวอย่างจำลองกรณีที่ 9

5.5 การเทคอนกรีตโดยใช้คอนกรีตผสมกับตะกอนเบนโทไนท์ตลอดทั้งต้น สัญญาณของ Sonic Logging จากทุก Profile หรือบาง Profile จะไม่สม่ำเสมอและไม่ชัดมีลักษณะเป็น Poor concrete , none homogenous concrete เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น (Transit time) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในเข็มตัวอย่างจำลองกรณีที่ 6 และสอดคล้องกับผลทดสอบเสาเข็มจริงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 ม. ในโครงการหนึ่ง

5.6 ในกรณีที่คอนกรีตเกิด Bleeding กำลังของคอนกรีตจะลดลง สัญญาณของ Sonic Logging จากทุก Profile หรือบาง Profile จะไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่น (Transit time) เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบเสาเข็มจริงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.20 ม. ในโครงการหนึ่ง

5.7 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มโดยวิธี Sonic Logging Test นี้สามารถตรวจพบสิ่งผิดปกติได้ชัดเจนกว่าการตรวจสอบโดยวิธี Sonic Integrity (Seismic Test) ดังนั้นในโครงการที่ต้องใช้เสาเข็มรับน้ำหนักมาก ๆ หรือมีการใช้เสาเข็มเดี่ยวในฐานราก จึงควรตรวจสอบความสมบูรณ์ของเข็มโดยวิธีนี้ และจะทำให้ผู้ประกอบการเสาเข็มมีความระมัดระวัง และทำการก่อสร้างอย่างถูกวิธีและจะได้เสาเข็มที่มีสมรรถนะสูง (Pile constructed with high performance)

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณ คุณฉรงค์ ทัศนนิพันธ์ ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำในการเตรียมและเขียนบทความนี้มาโดยตลอด และขอขอบคุณผู้ร่วมงานในบริษัท ซีฟโก้ จำกัดที่สนับสนุนการทำเข็มตัวอย่างจำลอง , บริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนอริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด โดยคุณณัฐมนต์ กัมปนานนท์ ที่ทำ Sonic Logging Test ให้โดยไม่คิดมูลค่า และให้ข้อมูลคลื่นสัญญาณของการทดสอบในสนามมาประกอบบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง (References)

Faiella, D. & Superbo, S. (1998) " **Integrity non destructive tests of deep foundations by means of sonic methods - Analysis of the results collected on 37 sites in Italy** ", Deep Foundations on Bored and Auger Piles BAP III, Balkema, Rotterdam ,Netherlands ,1998 , pp. 209-213

Stain, R.T. & Williams, H.T. (1991) "**Interpretation of Sonic Coring Results: A research Project.** ", 4th international DFI conference Piling and Deep Foundations., Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1991, pp. 633-640

Turner, M.J. (1997) **"Integrity testing in piling practice",** Construction Industry Research and Information Association. CIRIA Report 144 , London, UK., pp. 208-229

การประยุกต์วิธีทดสอบครอสโฮลโซนิคล็อคกิ้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพหัวเสาเข็มก่อนทำการขุดเปิดหน้าดิน

APPLICATION OF CROSS-HOLE SONIC LOGGING TESTS IN JUSTIFYING PILE HEAD CONDITION BEFORE BASEMENT EXCAVATION

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

ซอว์ ซอว์ เอย์ (Zaw Zaw Aye)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัทซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]ผู้อำนวยการฝ่ายงานวิศวกรรม บริษัทซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

[3]วิศวกรธรณีเทคนิค บริษัทซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ : เสาเข็มเจาะที่มีคุณภาพดีจะต้องมีคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดตามที่ออกแบบไว้ตั้งแต่ปลายเสาเข็มจนถึงหัวเสาเข็ม ขั้นตอนการเทคอนกรีต และระดับการเทคอนกรีตจึงมีความสำคัญมาก หากการตรวจสอบคุณภาพเสาเข็มเจาะสามารถทำได้ตั้งแต่ช่วงต้นของโครงการจะช่วยให้การก่อสร้างเสาเข็มเจาะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น บทความนี้ได้นำเสนอวิธีตรวจสอบคุณภาพหัวเสาเข็มเจาะก่อนทำการเปิดหน้าดิน รวมถึงวิธีการพิจารณาระดับเทคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มที่เหมาะสม โดยใช้ประโยชน์จากการตรวจสอบด้วยวิธีครอสโฮลโซนิคล็อคกิ้ง ซึ่งท่อทดสอบจะอยู่เฉพาะบริเวณหัวเสาเข็มเท่านั้น

ABSTRACT : In wet process bored piles construction, it is necessary that concrete is continued to be placed until good quality of concrete is formed above the design pile cut-off level to avoid contamination of slurry within the design pile length. Controlling the excessive overcast length to maintain the appropriate pile top level is one of the major problems particularly for the piles with low cut-off level. If the pile head condition of recently cast bored piles could be justified in the initial stage of the project, it would be better and easier for the piling engineers to efficiently decide the optimum overcast length of the pile which in turn would provide effective saving of unnecessary concrete consumption. Application of sonic logging tests in justifying overcast pile length is demonstrated in this paper.

KEYWORDS : cross-hole sonic logging test, wet-process bored pile, pile integrity

1. บทนำ

การทดสอบ CSL (cross-hole sonic logging test) ได้มีการนำมาใช้ครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2525 สำหรับโครงการพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลก หลักการทดสอบของ CSL คือส่งคลื่นเสียงผ่านคอนกรีตระหว่างท่อทดสอบเพื่อหาความบกพร่องในเนื้อคอนกรีต ข้อดีของการทดสอบนี้คือสามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการเปิดหน้าดินจนถึงระดับตัดหัวเสาเข็ม ด้วยหลักการนี้การทดสอบ CSL จึงสามารถนำไปประยุกต์ในการตรวจสอบเพื่อให้งานก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบประเภทนี้มีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับการทดสอบประเภทอื่นและจะต้องมีการวางแผนล่วงหน้าก่อนก่อสร้างเสาเข็มเจาะ เนื้อหาต่อไปนี้ได้เสนอวิธีการตรวจสอบที่มี

ประสิทธิภาพโดยสามารถควบคุมค่าใช้จ่ายให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้

2. ขั้นตอนทั่วไปในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกโดยทั่วไปมีขั้นตอนหลักๆ คือ กดปลอกเหล็กชั่วคราวในชั้นดินอ่อน ทำการเจาะดินด้วยสว่านแบบแห้งจนถึงระดับปลายปลอกเหล็ก เปลี่ยนหัวเจาะเป็นแบบถังหมุนแล้วเติมสารละลายขุดเจาะ (Supporting fluid) จนถึงความลึกที่ออกแบบไว้ ทำความสะอาดหลุมเจาะตามแต่ชนิดของสารละลาย หย่อนโครงเหล็กเสริม เทคอนกรีตผ่านท่อเท (Tremie pipe) และถอนปลอกเหล็กชั่วคราว [Narong 2003, 1]

3. หลักการทดสอบ CSL (Cross-hole Sonic logging test) และหลักเกณฑ์พิจารณาผลการทดสอบ

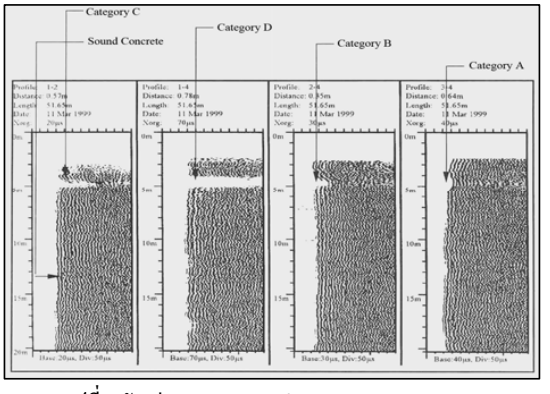
การทดสอบ CSL ทำโดยติดตั้งท่อทดสอบ (Sonic tube) ในเสาเข็มเจาะเพื่อให้สัญญาณเสียงเดินทางครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของเสาเข็มเจาะ เมื่อสัญญาณเสียงที่ส่งมามีความผิดปกติแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตในเสาเข็มอาจไม่มีความต่อเนื่อง คุณภาพคอนกรีตต่ำกว่าบริเวณอื่นมาก หรือมีวัตถุบางอย่างขวางทางสัญญาณ หลักเกณฑ์การพิจารณาความผิดปกติของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนที่คลื่นเสียงเดินทางช้าลงเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในคอนกรีตที่มีเนื้อแน่น นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบกับเนื้อคอนกรีตที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยวิธีเจาะตัวอย่าง (Cored sample) จากการเก็บข้อมูลจากการทดสอบเสาเข็มเจาะเป็นจำนวนมาก เกณฑ์การพิจารณาความผิดปกติได้จำแนกออกตามตารางที่ 1 และรูปที่ 1 [STS 2004, 2] แสดงตัวอย่างการจำแนกสัญญาณจากผลการทดสอบ CSL

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การวิเคราะห์ผลการทดสอบ CSL

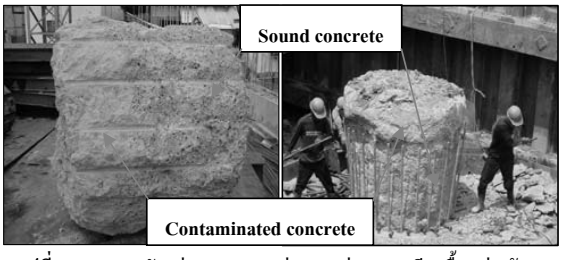
Category	หลักเกณฑ์การจำแนกสัญญาณตามความเร็วคลื่นเสียงที่เดินทางช้าลง	ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม
A	ความเร็วไม่ลดลง หรือลดลง < 10%	คุณภาพดี
B	ความเร็วลดลงระหว่าง 10% ถึง 25%	ผิดปกติเล็กน้อย
C	ความเร็วลดลง > 25% แต่ยังรับสัญญาณได้	ผิดปกติมาก
D	ไม่สามารถรับสัญญาณได้	เสาเข็มเสียหาย

4. ระดับของคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็ม (Overcast length)

การเทคอนกรีตผ่านท่อเท ทำให้คอนกรีตชุดแรกที่เริ่มเทไปผสมกับสารละลายขุดเจาะและตะกอนก้นหลุมบางส่วน คอนกรีตส่วนนี้จะถูกแทนที่ขึ้นมาเมื่อทำการเทคอนกรีตชุดต่อไปจนถึงที่หัวเสาเข็ม เพื่อให้คอนกรีตที่หัวเสาเข็มมีคุณภาพดี จะต้องทำการเทคอนกรีตจนมีระดับสูงกว่าระดับตัดหัวเสาเข็มเพื่อกำจัดคอนกรีตส่วนที่ผสมกับสารละลายขุดเจาะให้อยู่นอกบริเวณหัวเสาเข็มดังรูปที่ 2a และ 2b



รูปที่ 1 ตัวอย่าง แสดงผลการจำแนกผลการทดสอบ CSL



รูปที่ 2a และ 2b ตัวอย่างความแตกต่างระหว่างคอนกรีตเนื้อแน่นกับคอนกรีตที่ปนเปื้อนสารละลายขุดเจาะที่บริเวณเหนือระดับตัดหัวเสาเข็ม

ระดับคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ ปริมาณคอนกรีตที่เกิดการปนเปื้อนกับสารละลายขุดเจาะ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น สารละลายเบนโทไนท์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหลายครั้ง จะทำให้ปริมาณคอนกรีตที่ปนเปื้อนสูงกว่าการใช้สารละลายเบนโทไนท์ที่ผสมใหม่ นอกจากนี้การทำความสะอาดโดยการไล่ตะกอน (Recycle) ก็ต้องเพียงพอที่จะไล่ตะกอนและเม็ดดินแขวนลอยออกจากหลุมเจาะให้มากที่สุด ในกรณีที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ ดินเม็ดละเอียดจะตกตะกอนลงสู่ก้นหลุม ดังนั้นต้องมีเวลาที่เพียงพอที่จะให้การตกตะกอนมากที่สุด ก่อนที่จะทำการ

เก็บตะกอนด้วยถังเก็บ (Cleaning bucket) เวลาที่รอในการตกตะกอนหรือเวลาในการไล่ตะกอนขึ้นรวมทั้งปริมาณตะกอนและดินแขวนลอยในหลุมเจาะจะมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพชั้นดิน ปริมาณดินเม็ดละเอียดในชั้นดิน สัดส่วนการผสมสารละลาย คุณสมบัติของสารละลายตามแต่ละผู้ผลิต ดังนั้นระดับคอนกรีตที่ต้องเทเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มของแต่ละโครงการก็ควรจะแตกต่างกันไปตามปัจจัยดังที่กล่าวในข้างต้น สมการที่ 1 [ICE 1996, 3] ได้ให้ข้อแนะนำระดับคอนกรีตที่เทเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียก

$$L_{overcast} = 1.0 + H/12 + C/8 \quad (1)$$

เมื่อ H = ระดับตัดหัวเสาเข็ม (ม.), (H_{max} = 10.0 ม.)

C = ความยาวปลอกเหล็กชั่วคราว

โดยทั่วไปผู้รับเหมาเสาเข็มเจาะจะเลือกใช้วิธีการเทคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มค่อนข้างมาก เพื่อลดปัญหาความบกพร่องของคอนกรีตที่ใต้ระดับตัดหัวเสาเข็ม ข้อเสียของวิธีการนี้คือ เกิดความสิ้นเปลืองคอนกรีตที่เหนือระดับตัดหัวเสาเข็ม ทำให้ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการตัดหัวเสาเข็มมากขึ้นดังแสดงในรูป 3 หากมีวิธีการที่จะสร้างความเชื่อมั่นให้ผู้รับเหมาเสาเข็มเจาะในการหาปริมาณคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มที่เหมาะสม ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการก่อสร้างได้



รูปที่ 3 ตัวอย่างการหล่อคอนกรีตเสาเข็มที่สูงเกินไป

5. ความสัมพันธ์ระหว่างความสมบูรณ์ของเสาเข็มกับระดับคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มจากข้อมูลการก่อสร้าง

จากการเก็บข้อมูลในสนามสำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียกจำนวนมากที่ทำการเปิดหน้าดิน จนถึงระดับตัดหัวเสาเข็มแล้วพบว่า การใช้สารละลายโพลีเมอร์ต้องการระดับคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารละลายเบนโทไนท์ นอกจากนี้พบว่าค่าที่แนะนำในสมการที่ 1 ยังมีค่าสูงไปสำหรับเสาเข็มที่ก่อสร้างในกรุงเทพฯ กรณีศึกษา 2 ตัวอย่างดังตารางที่ 2 แสดงถึงผลการทดสอบ CSL เปรียบเทียบกับระดับคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็ม

ตารางที่ 2 ข้อมูลผลการทดสอบ CSL จากกรณีศึกษา

กรณีศึกษาที่		1	2
จำนวนเสาเข็ม,	(ต้น)	400	174
ขนาด ϕ เสาเข็ม,	(ม.)	1.50	1.00
ความลึกเสาเข็ม,	(ม.)	52.0	50.0
จำนวนเสาเข็มที่มี	(ต้น)	2	0
ความผิดปกติระดับ C	(%)	0.5	0
ระดับคอนกรีตเหนือ	(ม.)	2.5	2.2
ระดับตัดหัวเสาเข็ม	(%) เสาเข็ม	95	76

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การก่อสร้างเสาเข็มเจาะในเขตกรุงเทพฯ โดยใช้สารละลายโพลีเมอร์ สามารถกำหนดค่า Overcast length ประมาณ 2.5 ม. เพื่อจะให้คอนกรีตที่บริเวณหัวเสาเข็มมีคุณภาพดี ทั้งนี้การควบคุมการก่อสร้าง คุณภาพของสารละลายโพลีเมอร์และคุณภาพคอนกรีตต้องอยู่ในมาตราฐานตามที่ออกแบบไว้

6. การตรวจสอบสภาพหัวเสาเข็มด้วยวิธี CSL ก่อนทำการเปิดหน้าดินบริเวณหัวเสาเข็ม

เสาเข็มเจาะส่วนมากจะมีระดับตัดหัวเสาเข็มใต้ผิวดิน จึงเป็นการยากที่จะตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตที่หัวเสาเข็มก่อนทำการเปิดหน้าดิน ผู้เขียนมีข้อเสนอแนะว่าการติดตั้งท่อทดสอบ CSL ที่มีความยาวประมาณ 10-15 ม. เฉพาะส่วนบนของเสาเข็มเป็นบางต้นเพื่อตรวจสอบเบื้องต้นซึ่งจะเป็นทางเลือกที่จะทำให้การก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นสามารถเป็นแนวทางในการลดปริมาณคอนกรีตและการสกัดคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มได้

จากข้อมูลการทดสอบ CSL หลายๆโครงการพบว่าโอกาสที่จะพบความผิดปกติของเสาเข็มที่ระดับต่ำกว่า 10 ม. มีน้อยมาก เนื่องจากตะกอนในหลุมเจาะหรือคอนกรีตที่ปนเปื้อนถูกไล่ขึ้นมาอยู่บริเวณเหนือระดับตัดหัวเสาเข็มแล้ว

ข้อดีของการตรวจสอบคุณภาพของหัวเสาเข็มโดยที่ยังไม่เปิดหน้าดินคือ สามารถตรวจสอบว่าระดับคอนกรีตที่เทเหนือระดับตัดหัวเข็มมีเพียงพอที่จะทำให้เสาเข็มมีคุณภาพดี ซึ่งจะ

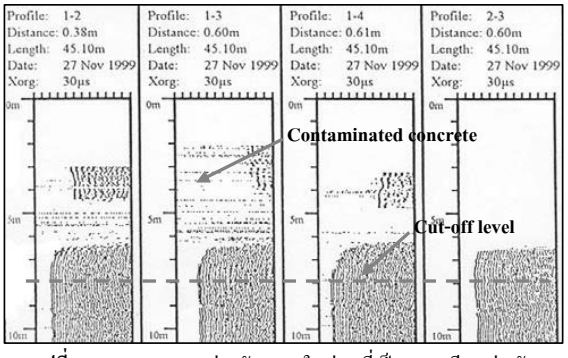
สร้างความเชื่อมั่นในการก่อสร้างทำให้ผู้รับเหมาเสาเข็มเจาะและสามารถปรับปริมาณคอนกรีตที่เหนือระดับตัดหัวเสาเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละโครงการ

การตรวจสอบคุณภาพของหัวเสาเข็มก่อนการเปิดหน้าดินยังช่วยลดความขัดแย้งในการก่อสร้างได้ หากพบว่าเสาเข็มหักหรือมีความเสียหาย ก็สามารถทราบได้ว่าความเสียหายของเสาเข็มเกิดขึ้นก่อนทำการเปิดหน้าดินหรือหลังทำการเปิดหน้าดินแล้ว กรณีศึกษาด้านล่างนี้แสดงให้เห็นว่าหากใช้เกณฑ์การตรวจรับงานโดยใช้ CSL สามารถช่วยลดความขัดแย้งระหว่างผู้รับเหมาเสาเข็มเจาะและผู้รับเหมาโครงสร้างได้

6.1 จากกรณีศึกษาที่ 2

จากการเปิดหน้าดินโดยผู้รับเหมาโครงสร้างพบว่า เสาเข็มจำนวนมากมี Overcast length ประมาณ 4-6 ม. ซึ่งต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการตัดหัวเสาเข็มสูงมาก จากผลการทดสอบ CSL ได้พบว่าจากเสาเข็มจำนวน 174 ต้น เสาเข็ม 76% มี Overcast length ไม่เกิน 2.2 ม. เสาเข็ม 18% มี Overcast length ระหว่าง 2.2 ถึง 3.0 ม. และมีเสาเข็ม 6% มี Overcast length มากกว่า 3.0 ม.

จากการพิจารณาอย่างละเอียดพบว่าในช่วง 4-6 ม. เหนือระดับตัดหัวเสาเข็มมีส่วนผสมระหว่างหินคลุกที่ถมในหลุมเจาะกับคอนกรีตที่ปนเปื้อนซึ่งส่วนผสมนี้มีกำลังรับแรงอัดต่ำมาก แต่หากพิจารณาด้วยตาเปล่าก็เป็นการยากที่จะแยกแยะความแตกต่างได้ ซึ่งผลการทดสอบ CSL ดังรูปที่ 4 ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในความหนาแน่นอย่างชัดเจน ด้วยผลการทดสอบวิธีนี้ทำให้ผู้รับเหมาโครงสร้างเลือกที่จะใช้การตรวจรับงานโดยใช้ CSL เป็นเกณฑ์



รูปที่ 4 แสดงความแตกต่างสัญญาณในส่วนที่เป็นคอนกรีตแน่นกับส่วนผสมหินคลุกและคอนกรีตปนเปื้อนสารละลายขุดเจาะ

7. ข้อแนะนำสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกเพื่อให้มีคุณภาพที่ดี

วิธีการต่อไปนี้เป็นคำแนะนำ เพื่อให้ก่อสร้างเสาเข็มที่มีคุณภาพดี

- ติดตั้งปลอกเหล็กชั่วคราวให้มีความยาวเพียงพอที่จะป้องกันการเคลื่อนตัวในชั้นดินอ่อน
- ติดตั้งท่อทดสอบ CSL ให้มีความยาวประมาณ 10-15 ม. เฉพาะบริเวณหัวเสาเข็ม
- ใช้เครื่องมือตรวจสอบสภาพหลุมเจาะ เพื่อดูรูปร่างหลุมเจาะและใช้ในการคำนวณปริมาณคอนกรีต
- ควบคุมคุณภาพของคอนกรีตและสารละลายขุดเจาะให้อยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบไว้
- หลังจากคอนกรีตในเสาเข็มเจาะชุดแรกมีอายุได้ประมาณ 10 วันแล้ว ควรทำการทดสอบ CSL เพื่อนำไปปรับหา Overcast length ที่เหมาะสม (หากเป็นไปได้ ควรมีการเปิดหน้าดิน เพื่อเปรียบเทียบกับผลของ CSL)

8. บทสรุป

การทดสอบ CSL มีประโยชน์สำหรับการทดสอบคุณภาพของเสาเข็ม ซึ่งการทดสอบสามารถทำได้โดยยังไม่ต้องเปิดหน้าดินจนถึงระดับตัดหัวเสาเข็ม ความยาวที่เหมาะสมสำหรับท่อทดสอบควรอยู่ในช่วง 10-15 ม. สำหรับเสาเข็มส่วนใหญ่ และอาจทำการติดตั้งท่อทดสอบตลอดความยาวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มบางต้น การทดสอบ CSL ยังสามารถช่วยหาระดับคอนกรีตเหนือระดับตัดหัวเสาเข็ม ที่เหมาะสม เพื่อช่วยประหยัดคอนกรีตส่วนเกิน นอกจากนี้ยังสามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการตัดหัวเสาเข็มอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Narong et al, 2003. Behaviour of Polymer-bases Slurry for Deep-seated Bored Piles in Multi-layered Soil of Bangkok, Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium.

[2] STS Instruments Co., Ltd., 2004. Proposal for sonic logging test (unpublished), Bangkok, Thailand

[3] Institution of Civil Engineers, 1996. Specification for piling and embedded retaining walls. Thomas Telford Services Ltd. London, United Kingdom

บทบาทการตรวจวัดพฤติกรรมทางวิศวกรรมปฐพีสำหรับงานก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในกรุงเทพฯ

GEOTECHNICAL INSTRUMENTATION ROLLS IN DEEP BASEMENT CONSTRUCTION IN BANGKOK

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

ซอว์ ซอว์ เอย์ (Zaw Zaw Aye)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) zaw@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ : งานตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงและบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างห้องใต้ดิน การเคลื่อนตัวของดินและพื้นที่รอบๆห้องใต้ดิน ที่เกิดจากงานก่อสร้าง โดยที่เครื่องมือวัดยังสามารถตรวจวัดผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคภายในบริเวณ เครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในการตรวจวัดดังกล่าวจึงมีความสำคัญมากในการตรวจสอบสมมุติฐานในการคำนวณและใช้ในการเฝ้าระวังเพื่อให้งานก่อสร้างมีความปลอดภัย ข้อมูลการตรวจวัดถือเป็นส่วนสำคัญในการตัดสินใจสำหรับผู้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง โดยสามารถปรับแผนหรือวิธีการก่อสร้างให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ทันกับสถานการณ์นั้นๆ บทความนี้นำเสนอภาพรวมของการใช้งานการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีในกรุงเทพฯ ความสำคัญและการเลือกใช้เครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพี หลักการทำงาน และแนวทางเบื้องต้นในการแปลผลของเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพี โดยยกตัวอย่างกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างห้องใต้ดินในกรุงเทพฯ ที่ได้ติดตั้งเครื่องมือวัด

ABSTRACT : The objectives of geotechnical instrumentation are to monitor excavation induced movement, observe changes in stress state due to basement construction activities and impact of construction to existing buildings or infrastructures. Instrumentation can be applied to retaining wall, soil, building or infrastructure that is influenced by basement construction works. Geotechnical instrumentation is considered essential in order to verify the design criteria, to observe safety of basement construction works and to evaluate impact of construction to existing building foundations or infrastructures. In addition, monitoring data is a key factor to make a decision for adjusting construction plan or method of construction in each situation within the right time to increase safety or efficiency. This paper presents an overview of geotechnical instrumentation applications in Bangkok, importance of geotechnical instrumentation to basement excavation works, monitoring concept of each instrument and interpretation of monitoring results. Furthermore, a case study of geotechnical instrumentation application in basement construction in Bangkok is also demonstrated.

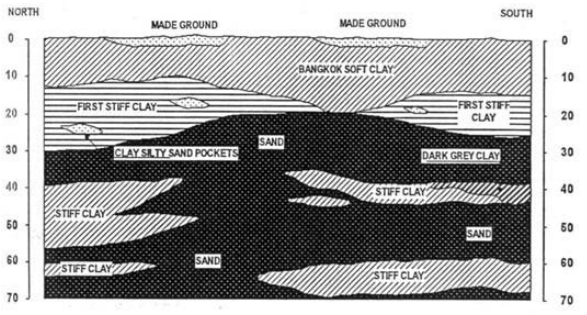
KEYWORDS : Geotechnical instrumentation, basement construction, excavation induced movement

1. บทนำ

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลดินและเกิดการเคลื่อนตัวของดินรอบๆบริเวณของการขุดดินและ ทำให้กำแพงกันดินเกิดการเคลื่อนตัว การตรวจวัดพฤติกรรมดังกล่าวช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างเกิดความมั่นใจในการก่อสร้าง สามารถตรวจสอบได้ว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างงานก่อสร้างสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หรือไม่ และสามารถประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างข้างเคียงได้ ความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องมือวัด ข้อจำกัดในการตรวจวัด และแนวทางเบื้องต้นในการแปลผลการตรวจวัด จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญสำหรับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง การตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพียังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการตัดสินใจในการปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างซึ่งสามารถทำให้งานก่อสร้างสามารถดำเนินการได้รวดเร็วขึ้น มีความประหยัดมากขึ้น โดยสามารถควบคุมความเสี่ยงให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [1] หรือปรับวิธีการก่อสร้างให้มีความปลอดภัยมากขึ้น เมื่อพบว่าผลการตรวจวัดสูงกว่าที่ประเมินเอาไว้

2. ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ และภาพรวมของการใช้เครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพี

ชั้นดินกรุงเทพ ฯมีลักษณะเป็นทรายสลับกับดินเหนียวชั้น ๆ ซึ่งเกิดจากการตกตะกอน ประกอบด้วยตะกอนปาก แม่น้ำและตะกอนทะเล ชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนาตั้งแต่ 11-18 ม. ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากอ่าวไทย (ว.ส.ท.2520, [2]) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สภาพชั้นดินทั่วไปในกรุงเทพฯ (ว.ส.ท.2520, [2])

โดยทั่วไปเมื่อทำการก่อสร้างห้องใต้ดิน จะเกิดการเคลื่อนตัวของดินมากในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงที่มีโครงสร้างอาคารหรือการวางฐานรากในชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ ในกรณีที่การเคลื่อนตัวมีค่ามากอาจก่อให้เกิดความเสียหายตามมาได้ การตรวจวัดทางวิศวกรรม จึงมักจะเน้นการตรวจวัดในชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ ในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น โครงการรถไฟฟ้ามหานคร โครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ จะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดหลายประเภทและมีการติดตั้งครอบคลุม ทุกพื้นที่ มีการอ่านค่าได้เหมาะสมครอบคลุมกิจกรรมการก่อสร้างที่สำคัญ ตัวอย่างของเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร แสดงในตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานรถไฟฟ้ามหานคร [3]

ชนิดของเครื่องมือวัด	ค่าที่ทำการตรวจวัด
Inclinometer ในกำแพง Diaphragm wall	การเคลื่อนตัวของกำแพง Diaphragm wall
Inclinometer ในดิน	การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินแต่ละความลึก
Extensometer	ค่าการทรุดตัวที่ระดับใต้ดิน
Extensometer ในท่อเดียวกับ Inclinometer	การทรุดตัวที่ระดับใต้ดินที่ความลึกที่สนใจและการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินแต่ละความลึก
หมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน	ค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน
หมุดวัดการทรุดตัวใต้ผิวดิน	ค่าการทรุดตัวที่ระดับใต้ดิน
หมุดวัดการทรุดตัวของอาคาร	ค่าการทรุดตัวของอาคาร
หมุดวัดการทรุดตัวของโครงสร้าง	ค่าการทรุดตัวของโครงสร้าง (เช่น สะพานข้ามแยก ทางด่วน)
หมุดวัดการทรุดตัวของสาธารณูปโภค	ค่าการทรุดตัวของสาธารณูปโภค (เช่น ท่อน้ำ เสาไฟฟ้า หม้อแปลง)

ตารางที่ 1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานรถไฟฟ้ามหานคร [3] (ต่อ)

ชนิดของเครื่องมือวัด	ค่าที่ทำการตรวจวัด
Tilt-meter	ค่าการเอียงตัวของอาคารและโครงสร้าง
Crack Meter, Crack Gauge	ความกว้างของรอยร้าว และการขยายตัวของรอยร้าว
บ่อน้ำสังเกตการณ์ (Observation Well)	การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน
Piezometer (Standpipe, Vibrating wire)	การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในมวลดิน
Tape Extensometer Convergence Point	การเปลี่ยนรูปของอุโมงค์

สำหรับงานก่อสร้างขนาดกลาง มักจะให้ความสำคัญด้านการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีน้อยกว่าโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ โดยอาจจะมีเพียงเครื่องมือวัดที่แสดงผลให้เห็นค่าอย่างชัดเจน และแปลผลได้อย่างไม่ซับซ้อน เช่น การใช้ท่อ Inclinometer และ หมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน เป็นต้น แต่สำหรับโครงการที่มีขนาดเล็กมักจะไม่มีการรวมงานตรวจวัดเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของเนื้องาน เนื่องจากมูลค่าของระบบการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีเทียบกับมูลค่าของโครงการอาจมีสัดส่วนที่สูงกว่างานขนาดใหญ่

สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ถือว่ามีชั้นดินที่สม่ำเสมอ การเคลื่อนตัวหรือแรงที่เกิดขึ้นในกำแพงกันดินหรือดินรอบๆ จึงสามารถประมาณการเป็นช่วงกว้างๆได้ การใช้เครื่องมือวัดในกิจกรรมการก่อสร้างทางวิศวกรรมปฐพีจึงมีจำนวนและประเภทของเครื่องมือวัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ งานก่อสร้างห้องใต้ดินในพื้นที่มีชั้นดินที่มีลักษณะแปรปรวนและไม่สม่ำเสมอ

3. ความสำคัญของเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพี

งานออกแบบทางวิศวกรรมปฐพีจะมีความแตกต่างจากงานออกแบบโครงสร้างเนื่องจากค่าตัวแปรที่ใช้จะมีความแปรปรวนและความลึกของชั้นดินแต่ละบริเวณมักจะไม่สม่ำเสมอ สมการที่ใช้ในการคำนวณมักใช้เป็นแบบ Empirical ข้อมูลดินที่ใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณในแต่ละโครงการจึงมักเป็นค่าเฉลี่ยหรือค่าที่เลือกตามวิจารณญาณของผู้คำนวณ การตรวจวัดจึงมีความสำคัญสำหรับงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมปฐพี วัตถุประสงค์หลักของงานตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพี ได้แก่ 1. ใช้เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานและตัวแปรที่เลือกใช้ในการออกแบบว่ามีความสอดคล้องกับสภาพในพื้นที่ก่อสร้างเพียงใด 2. ใช้เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการก่อสร้างหรือวิธีการก่อสร้าง 3. ใช้เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของงานก่อสร้าง 4. ใช้เพื่อตรวจวัดผลกระทบที่มีต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง

การเลือกเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพีจะพิจารณาว่ากิจกรรมการก่อสร้างส่งผลอย่างไรต่อระบบกำแพงกันดิน ระบบค้ำยัน การทรุดตัวหรือเคลื่อนตัวของดิน หรือโครงสร้างข้างเคียง การกำหนดตำแหน่ง มักทำการติดตั้งตามข้อแนะนำดังต่อไปนี้คือ ติดตั้งในบริเวณที่เกิดค่าวิกฤติหรือการเคลื่อนตัวสูงสุด ติดตั้งในส่วนที่อาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง ติดตั้งในส่วนที่จะสามารถเข้าถึงและทำการตรวจวัดได้ตลอดเวลา และติดตั้งในส่วนที่จะไม่ถูกรบกวนจากกิจกรรมอื่นๆ ที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากงานก่อสร้าง สำหรับการเลือกประเภท ควรเลือกเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรง สามารถเชื่อถือได้ มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมใต้ดิน มีความแปรปรวนน้อย และสามารถแปลผลได้ไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน ในส่วนของจำนวนเครื่องมือวัด มักพิจารณาจากลักษณะของพื้นที่ก่อสร้างเป็นหลัก โดยทั่วไปจะติดตั้งเครื่องมือวัดทุกด้านของกำแพงกันดิน ในกรณีที่กำแพงกันดินบางด้านมีความยาวมาก อาจติดตั้งเครื่องมือวัดมากกว่าหนึ่งชุดต่อด้านได้ และอาจเพิ่มจำนวนของเครื่องมือวัดในบริเวณของสิ่งปลูกสร้างที่มีความสำคัญและอาจได้รับผลกระทบให้เกิดความเสียหายจากงานก่อสร้าง

การเลือกผู้ที่จะทำการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพี ก็ถือว่ามีความสำคัญเช่นกัน บริษัทหรือหน่วยงานที่ทำการตรวจวัดจะต้องมีประสบการณ์เกี่ยวกับงานตรวจวัดในลักษณะเดียวกันมาก่อน มีบุคลากรที่เชื่อถือได้ มีความรับผิดชอบต่องาน มีความซื่อสัตย์ เลือกใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำเหมาะสมกับงาน โดยทั่วไปการเลือกผู้ที่จะทำการตรวจวัดมักพิจารณาจากชื่อเสียง ประสบการณ์การทำงาน และความพร้อมของอุปกรณ์เป็นหลัก

เครื่องมือวัดที่จะทำการติดตั้งควรทำการสอบเทียบ (Calibrate) อย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ข้อมูลที่ตรวจวัดมีความถูกต้อง ความถี่ของการสอบเทียบนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องมือวัด ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานกำหนดการสอบเทียบเครื่องมือวัดในประเทศไทย มาตรฐานเกี่ยวกับการสอบเทียบเครื่องมือวัด เกณฑ์การสอบเทียบจึงมักอิงตามข้อกำหนดเฉพาะงานเป็นหลัก

4. องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพี

การใช้ระบบการตรวจวัดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ การติดตั้งเครื่องมือวัด การอ่านค่าเครื่องมือวัดและการแปลผลเครื่องมือวัด

การติดตั้งเครื่องมือวัดที่ถูกต้องจะทำให้ผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเชื่อถือได้ สามารถใช้ประกอบในการออกแบบและเฝ้าระวังระหว่างการก่อสร้าง การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดที่ดีผู้ติดตั้งจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ การติดตั้งต้องมีความปลอดภัย ต้องมีความรู้เกี่ยวกับสภาพชั้นดินในบริเวณที่จะติดตั้งเพื่อการประเมินประเภทของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์การติดตั้งที่เกี่ยวข้อง มีแผนการติดตั้งที่ดีสอดคล้องกับการทำงานก่อสร้าง ทราบถึงตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะติดตั้งเครื่องมือวัด มีการจดบันทึกการติดตั้งที่ดี และติดตั้งเครื่องมือวัดให้มีความมั่นคงแข็งแรง ไม่เสียหายระหว่างการตรวจวัด

ข้อมูลการตรวจวัดที่ดี จะต้องได้มาจากการตรวจวัดที่เป็นระบบ ซึ่งมีองค์ประกอบที่จะทำให้งานตรวจวัดได้ข้อมูลที่ถูกต้อง มีคุณภาพดังต่อไปนี้ การตรวจวัดต้องคำนึงถึงหลักความปลอดภัย เครื่องมือที่ตรวจวัดต้องมีการสอบเทียบ ควรใช้เครื่องมือวัดชุดเดิมในการอ่านค่าในโครงการเดียวกัน ผู้ตรวจวัดจะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนการก่อสร้างจะได้เลือกช่วงเวลาการตรวจวัดที่เหมาะสม เก็บข้อมูลที่สำคัญทั้งหมด มีความช่างสังเกตสภาพแวดล้อมถึงความผิดปกติ เลือกช่วงเวลาการตรวจวัดของแต่ละวันให้เป็นช่วงเดียวกัน (เช่น ช่วงเช้าทั้งหมด) ใช้ชุดเจ้าหน้าที่เก็บข้อมูลเป็นชุดเดียวกันตลอดทั้งโครงการ และมีรูปแบบการเก็บบันทึกข้อมูลที่ดี

เมื่อเก็บข้อมูลแล้วเสร็จ ควรมีการแปลผลที่ถูกต้องเพื่อให้สามารถนำเอาข้อมูลไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักสำคัญในการแปลผลจะต้องพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ ผู้แปลผลจะต้องทราบพฤติกรรมของสิ่งที่ตรวจวัดเพื่อให้มีความสอดคล้องกับวิธีการก่อสร้างและขั้นตอนการก่อสร้าง จะต้องสามารถระบุได้ว่าการอ่านค่ามีความผิดพลาดเมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดเทียบกับขั้นตอนการก่อสร้างเพื่อจะได้ทำการตรวจวัดซ้ำหรือใช้วิธีตรวจสอบแบบอื่นให้ทันกับสถานการณ์ก่อสร้าง โดยจะต้องทราบถึงข้อจำกัดของเครื่องมือและความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น และสามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้กับ Trigger value ว่ามีความสอดคล้องเพียงใดและต้องมีแผนสำรองหรือแผนแก้ไขที่พร้อมใช้ได้ทันทีเมื่อค่าที่อ่านได้มีค่าเกินจุดเตือนภัย (Trigger value) แล้ว

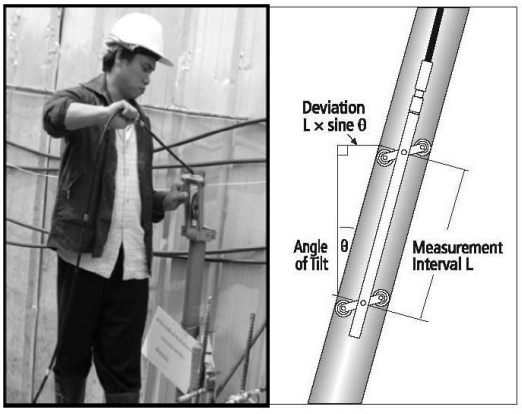
5. การทำงานของเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพี

เครื่องมือวัดที่จะอธิบายถึงหลักการทำงานในบทความนี้เป็นเครื่องมือวัดที่มักจะใช้กับงานขุดดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน (Inclinometer)

เครื่องมือวัด Inclinometer เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินหรือดิน โดยใช้หลักการวัดความเอียงของท่อที่มีความแม่นยำสูง เครื่องมือวัดชนิดนี้สามารถติดตั้งในกำแพงกันดินหลายประเภทเช่น กำแพงกันดิน Diaphragm wall กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง กำแพงเสาเข็มเหล็กพืด (Sheet pile) หรือในดิน เครื่องมือวัด Inclinometer ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ท่ออ่าน (Access tube) หัวอ่าน (Probe) สายสัญญาณ และกล่องบันทึกข้อมูลซึ่งหัวอ่าน จะเป็นแท่งตรวจวัดมุมเอียง (Servo-accelerometer) ซึ่งมีล้อที่สามารถเคลื่อนที่ตามร่องของท่ออ่านได้ โดยมุมเอียงที่วัดได้ขนานกับแนวร่องของท่ออ่านนี้จะ ถูกแปลงเป็นค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของท่อตามหลักการที่แสดงในภาพที่ 2

ข้อมูลที่รายงานผลของท่อ Inclinometer จะแสดงในรูปแบบกราฟ โดยที่แกนนอน จะแสดงการเคลื่อนตัวด้านข้างของท่อ Inclinometer ในขณะที่แกนตั้ง จะแสดงความลึกของการวัดค่าในแต่ละจุด ภาพที่ 2 แสดงการอ่านค่า Inclinometer และหลักในการแปลผล



ภาพที่ 2 การวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินโดย Inclinometer

สิ่งที่ควรระวังในการแปลผลของ Inclinometer คือค่าที่อ่านได้จะใช้หลักของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของท่อโดยมีสมมุติฐานว่าปลายท่อเป็นจุดหมุนไม่มีการเคลื่อนตัวเนื่องจากหัวอ่านจะเก็บเฉพาะค่าการเปลี่ยนแปลงมุม แต่ในบางกรณีที่ปลายท่อมีระดับเท่ากับปลายกำแพงซึ่งอยู่ในชั้นดินที่สามารถเคลื่อนตัว จะไม่สามารถบอกได้ว่าปลายกำแพงมีการเคลื่อนตัวหรือไม่หากไม่พิจารณาข้อมูลอื่นประกอบด้วย การติดตั้ง Inclinometer ให้มีความยาวมากกว่าปลายกำแพงกันดินจึงสามารถช่วยให้อ่านค่าการเคลื่อนตัวของปลายกำแพงกันดินได้ ทำให้การแปลผลไม่เกิดความผิดพลาด

5.2 หมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement point)

อุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ผิวดินประกอบด้วยแผ่นเหล็กปิดด้วยคอนกรีต มีแกนเหล็กยื่นออกมาฝังไว้ในดินเพื่อใช้เป็นหมุดวัด การติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวจะต้องขุดดินลงไปประมาณ 30-50 ซม. ถมทรายและวางแผ่นเหล็กลงไป ตัวหมุดจะมีระดับใกล้เคียงกับผิวดินเพื่อให้สามารถวัดการทรุดตัวได้ และมีแผ่นเหล็กปิดไว้ขณะไม่ได้ทำการวัดค่าการทรุดตัว การติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวควรติดตั้งในดินที่สามารถเกิดการเคลื่อนตัวตามกำแพงกันดินได้ ภาพที่ 3 แสดงการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดินเพื่อวัดการทรุดตัวที่ระยะต่างๆตั้งฉากจากกำแพง

การวัดค่าการทรุดตัวที่ผิวดินสามารถทำการตรวจวัดได้โดยใช้กล้องระดับ (Theodolite) วัดระดับของหมุดวัดการทรุดตัว ที่ระยะเวลาการก่อสร้างต่างๆกัน โดยเทียบกับค่าเริ่มต้นก่อนเริ่มกิจกรรมการก่อสร้าง

นอกจากหมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดินทั่วไปที่ใช้กล้องระดับอ่านค่าแล้ว ยังมีอุปกรณ์วัดการทรุดตัวผิวดินอีกหลายประเภทให้เลือกใช้ ได้แก่ Pneumatic Settlement Cell และ VW Settlement Cell ซึ่งมีความละเอียดมากขึ้น การเลือกใช้ประเภทของหมุดวัดการทรุดตัวจึงต้องประเมินถึงความเหมาะสมของอุปกรณ์แต่ละประเภทด้วย

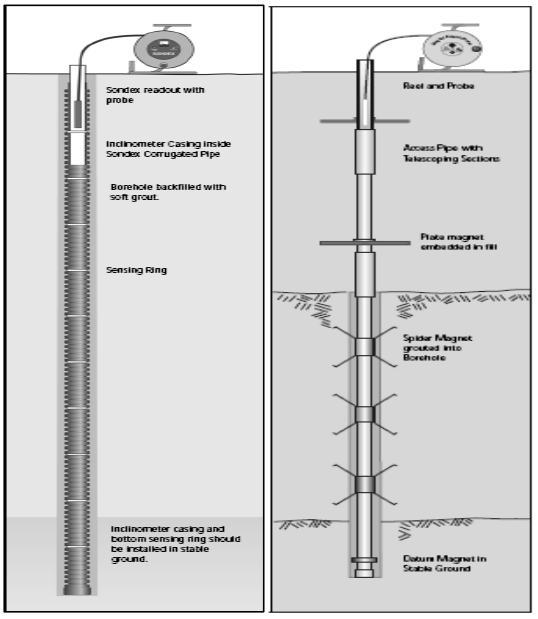


ภาพที่ 3 หมุดวัดค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน

5.3 เครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวใต้ดิน (Extensometer)

การวัดการทรุดตัวของดินที่ระดับใต้ดินสามารถใช้ท่อวัดการทรุดตัวใต้ผิวดิน ซึ่งเป็นการฝังจุดวัดไว้ในท่อที่ความลึกต่างๆ หรือใช้เป็นแบบท่อย่น (Sondex) บางครั้งสามารถเลือกใช้ระบบการฝังจุดวัดการทรุดตัวแบบแม่เหล็ก (Magnetic extensometer) นี้ลงไปในท่อเดียวกับ Inclinometer ได้ตามระดับที่ต้องการวัดค่า โดยปกติระดับที่ฝังมักจะกระจายไปตามความลึกที่คาดว่าจะมีการทรุดตัวสูงและอาจมีผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง

Extensometer ที่นิยมใช้เพื่อวัดค่าการทรุดตัว หรืออูดตัวที่ใต้ผิวดินมี 2 ประเภท ได้แก่ Sondex Extensometer และ Magnetic Extensometer ดังแสดงในภาพที่ 4



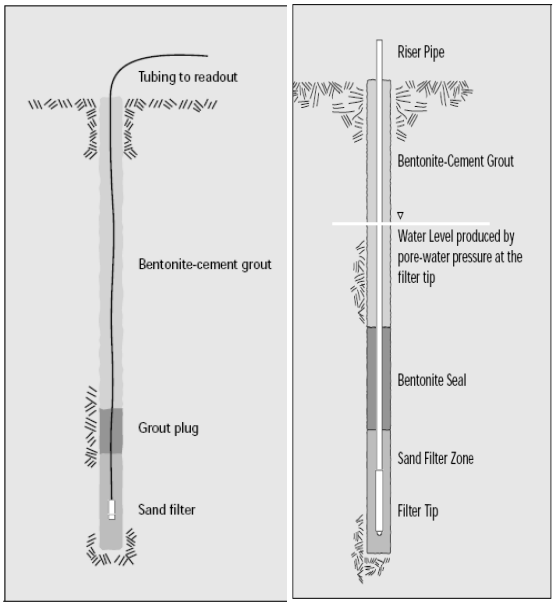
ภาพที่ 4 เครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวใต้ระดับดิน (Extensometer)

5.4 เครื่องมือวัดค่าแรงดันน้ำในมวลดิน (Piezometer)

ระหว่างการขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในมวลดินเมื่อชั้นดินนั้นเป็นดินเหนียว Piezometer จะทำหน้าที่วัดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ซึ่ง Piezometer ที่ใช้ประกอบด้วย Active Piezometer ซึ่งติดตั้งใกล้กับกำแพงกันดิน วัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นและทำการเปรียบเทียบกับแรงดันน้ำที่วัดได้ใน Dummy Piezometer ที่ติดตั้งไว้ห่างจากกำแพงกันดินให้พ้นจากผลกระทบของแรงที่เกิดขึ้นจากงานขุดดิน

หลักการทำงานของ Piezometer จะพิจารณาจากแรงดันน้ำที่วัดได้จากหัวอ่าน ซึ่งการอ่านค่าจะทำโดยฝังหัวอ่านลงไปเพื่อวัดแรงดันน้ำในท่อ ผลการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปของแรงดันน้ำ ตามระยะเวลาการก่อสร้างหรือขั้นตอนการก่อสร้าง

Piezometer ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมี 3 ประเภท เรียงลำดับต่อความไวของหัวอ่านแรงดันน้ำ คือ Standpipe Piezometer, Pneumatic Piezometer ภาพที่ 5 (ซ้าย) และVibrating Wire Piezometer ภาพที่ 5 (ขวา) การเลือกใช้ Piezometer มักพิจารณาจากความละเอียดของเครื่องมือวัดและระยะเวลาตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ



ภาพที่ 5 เครื่องมือวัดแรงดันน้ำในมวลดิน (Piezometer)

5.5 เครื่องมือวัดการเอียงตัวของอาคาร (Tiltmeter)

ในการติดตามเฝ้าระวังการเอียงตัวของอาคารจำเป็นจะต้องติดตั้งเครื่องมือวัด การเอียงตัวของอาคาร (Tiltmeter) ไว้ในโครงสร้างหลักของอาคาร เช่น เสา คานคอนกรีต เครื่อง Tiltmeter เป็นอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงของระนาบโดยติดตั้ง Tilt Sensor ซึ่งเป็นหลอดฟองอากาศมีความไวสูงมากลงบน Tilt Plate ที่ติดตั้งบนตัวโครงสร้างเสาตอม่อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระนาบจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป และแปลงค่าความต่างศักย์เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของระนาบหรือการเอียงตัวของเครื่องมือวัด ดังแสดงในภาพที่ 6 การวัดค่าความเอียงของอาคารสามารถวัดได้ทั้งสองทิศทาง คือ ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ขุดดิน และในทิศทางฉนานกับพื้นที่ขุดดิน

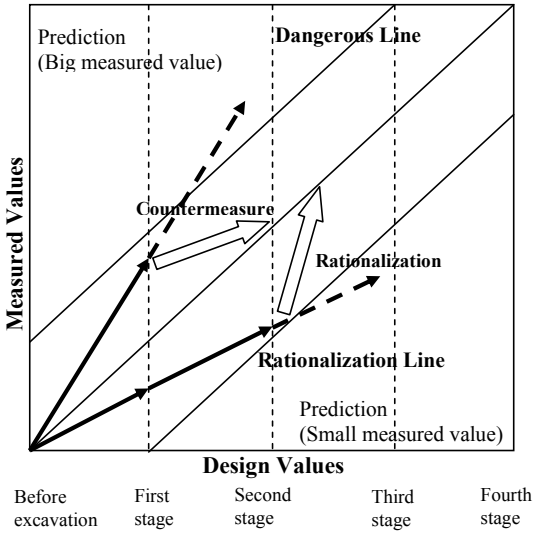


ภาพที่ 6 การวัดค่าความเอียงของอาคารโดยใช้ Tiltmeter

6. การใช้ผลการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีกับการปรับแผนการก่อสร้างห้องใต้ดิน

การออกแบบระหว่างงานก่อสร้างและก่อสร้างในโครงการสามารถใช้ค่าผลการตรวจวัดเพื่อประเมินและปรับเปลี่ยนแผนการก่อสร้าง หรือวิธีการก่อสร้างในขณะทำการก่อสร้างเพื่อให้งานก่อสร้างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ใช้ระยะเวลาก่อสร้างลดลง ประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้นหรือมีความปลอดภัยมากขึ้น โดยแปลผลการตรวจวัดอย่างเป็นระบบ เป็นเกณฑ์ในการปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างโดยควบคุมความเสี่ยงของงานก่อสร้างให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [4]

แนวทางของการปรับเปลี่ยนนี้ ประกอบด้วย การประเมินค่าของแรงหรือการเคลื่อนตัวที่เป็นไปได้ โดยกำหนดค่าเป็นช่วง เลือกวิธีการก่อสร้างตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไปโดยทำการประเมินค่าการเคลื่อนตัวหรือแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแล้วกำหนดจุดตรวจสอบ (Trigger level) นอกจากนี้วิธีการก่อสร้างหรือสัญญาการก่อสร้างจะต้องมีความยืดหยุ่นสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้งานก่อสร้างมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และมีการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีที่เป็นระบบ มีความเที่ยงตรง มีความถี่ในการตรวจวัดที่เหมาะสม และมีการตรวจสอบเพื่อประเมินระหว่างผู้เกี่ยวข้องอย่างสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างให้มีความปลอดภัย ซึ่งแนวทางของวิธีดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แนวคิดของการปรับเปลี่ยนวิธีการหรือขั้นตอนการก่อสร้างจากผลการตรวจวัด [5]

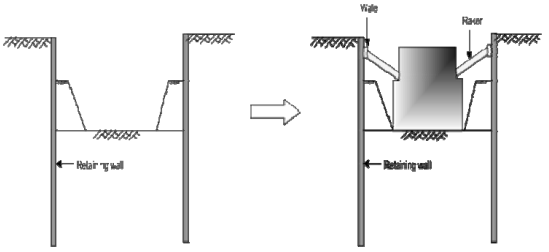
7. กรณีศึกษา

กรณีศึกษาที่นำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพี ในงานก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน โดยมีปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างให้เหมาะสมและมีความปลอดภัย

โครงการ: งานก่อสร้างอาคารจอดรถใต้สนามฟุตบอล

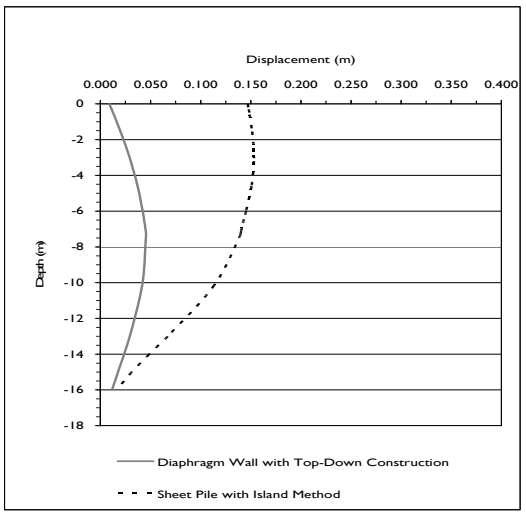
โครงการนี้เป็นงานก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน ขนาดกว้างxยาว = 68x105 ม. จำนวนชั้นใต้ดิน 2 ชั้น โดยชั้นบนเมื่อก่อสร้างเสร็จสามารถใช้เป็นสนามฟุตบอล ความลึกระดับขุดโดยทั่วไปประมาณ -7.0 ม. จากผิวดินเดิม สามารถจอดรถยนต์ได้ 720 คัน มีพื้นที่ใช้สอยรวมประมาณ 45,000 ตร.ม.

แนวคิดการก่อสร้างแบบเดิมที่กำหนดมาเป็นแบบ Island method ซึ่งเป็นการก่อสร้างห้องใต้ดินเริ่มจากตรงกลางสนามฟุตบอลขุดดินโดยมีลาดดินต้านการเคลื่อนตัว เมื่อขุดถึงขอบจึงใช้เสาเข็มพืดเหล็ก (Sheet pile) ปักแล้วทำการค้ำยันกับโครงสร้างที่สร้างจากตรงกลางออกไปด้านนอก ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แนวคิดของการก่อสร้างห้องใต้ดินโดยระบบ Island method

อย่างไรก็ตามวิธีการก่อสร้างแบบนี้จะทำให้ให้เกิดการเคลื่อนตัวที่สูง อาจส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงรอบๆ พื้นที่ก่อสร้างซึ่งมีอาคารที่ไม่ได้สร้างบนฐานรากเสาเข็มรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้วิธีการก่อสร้างโดยใช้ลาดดินด้านกำแพงแบบ Flexible เช่น Sheet pile ในดินเหนียวอ่อนจะทำให้การการทรุดตัวที่สูงของดินบริเวณรอบๆ พื้นที่ก่อสร้าง เมื่อทำการประเมินค่าการเคลื่อนตัวของดินโดยการทำแบบจำลองในโปรแกรม Finite element แล้ว แล้วผู้ทำการก่อสร้างจึงเสนอเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างเป็นการใช้กำแพงแบบแข็งคือ Diaphragm wall กับวิธีการก่อสร้างแบบ Top-down ซึ่งประเมินแล้วว่ามีค่าการเคลื่อนตัวที่น้อยกว่ามาก ทำให้ความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงจากการก่อสร้างมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 9



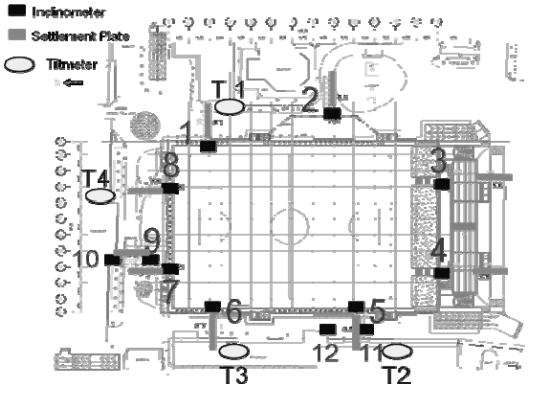
ภาพที่ 9 การประเมินการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินตามวิธีการก่อสร้าง 2 แบบ

วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้พื้นชั้นสนามหญ้าเป็นค้ำยันชั้นเดียว โดยมีช่องเปิดขนาดใหญ่ 4 ช่องเพื่อเร่งเวลาในการก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การก่อสร้างอาคารจอดรถในโครงการใช้พื้นชั้นสนามฟุตบอลเป็นค้ำยัน

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะต้องเตรียมการตรวจวัดพฤติกรรมทางวิศวกรรมปฐพีอย่างเป็นระบบ เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยและเตรียมใช้แผนแก้ไขเมื่อค่าที่วัดได้มีค่าสูงเกินที่ประเมินไว้ เครื่องมือวัดที่ใช้ในโครงการนี้ประกอบด้วย ท่อวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน (Inclinometer) ชุดหมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Settlement point) และเครื่องมือวัดการเอียงตัวของอาคาร (Tiltmeter) ดังแสดงในผังตามภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผังการติดตั้งเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมปฐพีในโครงการ

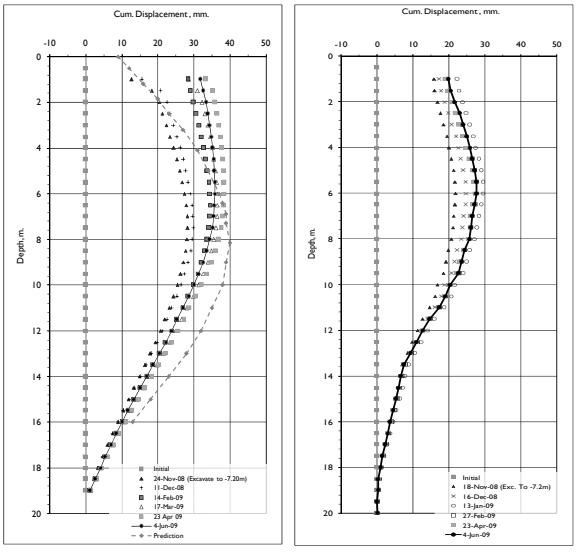
ระหว่างการก่อสร้างได้มีการเก็บข้อมูลการตรวจวัดอย่างสม่ำเสมอ ตัวอย่างผลการตรวจวัดพร้อมทั้งทำการ

เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวกับระยะเวลาในการก่อสร้างแสดงดังนี้

7.1 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินและของดินใช้ท่อวัด Inclinometer ซึ่งทำการติดตั้งในกำแพงกันดิน Diaphragm wall มีความลึกที่ปลายท่อเท่ากับ -16.0 และ -18.5 m มีจำนวน 8 ท่อ และติดตั้งในดินระหว่างกำแพงกันดินกับสิ่งปลูกสร้างที่มีความสำคัญ มีความลึกที่ปลายท่อเท่ากับ -20.0 m จำนวน 4 ท่อ

ตัวอย่างผลการตรวจวัดแสดงในภาพที่ 12 แสดงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและการเคลื่อนตัวของดินข้างกำแพงกันดิน



Inclinometer in D-wall, I5 Inclinometer in soil, I11

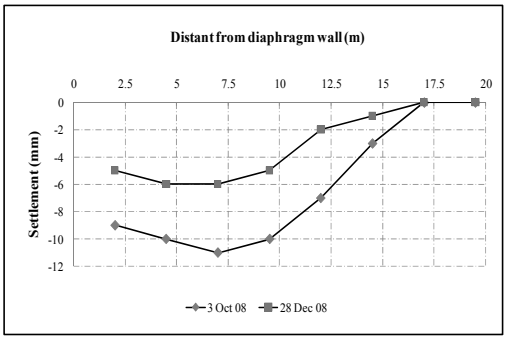
ภาพที่ 12 การเคลื่อนตัวของท่อวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินและของดิน

จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวด้านบนของกำแพงกันดินเกินค่าที่ประเมินเอาไว้ อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่นควบคู่ไปด้วย เช่น อัตราการเพิ่มการเคลื่อนตัว รูปแบบของการเคลื่อนตัว และความเสียหายเชิงโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นกับกำแพง Diaphragm wall

7.2 การทรุดตัวที่ผิวดินรอบๆกำแพงกันดิน

ในงานขุดดินจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดิน รอบๆ กำแพงกันดิน และค่าของการทรุดตัวนี้จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นจากกำแพงกันดิน ในโครงการนี้ได้มีการติดตั้งชุดหมุดวัดค่าการทรุดตัวของผิวดินจำนวน 8 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยหมุดวัดการทรุดตัวติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับกำแพงกันดิน 7-9 หมุดต่อชุด โดยเลือกติดในบริเวณที่ใกล้เคียงกับท่อ Inclinometer เพื่อให้สามารถพิจารณาผลเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินและการเคลื่อนตัวของกำแพง Diaphragm wall มีความสอดคล้องกันเพียงใด และสามารถใช้ค่านี้เพื่อสร้าง Empirical formula เพื่อใช้ประเมินการทรุดตัวกับโครงการอื่นๆ โดยพิจารณาจากผลการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินได้

ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินที่มากที่สุดของโครงการอยู่ในช่วง 5-12 มม. ที่ระยะห่าง 5-7.5 ม. จากกำแพงกันดิน ตามภาพที่ 13

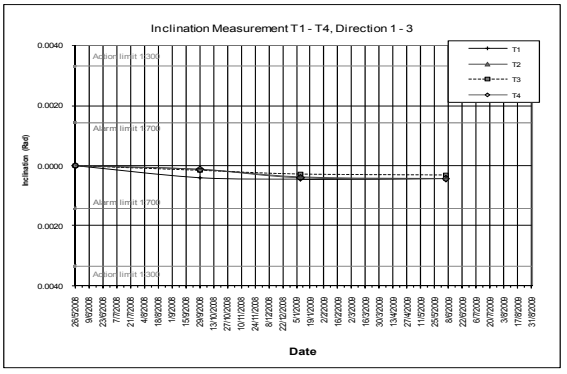


ภาพที่ 13 การทรุดตัวที่ผิวดินของชุดหมุดวัดหมายเลข S1

7.3 ค่าการเอียงตัวของอาคารรอบๆ พื้นที่ก่อสร้าง

งานขุดดินเพื่อก่อสร้างอาคารจอดรถนี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินและการทรุดตัวของดินรอบๆ กำแพงกันดินดังแสดงในหัวข้อ 7.1 และ 7.2 การเคลื่อนตัวนี้อาจส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงภายในระยะห่างประมาณ 12 ม. จากกำแพงกันดินเมื่อวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวดิน จึงต้องทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการเอียงตัวของอาคาร Tiltmeter จำนวน 4 ชุด กระจายไปใน 4 อาคาร ซึ่งผลการตรวจวัดแสดง

ในภาพที่ 14 การเอียงตัวของอาคารมีทิศทางเอียงเข้าหาพื้นที่ก่อสร้าง แต่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน Alarm limit 1:700 ซึ่งถือว่าไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงโครงสร้างอาคาร



ภาพที่ 14 การทรุดตัวที่ผิวดินของชุดหมุดวัดหมายเลข S1

การตรวจวัดในโครงการนี้ได้ดำเนินการอย่างเป็นระบบ และทำการบันทึกค่าในช่วงที่มีกิจกรรมการก่อสร้างที่สำคัญๆ จะเห็นได้ว่ามีการนำผลการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพี มาใช้ประกอบเมื่อเปลี่ยนแบบก่อสร้างจากระบบ Island method มาเป็นวิธีการก่อสร้างแบบ Top-down โดยใช้กำแพงกันดิน Diaphragm wall สามารถเฝ้าระวังพฤติกรรมของกำแพงกันดิน การทรุดตัวของผิวดินและการเอียงตัวของอาคารรอบๆ พื้นที่ก่อสร้างให้มีความปลอดภัยจนโครงการก่อสร้างแล้วเสร็จได้เป็นอย่างดี

8. บทสรุป

จากข้อมูลที่นำเสนอและกรณีศึกษาแสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีสามารถทำให้งานก่อสร้างมีความปลอดภัย ผู้ทำงานก่อสร้างสามารถใช้ผลการตรวจวัดเพื่อทำการปรับเปลี่ยนแผนงานให้งานก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ผลการตรวจวัดยังสามารถใช้เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อใช้ในงานออกแบบสำหรับโครงในลักษณะเดียวกันในอนาคต รวมทั้งสามารถใช้เพื่อประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงเพื่อหาวิธีการป้องกัน

การตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีที่มีประสิทธิภาพ จะต้องเลือกเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับตัวแปรที่ต้องการทราบหรือติดตามพฤติกรรม ผู้ทำการตรวจวัดจะต้องมีประสบการณ์และเป็นผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน และการแปลผลการตรวจวัดจะต้องใช้วิจารณญาณโดยจะต้องพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้าง ความสอดคล้องของผลการตรวจวัดการสภาพแวดล้อม รวมทั้งจะต้องเตรียมพร้อมที่จะแก้ไขสถานการณ์ใช้แผนแก้ไขหรือร่วมกันประเมินสถานการณ์เมื่อผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่าค่าที่ตรวจวัดมีค่าเกินที่ประเมินไว้

9. บรรณานุกรม

[1] Aye ZZ, Submaneewong C and Boonyarak T (2007), Observational Method and Risk Management in Geotechnical Engineering, Seafco-AIT-EIT Seminar on Value of the Observational Method in Geotechnical Engineering in Major Construction Projects, Bangkok

[2] วสท. (2520). ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

[3] วันชัย เทพรักษ์. (2544). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินและตัวอุโมงค์จากการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดิน. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ

[4] Powderham, A.J. (1998), The Observational Method-Application Through Progressive Modification. Journal of Civil Engineering Practice (BSCE/ASCE) Vol 13, No. 2, pp 87-109

[5] Ikuta, Y., Maruoka, M., Aoki, M. & Sato, E. (1994). Application of the observational method to a deep basement excavation using top-down method. Geotechnique 44. No 4, pp 655-664

การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึก

MINIMIZING GROUND MOVEMENT BY USING DEEP SOIL MIXING TECHNIQUE

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

อ่อง วิน เมือง (Aung Win Maung)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]รองประธานฝ่ายบริหาร บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) win@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ :การก่อสร้างโครงสร้างหรือการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในชั้นดินเหนียวอ่อนหรือชั้นทรายหลวมอาจก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในปริมาณมาก การใช้เทคนิคการปรับปรุงกำลังรับแรงของดินโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึกสามารถเพิ่มค่า โมดูลัสอิลาสติคของดินได้ เนื้อหาของบทความประกอบด้วย หลักการออกแบบ ขั้นตอนการก่อสร้าง วิธีการควบคุมคุณภาพของดินที่ปรับปรุง และวิธีการเฝ้าระวังในการก่อสร้าง จากผลที่ได้พบว่าการปรับปรุงกำลังรับแรงของดินสามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถใช้เป็นมาตรการพิเศษในการเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างขณะทำการขุดดิน

ABSTRACT : Ground engineering activities in soft clay or loose sand layer, changing in soil stress, can cause large amount of soil displacement. Soil improvement using deep cement mixing technique is one of the suitable methods to minimize the movement. This paper covers design concept, construction sequence and quality control process involved in deep soil mixing. It also covers construction induced soil movement monitoring. It was found that appropriate soil improving, also serve as an additional safety measure during construction stage, is one of the most effective solutions to minimize construction-induced soil movement.

KEYWORDS : Soil improvement, Ground movement, Deep excavation, Embankment

1. บทนำ

การก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนและการขุดดินที่มีความลึกมากในชั้นดินเหนียวอ่อนจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในดิน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของดินและ การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินบริเวณรอบ ๆ การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีปรับปรุงกำลังเชิงกลแบบลึกเป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับชั้นดินเหนียวอ่อน

ได้มีงานวิจัยที่หาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์พบว่ามีค่าโมดูลัสของดิน (E_{50}) เพิ่มขึ้น เช่น Baker et al, 2005 [1] รายงานว่าค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบมีค่าประมาณ 200 MPa ในช่วงที่เป็นอิลาสติกเมื่อทำการปรับปรุง

ดินเหนียวสวีเดนที่มีกำลังรับแรงเฉือนประมาณ 10 kPa ซึ่งใกล้เคียงกับดินเหนียวกรุงเทพฯ Bergado, D.T. [2] ได้ทำการทดสอบคันดินเหนียวสูง 3 เมตรในชั้นดินกรุงเทพฯ พบว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถลดการทรุดตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนได้ประมาณ 70% และระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ 90% จะอยู่ที่ 1 ปี ในขณะที่ดินที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงจะใช้เวลา 7 ปี

เนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย เทคนิคการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดิน คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุง การทดสอบและควบคุมคุณภาพของงาน การประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินในการลดการเคลื่อนตัวของดิน และกรณีตัวอย่าง

2. เทคนิคการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดิน

หลักการของการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินสามารถทำได้หลายวิธี เช่นบดอัดดินให้แน่น ดูดน้ำออกจากมวลดิน ผสมดินกับวัสดุเสริมแรง การปรับปรุงดินสามารถใช้ได้กับหลายวัตถุประสงค์ เช่น เป็นฐานรากเขื่อนกันดินหรือน้ำ ป้องกันลาดดินพัง เป็นฐานรากคันถนน เสริมความแข็งแรงของกำแพงกันดิน ป้องกันการอูดของดิน ป้องกันการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของดิน เพิ่มความทึบน้ำของดิน เป็นฐานรากโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่สูงมาก เป็นต้น

การเลือกวิธีการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักดินและเครื่องจักรที่ใช้จะพิจารณาจากหลายๆปัจจัยได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติของชั้นดินที่จะทำการปรับปรุง สารผสมที่จะใช้ในการปรับปรุง ลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ข้อกำหนดของดินที่ผ่านการปรับปรุง ข้อจำกัดของพื้นที่ทำงาน ข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม ข้อกำหนดด้านเวลาในการก่อสร้าง เป็นต้น

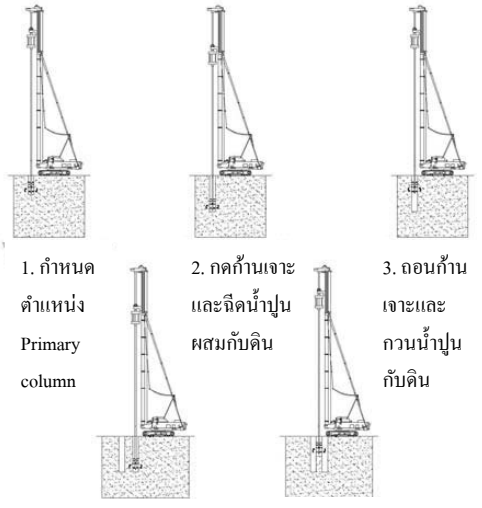
เทคนิคการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินที่อธิบายในบทความนี้ ใช้วิธีการผสมปูนซีเมนต์กับดินด้วยวิธีผสมเชิงกลแบบลึก (Deep soil-cement mechanical mixing) ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถใช้ได้ดีกับดินเหนียวอ่อนและทรายหลวม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์คงที่ตลอดทั้งต้นเท่ากับขนาดใบพัด การควบคุมประสิทธิภาพการผสมดินซีเมนต์สามารถตรวจสอบได้ ไม่เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นระบบเปียกจึงไม่มีผงปูนซีเมนต์ฟุ้งกระจาย เป็นต้น

ลักษณะเครื่องจักรที่ใช้เป็นรถตีนตะขาบ ติดตั้งใบพัดผสมดินซีเมนต์ (Mixing blade) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 – 1.20 ม. มีสายฉีดน้ำปูน (Grouting hose) ต่อไปที่เครื่องผสมและฉีดน้ำปูน (Grouting and mixing plant) ดังแสดงในภาพที่1

การผสมดินซีเมนต์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ 1. กำหนดตำแหน่งที่จะทำการผสมดินซีเมนต์ 2. ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำไว้ในถังพัก 3. ทำการเจาะดินพร้อมกับทำการผสมดินกับน้ำปูนจนถึงความลึกที่กำหนด 4. ถอนใบผสมขึ้นมาเพื่อผสมในตำแหน่งใหม่ 5. ก่อสร้างเสาเข็มทุติยภูมิ (Secondary column) (ในกรณีที่เสาเข็มต้องขบกัน) ระหว่างเสาเข็มปฐมภูมิ (Primary Column) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เครื่องจักรในการผสมเชิงกลแบบลึก



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

ปัจจัยดังต่อไปนี้มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของดินที่ผสมแล้ว ในส่วนของคุณสมบัติดินเดิมได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณน้ำในดิน กำลังรับแรงเฉือนของดิน โครงสร้างดิน ส่วนประกอบทางเคมีและชีวภาพของดิน สำหรับส่วนของปัจจัยในการก่อสร้างได้แก่ อัตราในการกดหรือถอนใบพัดผสมดิน อัตราการฉีดน้ำปูน ความเร็วรอบการหมุนของใบพัด จำนวนใบพัดผสมดิน และปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดิน ซึ่งการกำหนดค่าในปัจจัยต่างๆ ควรจะได้มาจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบในสนาม (Field Trial Test) และ ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

3. คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุง

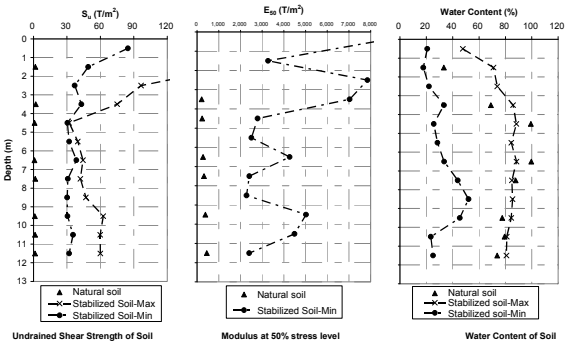
การผสมดินกับปูนซีเมนต์ จะมีขบวนการเกิดขึ้น 2 อย่างคือ ขบวนการปฐมภูมิประกอบด้วย ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ซึ่งจะเป็นการดูดน้ำจากดินที่ทำการผสม และปฏิกิริยาซีเมนต์เทชั่น (Cementation) จะเป็นการแข็งตัวของซีเมนต์และทำหน้าที่ประสานเม็ดดินเข้าด้วยกัน ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักและความหนาแน่นของดินเพิ่มขึ้นด้วย อีกขบวนการหนึ่งคือขบวนการทุติยภูมิ จะเป็นปฏิกิริยาพอซโซลานิค (Pozzolanic) จะเกิดจากแคทไอออนในส่วนที่เหลือจากขบวนการปฐมภูมิรวมตัวกับสารประกอบดินเหนียว (Clay mineral) รวมตัวเป็นสารประกอบที่แข็งตัว (Cementatious agent) ซึ่งจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้ดินที่ผ่านการปรับปรุง [8] การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารประกอบในการปรับปรุงดินเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีข้อดีหลายๆประการคือ 1. มีเสถียรภาพสูงไม่สลายตัวง่าย 2. สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้ดินโดยไม่ต้องผสมกับสารประกอบดินเหนียว 3. สามารถเป็นวัสดุประสานกับดินเกือบทุกชนิด 4. สามารถลดปริมาณน้ำในดินเหนียว 5. เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายมีในท้องตลาด

ตารางที่ 1 แสดงค่าคุณสมบัติของดินหลังจากทำการปรับปรุงกำลังจากงานวิจัยในต่างประเทศ ซึ่งการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทย บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) ได้ทำการก่อสร้างและทดสอบคุณสมบัติที่อายุปูนซีเมนต์ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสที่ 50% ของหน่วยแรงของดินที่ปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น 10-20 เท่าของดินเดิม โดยที่ปริมาณน้ำในดินลดลงประมาณ 2-50% ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์มีใกล้เคียงดินเดิม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง [3], [4], [5], [6], [7]

หมวด	คุณสมบัติดิน	แนวโน้มของคุณสมบัติดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง*
คุณสมบัติทั่วไป (Index)	ปริมาณน้ำในดิน	ลดลงประมาณ 20%
	ความหนาแน่น	เพิ่มขึ้น 3-15%
	การซึมผ่านของน้ำ	เท่าเดิมหรือลดลง
คุณสมบัติด้านกำลัง (Strength)	กำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ ($S_{u\,(lab)}$)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 500 ถึง 2000 kPa
	กำลังรับแรงเฉือนในสนาม ($S_{u\,(field)}$)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 0.3 - 0.6 S_u (lab)
	โมดูลัสของดิน (E_u)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 30 ถึง 100 S_u
	Poisson's ratio	(เท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) มีค่าระหว่าง 0.25 - 0.45
คุณสมบัติด้านการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)	CR&RR	มีค่าเท่ากับดินเดิม
	$\sigma'_p / (q_u)$	มีค่าประมาณ 1.3

หมายเหตุ: * แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินที่ผ่านการผสมเมื่อเทียบกับดินเดิม



ภาพที่ 3 คุณสมบัติดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

4. การทดสอบและควบคุมคุณภาพของงาน

เพื่อที่จะให้ดินที่ผ่านการปรับปรุงมีคุณสมบัติตามที่ออกแบบไว้ จะต้องทำการทดสอบและควบคุมคุณภาพของงานปรับปรุงดินตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมงานก่อสร้าง ระหว่างการก่อสร้างและทำการทดสอบคุณภาพงาน

การควบคุมคุณภาพงานในช่วงการเตรียมงานก่อสร้างทำโดยเลือกเครื่องจักรที่มีความเหมาะสม คือมีกำลังสูง มีความยาวก้านตามที่ออกแบบ มีใบผสมเหมาะสมกับชนิดของดิน มีอัตราการทำงานที่เร็ว ในส่วนของการเลือกวัตถุดิบนั้น ซีเมนต์ที่ใช้ตามปกติจะเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หากใช้วัสดุประสานเป็นประเภทอื่นควรศึกษาพฤติกรรมของสารผสมนั้นก่อนว่ามีความเหมาะสมกับดินที่จะทำการปรับปรุงหรือไม่

ก่อนเริ่มงานก่อสร้างควรมีการคำนวณอัตราส่วนการผสมปูนซีเมนต์กับดิน ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีต่างๆเช่น ศึกษาจากโครงการที่ผ่านมา ดูข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา ทำการทดสอบส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ ทำการผสมดินซีเมนต์ตัวอย่างในพื้นที่ก่อสร้าง (Field pilot test) เพื่อดูว่าอัตราส่วนผสม และวิธีการก่อสร้างนั้นจะทำให้ดินที่ทำการปรับปรุงมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร

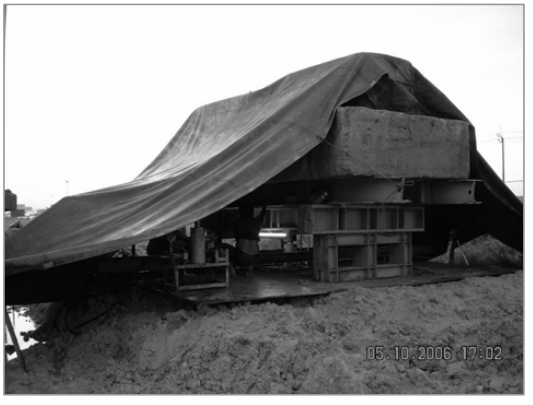
การควบคุมงานระหว่างการก่อสร้างทำสามารถทำได้โดยตรวจสอบปริมาณและอัตราการส่งน้ำปูนที่ผสมกับดิน ตรวจสอบอัตราการกดและถอนของก้านผสมดินรวมทั้งความลึกที่ทำการผสม ตรวจสอบอัตราการหมุนของใบพัดผสมดิน ตรวจสอบระยะเวลาก่อสร้างตั้งแต่ทำการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนถึงเวลาผสมน้ำปูนกับดิน ตรวจสอบตำแหน่งที่ทำการผสมดิน หากก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแบบเสาเข็มเดี่ยว ควรทำการเปิดหน้าดินเพื่อดูขนาดของเสาเข็มและสภาพทั่วไปของงานปรับปรุงดิน ภาพที่ 4 แสดงการวัดขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อทำการเปิดหน้าดินมาแล้ว

การทดสอบคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ทำการผสมสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่ 1. เก็บตัวอย่างลูกปูนก่อนการผสมเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น กำลังรับแรงอัด (UCS Test) ความหนืดของน้ำปูนและความหนาแน่นของน้ำปูน 2. เก็บตัวอย่างดินที่ทำการผสมโดยการเจาะ (Coring) เพื่อดูลักษณะของดินซีเมนต์ความต่อเนื่องของการปรับปรุงกำลัง และสามารถนำตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาเพื่อทดสอบคุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง 3.ทำการถอนเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นมา (Pull-out test) เพื่อดูขนาดความสมบูรณ์ของเสาเข็ม รวมทั้งความต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4 นอกจากนี้ยังสามารถตัดตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย 4.ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Static load test) ดังภาพที่ 5

ในกรณีที่ออกแบบให้เสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงกดหรือแรงอัด



ภาพที่ 4 การทดสอบการถอนเสาเข็มดินซีเมนต์



ภาพที่ 5 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์

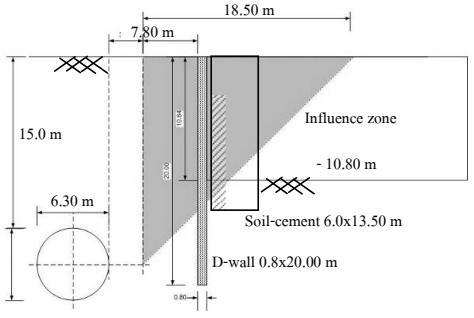
5. การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในการลดการเคลื่อนตัวของดิน (กรณีศึกษา)

เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการลดการทรุดตัวหรือเคลื่อนตัวของดินได้หลายวิธี กรณีตัวอย่างดังต่อไปนี้แสดงถึงวิธีประยุกต์ใช้การปรับปรุงดินเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ

กรณีศึกษาที่ 1 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเมื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินในแนวเขตป้องกันของรฟม. โดยใช้ Diaphragm wall เป็นกำแพงกันดิน ระดับที่ทำการขุดดินทั่วไปสำหรับโครงการนี้กำหนดไว้ที่ -10.80 ม. จากระดับดินเดิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ 6.30 ม. ระยะห่างจากขอบอุโมงค์ถึงขอบกำแพงกันดินที่ใกล้

ที่สุดประมาณ 7.80 ม. ความลึกจากผิวดินถึงขอบอุโมงค์ประมาณ 15.0 ม. ซึ่งแสดงแนวการขุดดินที่อาจมีผลกระทบต่ออุโมงค์ นอกจากใช้กำแพงกันดินระบบ rigid wall แล้ว การปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีผสมลึก (Deep Soil mixing) ปรับปรุงด้านหน้ากำแพง (Excavation side) โดยทำการปรับปรุงดินแบบบล็อค ซึ่งมีความกว้างของการปรับปรุงดินรวม 6.0 ม.มีระดับปลายของการปรับปรุงกำลังอยู่ที่ -13.5 ม. จากผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 6

จากการเปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินด้วยอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Inclinometer) พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้านที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงกำลังมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 20-27 มม. ในขณะที่กำแพงด้านที่มีการปรับปรุงดินมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 15-18 มม.

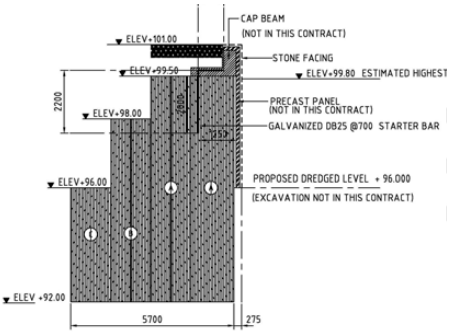


ภาพที่ 6 การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Diaphragm wall

ซึ่งบล็อคเสาเข็มดินซีเมนต์นอกจากจะช่วยลดการเคลื่อนตัวด้านข้างแล้วยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพงานขุดดินป้องกันการเกิดการอูดของดินในบริเวณกำแพงกันดิน

กรณีศึกษาที่ 2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ก่อสร้างแบบบล็อคเป็นกำแพงกันดิน เพื่อใช้ในการขุดดินลึกประมาณ 4 ม. เพื่อลอกตลิ่งริมทะเล ลักษณะดินเป็นทรายหลวม ไม่มีสารเชื่อมประสาน กำแพงเขื่อนแบบปกติที่มีอยู่เดิมแยกออกจากโครงสร้างเนื่องจากแรงดันน้ำ เสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการนี้มีความลึก 8 ม. ก่อสร้างแบบบล็อคกว้าง 5.70 ม. ดังแสดงในรูปที่ 7 อย่างไรก็ตามไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดในโครงการนี้ ค่าการเคลื่อนตัวของ ดินจึงได้มาจากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของดินซึ่งแสดงในตารางที่ 2

จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 200% และดินทรายที่ผ่านการผสมมีลักษณะเป็นบล็อคขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของงานขุดดินให้มีเสถียรภาพ

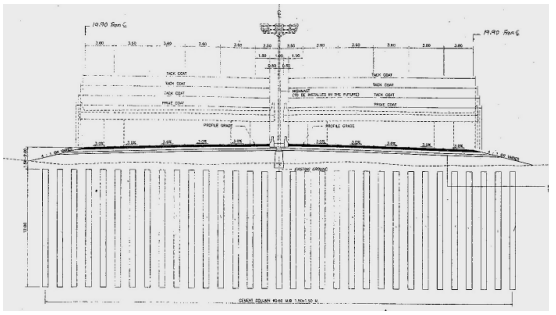


ภาพที่ 7 การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกเพื่อก่อสร้างกำแพงป้องกันตลิ่ง

ตารางที่ 2 ค่าโมดูลัสดินเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

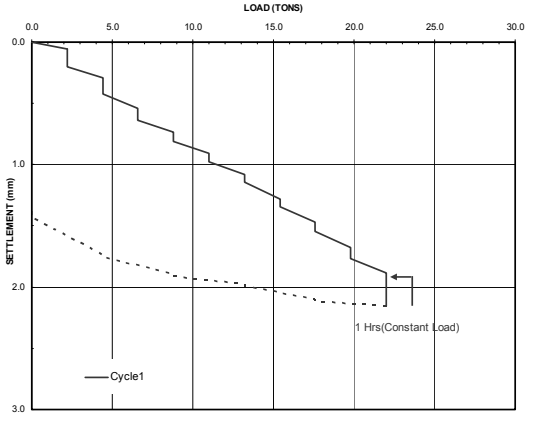
รายการ	ทรายหลวม	ดินซีเมนต์
ค่ากำลังรับแรงเฉือน (T/m^2)	N/A	30 - 110
SPT-N (blow/ft)	3 - 12	N/A
ค่าโมดูลัสของดิน (T/m^2)	2000 - 4000	7000 - 15 000
วิธีการทดสอบ	SPT-N	UCS-cored sample
หมายเหตุ	E_{sand} = 300 N	E_{50} from UCS

กรณีศึกษาที่ 3 ป้องกันการทรุดตัวของคันทางโดยใช้วิธีการทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Wet Process ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 ม. ลึก 12 ม. มีระยะห่างระหว่างต้น 1.50 ม. รองรับคันทางในช่วงต่อกับสะพานดังแสดงในรูปที่ 8



ภาพที่ 8 การเสาเข็มดินซีเมนต์รองรับคันทาง

จากการทดสอบการกดตัวอย่างดินซีเมนต์โดยการเจาะเก็บแบบ UCS Test พบว่าค่าโมดูลัสของดิน (E_{50}) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่าของดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงดังภาพที่ 3 จึงสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กับการลดการเคลื่อนตัวของดินและเพิ่มเสถียรภาพให้กับคันทาง นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์เสาเข็มพบว่าที่น้ำหนักประลัยของหน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์ ($Q_u.A_b$) การทรุดตัวที่หัวเสาเข็มมีค่าประมาณ 2.1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 9 จากข้อมูลพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถใช้เป็นฐานรากโครงสร้างที่มีน้ำหนักไม่สูงมากอย่างเช่นคันทาง คันดินกั้นน้ำ หรือคอสะพาน



ภาพที่ 9 ค่าน้ำหนักและการทรุดตัวเมื่อทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุก

6. บทสรุป

การใช้การปรับปรุงกำลังของดินด้วยวิธี ขั้นตอนการก่อสร้างและวิธีการตรวจสอบคุณภาพของงานที่เหมาะสมสามารถลดการเคลื่อนตัวของดิน เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ทำให้ดินเม็ดหยาบมีการเชื่อมประสานและเพิ่มเสถียรภาพของคันทางหรืองานขุดดินอย่างมีประสิทธิภาพ

การกำหนดค่าปัจจัยต่างๆที่จะใช้การทำงานและการออกแบบควรได้มาจากการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ การทดสอบในสนาม รวมทั้งการเก็บข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติดินซีเมนต์อย่างเป็นระบบเพื่อให้คุณสมบัติดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลังมีค่าตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งข้อมูลที่เก็บควรมีจำนวนที่มากพอและมีการคัดกรองเพื่อได้ข้อมูลที่ดีเพื่อจะนำกลับไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบและเป็นมาตรฐานในการก่อสร้างที่ดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Baker, S., Sallfors, G., Alen, C. 2005. Deformation properties of lime/cement columns; Evaluation from in-situ full scale tests of stabilized clay. Deep Mixing '05. Stockholm, Sweden.

[2] D.T. Bergado, G.A. Lorenzo & T. Duangchan. 2004. Consolidation settlement of Reinforced Embankment on Deep mixing cement piles. 15th Southeast Asian Geotechnical Society Conference. Bangkok. Thailand.

[3] Japan Cement Association, 1994, Soil improvement manual using cement stabilizer (in Japanese), Japan

[4] Kawasaki,T,A. Niina, S. Saitoh&R. Babasaki , 1978, Studies on Engineering Characteristics of cement-base stabilized soil, Takenaka Technical Research Report (in Japanese), Japan

[5] Terashi, M., T. Okumura & T. Mitsumoto, 1977, Fundamental properties of lime treated soil (1st Report), Report of the Port and Harbour Research Institute (in Japanese), Japan

[6] Terashi, M., H. Tanaka, T. Mitsumoto, Y. Niidome & S. Honma, 1980, Fundamental properties of lime and cement treated soil (2nd Report), Report of the Port and Harbour Research Institute (in Japanese), Japan

[7] Terashi, M., H. Tanaka, T. Mitsumoto, S. Honma & T. Ohhashi, 1983, Fundamental properties of lime and cement treated soil (3rd Report), Report of the Port and Harbour Research Institute (in Japanese), Japan

[8] เกษม เพชรเกตุ, 2547, เสาเข็มดินซีเมนต์กับการใช้งาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุดดินเหนียวอ่อน

APPLICATION OF SOIL-CEMENT COLUMN AS SOIL PROTECTION SYSTEM IN SOFT CLAY

ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ (Narong Thasnanipan)[1]

อ่อง วิน เมือง (Aung Win Maung)[2]

ธยานันท์ บุณยรักษ์ (Thayanan Boonyarak)[3]

[1]กรรมการผู้จัดการใหญ่ บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) narong@seafco.co.th

[2]รองประธานฝ่ายบริหาร บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) win@seafco.co.th

[3]วิศวกรปฐพี บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) seafco@seafco.co.th

บทคัดย่อ: เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถนำมาประยุกต์เพื่อเป็นระบบป้องกันดินพังในงานขุดดิน หรือใช้ร่วมกับระบบป้องกันดินพังอื่นๆเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินจากกิจกรรมงานขุดดิน การเลือกใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดินนั้น เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานที่ชัดเจนสำหรับการออกแบบหรือก่อสร้างในลักษณะนี้ ผู้ใช้งานจะต้องมีความเข้าใจถึงคุณสมบัติของวัสดุ พฤติกรรมของวัสดุ วิธีการก่อสร้างโดยละเอียด รวมถึงข้อจำกัดในการใช้งานของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วย บทความนี้นำเสนอภาพรวมของการใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ เทคนิคการก่อสร้าง คุณสมบัติของวัสดุที่ผ่านการปรับปรุง ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง การออกแบบในลักษณะกำแพงกันดิน การควบคุมคุณภาพ ข้อแนะนำในการใช้งาน และกรณีศึกษา ผลการศึกษาพบว่าการใช้ระบบป้องกันดินโดยเสาเข็มซีเมนต์ที่มีเตรียมการที่เหมาะสมเป็นวิธีการที่ทำให้การก่อสร้างมีความสะดวก มีราคาประหยัด และมีผลกระทบด้านการรบกวนต่อพื้นที่ข้างเคียงน้อย นอกจากนี้การใช้งานเสาเข็มดินซีเมนต์ควบคู่กับระบบป้องกันดินพังแบบอื่นๆ สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงได้ประมาณ 30%

ABSTRACT: Soil cement columns can be effectively used as a soil retaining system for excavation work. In addition, it also strengthens surrounding soil of other conventional retaining walls to minimized excavation induced soil movement. However, compared to some other geotechnical works, the information on design and construction of this technique is relatively limited. Therefore, it is necessary to understand the engineering properties, structural behavior, construction sequences and also the limitation of soil-cement retaining wall. The objective of this paper is to present an overview of soil-cement column in excavation works, construction techniques, properties of improved soil,

relationship between mixing factor and stabilized soil's strength, design concept and quality control process. It was found that appropriate designed soil-cement columns can provide convenient, economical and environmental friendly soil retaining system. Furthermore, using soil-cement columns incorporated with other soil retaining systems for geotechnically sensitive projects can reduce excavation-induced soil movement by 30%. Case studies on a number of projects are also presented.
KEYWORDS: Soil improvement, Soil-cement column, Deep excavation

1. บทนำ

การขุดดินลึกในดินเหนียวอ่อนเพื่อก่อสร้างฐานรากหรือห้องใต้ดินจำเป็นที่จะต้องมีระบบป้องกันดินพังที่แข็งแรง มีความสะดวกต่อการขุดดิน และมีราคาที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพการป้องกันดินพัง การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเป็นกำแพงกันดินได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ และบางโครงการในประเทศไทยที่มีสภาพพื้นที่ก่อสร้างที่เหมาะสมก็ได้มีการนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาเป็นกำแพงกันดิน นอกจากนี้เสาเข็มดินซีเมนต์ยังใช้ในการปรับปรุงดินด้านหน้ากำแพงกันดิน เพื่อช่วยลดการเคลื่อนตัวใต้ระดับดินขุด ในพื้นที่ที่ต้องควบคุมการเคลื่อนตัวของดิน เช่น งานขุดดินติดกับแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน งานขุดดินใกล้พื้นที่ประวัติศาสตร์

ข้อดีของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุดดินคือ เกิดเสียงรบกวนน้อยมาก ไม่มีแรงสั่นสะเทือนในขณะการเจาะผสมหรือถอนก้าน ไม่ทำให้เกิดการแทนที่หรือเคลื่อนตัวของดินระหว่างการก่อสร้าง หากใช้วิธีผสมแบบลึก (Deep mixing) ไม่จำเป็นต้องขนดินออกไปทิ้งระหว่างการก่อสร้าง งานก่อสร้างสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องเพราะไม่ติดปัญหาในการขนส่งปูนซีเมนต์ผง งานกำแพงกันดินสามารถใช้เป็นถนนรอบโครงการได้ด้วย

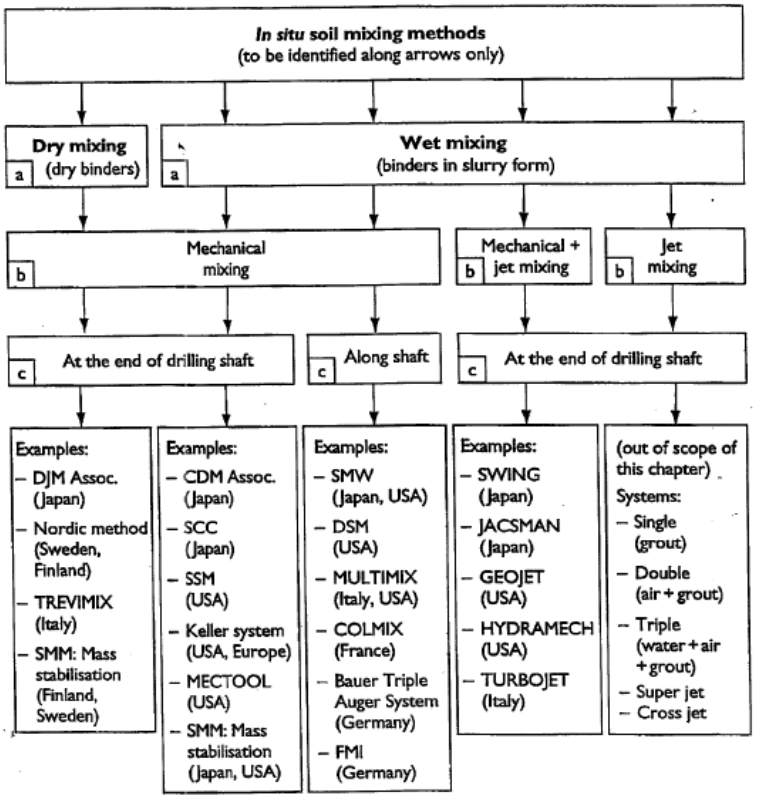
อย่างไรก็ตามการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อใช้ในงานขุดดินก็ยังมีข้อจำกัดหลายด้านที่ผู้ใช้จะต้องพิจารณาอย่างละเอียด เช่น ความลึกสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถลงไปได้ถึงแค่ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay) ซึ่งในชั้นดินกรุงเทพฯ จะมีความลึกในช่วง 13-17 ม. ทำให้ความลึกของปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ถูกจำกัดไว้ที่ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง หากงานขุดดินมีความลึกมากจะไม่สามารถใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงได้ กำลังและความแข็ง (Stiffness) ของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย การควบคุมงานที่ดีเป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับงานปรับปรุงดิน นอกจากนี้ควรต้องเตรียมมาตรการพิเศษเพื่อเพิ่มความคงทนของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อต้องการเปิดหน้าดินบริเวณผิวดินซีเมนต์เนื่องจากวัสดุมีความเปราะมากกว่าดินเดิมและอาจเกิดรอยร้าวจากการหดตัวของซีเมนต์และดินเหนียว (Shrinkage crack) เป็นผลให้กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดลดลงตามระยะเวลา

เนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีต่างๆ คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุง การทดสอบและควบคุมคุณภาพของงาน การประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับปรุง

กำลังรับน้ำหนักของดินเพื่อใช้ในงานขุดดิน กรณีตัวอย่าง และข้อแนะนำการใช้เทคนิคเสาเข็มดินซีเมนต์กับงานขุดดิน

2. เทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

งานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถทำได้หลายวิธีในปัจจุบัน Topolnicki (2004) ได้รวบรวมวิธีการก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งวิธีการก่อสร้างจะจำแนกออกตาม ลักษณะของผงปูนซีเมนต์ (ผงปูนซีเมนต์ / น้ำปูนซีเมนต์) วิธีการผสมดินกับซีเมนต์ (ใบพัดผสม / ใบพัด+Jet / Jet) ตำแหน่งที่ปล่อยซีเมนต์ออก (ปลายท่อ / ข้างท่อ) ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน และมีความเหมาะสมในดินแต่ละประเภทที่ไม่เหมือนกัน



ภาพที่ 1 วิธีการก่อสร้าง Topolnicki (2004)

การเลือกวิธีการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักดินและเครื่องจักรที่ใช้จะพิจารณาจากหลายๆปัจจัยได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติของชั้นดินที่จะทำการปรับปรุง สารผสมที่จะใช้ในการปรับปรุง ลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ข้อกำหนดของดินที่ผ่านการปรับปรุง ข้อจำกัดของพื้นที่ทำงาน ข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม ข้อกำหนดด้านเวลาในการก่อสร้าง เป็นต้น จะเห็นได้ว่ามีวิธีการในการปรับปรุงดินหลายวิธี ในบทความนี้ได้อธิบายวิธีการก่อสร้างหลัก กับระบบที่นิยมในประเทศไทยดังนี้

2.1 วิธีการผสมเชิงกลแบบลึก (Cement Deep Mixing, CDM)

วิธีการผสมเชิงกลแบบลึกเป็นเทคนิคปรับปรุงกำลังของดินโดยใช้ปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสาน (Binder) ผสมเข้ากับน้ำก่อน การผสมดินกับน้ำปูนจะใช้ใบพัด (Mixing blade) ทำหน้าที่ตัดดินและกวนดิน โดยมีการฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ (ประมาณ 5-10 bar) เข้าไปในเนื้อดิน ใบพัดจะทำหน้าที่ผสมน้ำปูนกับดินเข้าด้วยกัน ลักษณะเครื่องจักรที่ใช้เป็นรถตีนตะขาบ ติดตั้งใบพัดผสมดินซีเมนต์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่นิยมใช้อยู่ระหว่าง 0.60 – 1.20 ม. ดังแสดงในภาพที่ 2 มีสายฉีดน้ำปูน (Grouting hose) ต่อไปที่เครื่องผสมและฉีดน้ำปูน (Grouting and mixing plant) ตามภาพที่ 3 ซึ่งหลักการในการผสมดินกับน้ำปูนขณะกำลังเจาะลงในดินแสดงในภาพที่ 4

การผสมดินซีเมนต์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ 1. กำหนดตำแหน่งที่จะทำการผสมดินซีเมนต์ 2. ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำไว้ในถังพัก 3. ทำการเจาะดินพร้อมกับทำการผสมดินกับน้ำปูนจนถึงความลึกที่กำหนด 4. ถอนใบผสมขึ้นมาเพื่อผสมในตำแหน่งใหม่ 5. ก่อสร้างเสาเข็มทุติยภูมิ (Secondary column) (ในกรณีที่เสาเข็มต้องขบกัน) ระหว่างเสาเข็มปฐมภูมิ (Primary Column) ดังแสดงในภาพที่ 5 รูปแบบและจำนวนของก้านผสมอาจมีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมตามลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติของดิน ดังในภาพที่ 6 แสดงรูปแบบต่างๆของใบพัดผสมดินซีเมนต์ที่ใช้ในหลายประเทศ

วิธีผสมเชิงกลแบบลึก (Cement Deep Mixing) เป็นวิธีที่มีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถใช้ได้ดีกับดินเหนียวอ่อนและทรายหลวม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์คงที่ตลอดทั้งต้นเท่ากับขนาดใบพัด การควบคุมประสิทธิภาพการผสมดินซีเมนต์สามารถตรวจสอบได้ การผสมไม่เกิดการแทนที่ของดินหรือไม่เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน ไม่เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นระบบเปียกจึงไม่มีผงปูนซีเมนต์ฟุ้งกระจาย เป็นต้น

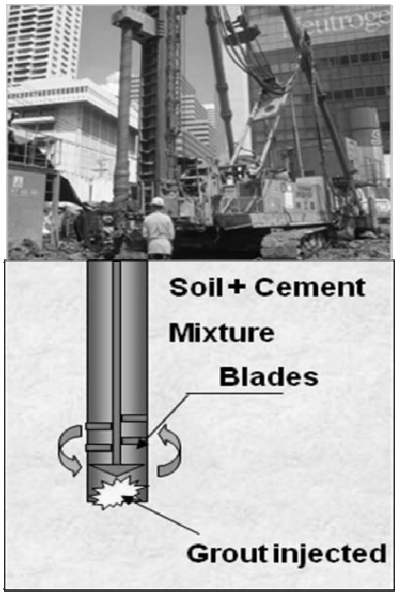
ข้อจำกัดของการผสมเชิงกลแบบลึกคือการผสมในชั้นดินเหนียวแข็งจะไม่สามารถทำการผสมได้ หรือผสมได้ไม่ดีนักเนื่องจากแรงต้านของดินมีค่าสูงความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์จึงถูกจำกัดอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเท่านั้น นอกจากนี้เครื่องจักรที่ใช้มักมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถทำงานในพื้นที่ก่อสร้างที่แคบหรือเล็กได้



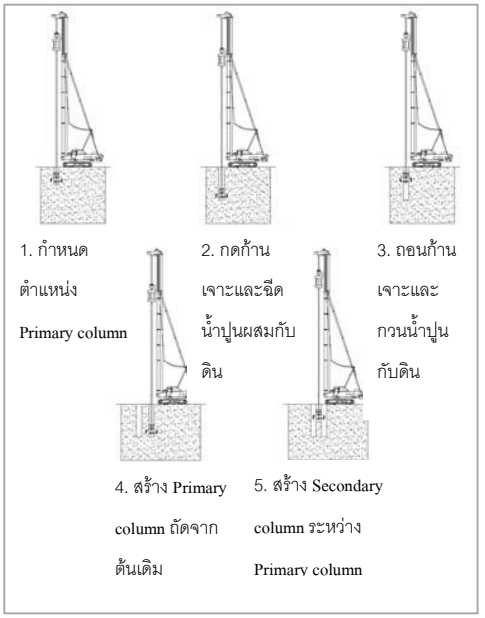
ภาพที่ 2 เครื่องจักรในการผสมเชิงกลแบบลึก



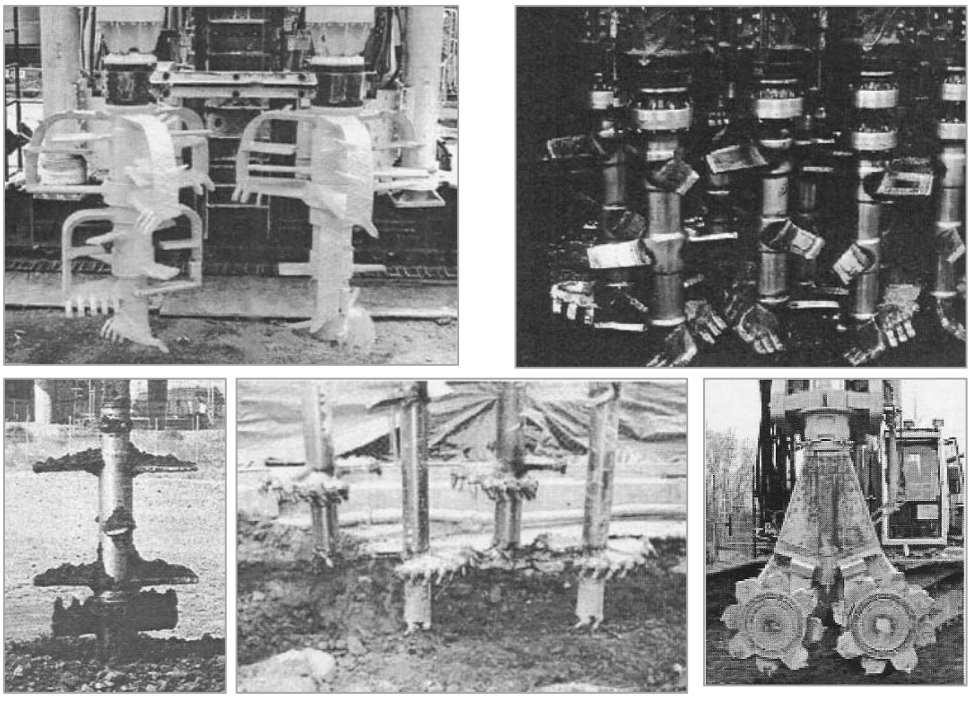
ภาพที่ 3 ปั๊มและเครื่องผสมน้ำปูน



ภาพที่ 4 รูปแบบแสดงการผสมเชิงกลแบบลึก (Deep mixing)



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Deep mixing



ภาพที่ 6 รูปแบบใบพัดในการผสมแบบต่างๆ (Larsson, 2005)

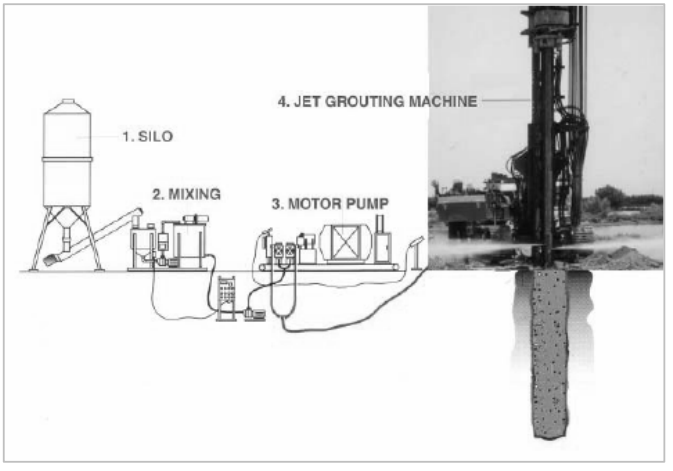
2.2 วิธีการก่อสร้างแบบผสมด้วยน้ำปูนแรงดันสูง (Jet grouting)

การก่อสร้างแบบ Jet grouting เริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ช่วงปี 1980s เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ในช่วงแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถทำได้เพียง 300 mm แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรให้สามารถก่อสร้างให้มีขนาดใหญ่กว่า 4000 mm ได้แล้ว (Imanishi & Yamauchi, 1996)

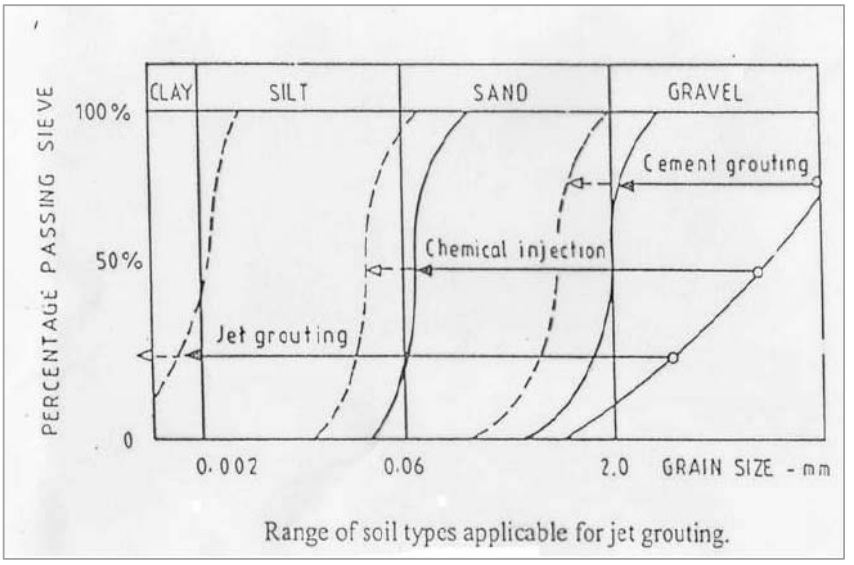
หลักการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์อย่างคร่าวๆ ด้วยวิธี Jet grouting คือผสมปูนซีเมนต์ผงกับน้ำเข้าด้วยกัน ในเครื่องผสมน้ำปูน การผสมน้ำปูนกับดินนั้นจะใช้ปั๊มน้ำปูนแรงดันสูง กำลังสูงสุดของปั๊มอาจสูงกว่า 400 bar (40 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 7 (เกษม เพชรเกตุ, 2547) มีอัตราการไหลของน้ำปูนมากกว่า 50 L/นาที การกำหนดขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ใช้แรงดันสัมพันธ์กับคุณสมบัติของดินเป็นตัวกำหนด สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ แรงดันของน้ำปูนจะมีค่ามากกว่า 200 bar (20 MPA) บางกรณีจะใช้ใบพัดเพื่อกำหนดขนาดเพื่อให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด เช่น วิธีของ Turbojet (Italy) หรือ Geojet (USA)

วิธี Jet grouting สามารถใช้ได้กับดินเกือบทุกรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 8 และมีความลึกมากกว่า 30 ม. ในกรณีที่ต้องการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดใหญ่อาจต้องทำการตัดดินโดยน้ำก่อน (Pre-jet) เพื่อตัดเนื้อดินหรือสลายโครงสร้างดินก่อน โดยปกติแรงดันของ Pre-jet จะใกล้เคียงหรือต่ำกว่าแรงดันในการฉีดน้ำปูน การผสมแบบ Jet grouting นี้ควรพิจารณาความแข็งของดินและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดินด้วย เพื่อปรับแรงดันและปริมาณน้ำปูนที่ใช้ เพื่อควบคุมให้ขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดคงที่

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการผสมแบบ Jet grouting คือรูปร่างหรือขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์อาจไม่คงที่ในชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลง และอาจเกิดการเคลื่อนตัวของดินรอบๆข้างและเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวชั่วคราวในขณะทำการผสม (Imanishi & Yamauchi, 1996 และ เกษม และคณะ, 2544)



ภาพที่ 7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคการก่อสร้างแบบ Jet grouting (เกษม, 2547)



ภาพที่ 8 แสดงช่วงของดินที่สามารถใช้วิธี Jet grouting ในการผสมปรับปรุงคุณภาพดินได้ (เกษม, 2547)

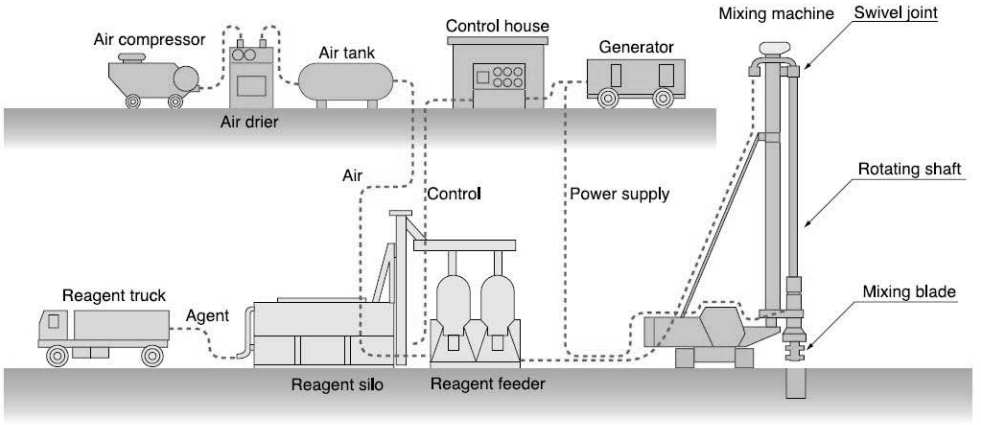
2.3 วิธีการก่อสร้างผสมแห้ง (Dry Jet Mixing, DJM)

การก่อสร้างวิธีนี้นิยมใช้กับดินเหนียวอ่อนมากที่มีปริมาณน้ำในดิน (Water content) สูง และสามารถใช้กับดินที่มีอินทรีย์สาร (Organic soil) วิธีการดังกล่าวมีหน่วยงานหลักใน 2 ประเทศได้กำหนดเป็นมาตรฐานในการก่อสร้างคือประเทศญี่ปุ่น และประเทศนอร์เวย์ (prEN 14679 (2005)

หลักการทำงานของการผสมแบบแห้งคือใช้ใบพัดกวนดินด้วยความเร็วสูงในช่วงที่กดใบพัดเพื่อตัดดินให้ละเอียด โดยที่ใบพัดจะเปิดให้เกิดช่องว่างระหว่างใบพัดกับรูพ่นผงปูนซีเมนต์ในขั้นตอนการกดก้านผสม การผสมและพ่นผงปูนซีเมนต์ใช้ทำในขั้นตอนการถอนก้านผสม โดยที่ผงปูนจะถูกพ่นเข้าไปในช่องว่างที่ดินถูกตัด Aoi & Tsujii (1996) ภาพที่ 9 แสดงหลักการในการผสมแบบแห้ง ใบพัดที่ใช้กับระบบ Dry mix มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั่วไปที่นิยมใช้ในระบบแห้งคือระหว่าง 0.60 – 1.20 ม. ทั้งนี้ขนาดของสว่ายจะพิจารณาขึ้นอยู่กับความแข็งหรือความเหนียวของดินที่จะทำการผสม

ข้อดีของการใช้วิธีการก่อสร้างระบบแห้งคือสามารถก่อสร้างได้เร็ว มีจำนวนเครื่องจักรที่น้อย เครื่องจักรมีขนาดเล็ก สามารถให้กำลังรับแรงในดินที่ดีกว่าระบบเปียกในปริมาณซีเมนต์ต่อปริมาตรดินเท่าๆกัน

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการผสมระบบแห้งอยู่ที่การปรับปรุงดินในบริเวณที่มีปริมาณน้ำในดินน้อย เช่นในดินประเภทลูกรัง หรือทรายแห้ง อาจมีน้ำในดินไม่เพียงพอต่อในการทำปฏิกิริยากับผงปูนซีเมนต์ ในบางกรณีอาจต้องเติมน้ำลงไปเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว (Wiggers & Perzon, 2005) นอกจากนี้การทำให้ผงปูนซีเมนต์มีความแห้งถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อกำลังของดินที่ถูกผสม



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแห้ง (Raito, Inc. [online])

3. คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุง

ปัจจัยดังต่อไปนี้มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของดินที่ผสมแล้วในส่วนของคุณสมบัติดินเดิมได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณน้ำในดิน กำลังรับแรงเฉือนของดิน โครงสร้างดิน ส่วนประกอบทางเคมีและชีวภาพของดิน สำหรับส่วนของปัจจัยในการก่อสร้างได้แก่ อัตราในการกดหรือถอนใบพัดผสมดิน อัตราการฉีดน้ำปูน ความเร็วรอบการหมุนของใบพัด จำนวนใบพัดผสมดิน และปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดิน ซึ่งการกำหนดค่าในปัจจัยต่างๆ ควรจะได้มาจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบในสนาม (Field Trial Test) และ ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

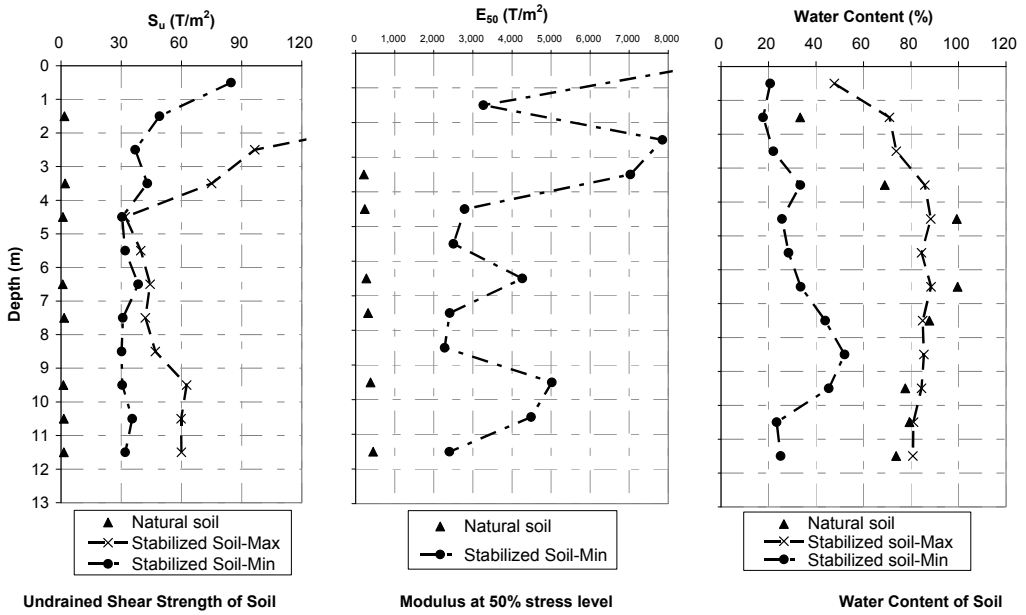
การผสมดินกับปูนซีเมนต์ จะมีขบวนการเกิดขึ้น 2 อย่างคือ ขบวนการปฐมภูมิประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ซึ่งจะเป็นการดูดน้ำจากดินที่ทำการผสม และปฏิกิริยาซีเมนต์เทชั่น (Cementation) จะเป็นการแข็งตัวของซีเมนต์และทำหน้าที่ประสานเม็ดดินเข้าด้วยกัน ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักและความหนาแน่นของดินเพิ่มขึ้นด้วย อีกขบวนการหนึ่งคือขบวนการทุติยภูมิ จะเป็นปฏิกิริยาพอซโซลานิค (Pozzolanic) จะเกิดจากแคทไอออนในส่วนที่เหลือจากขบวนการปฐมภูมิรวมตัวกับสารประกอบดินเหนียว (Clay mineral) รวมตัวเป็นสารประกอบที่แข็งตัว (Cementatious agent) ซึ่งจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้ดินที่ผ่านการปรับปรุง [เกษม, 2547] ภาพที่ 12 แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงตามระยะเวลาในขั้นตอนต่างๆของการใช้ปูนขาวและปูนซีเมนต์เป็นสารผสม

ตารางที่ 1 แสดงค่าคุณสมบัติของดินหลังจากทำการปรับปรุงกำลังจากงานวิจัยในต่างประเทศ ซึ่งการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทย บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน) ได้ทำการก่อสร้างและทดสอบคุณสมบัติที่อายุปูนซีเมนต์ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสที่ 50% ของหน่วยแรงของดินที่ปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น 10-20 เท่าของดินเดิม โดยที่ปริมาณน้ำในดินลดลงประมาณ 2-50% ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์มีใกล้เคียงดินเดิม

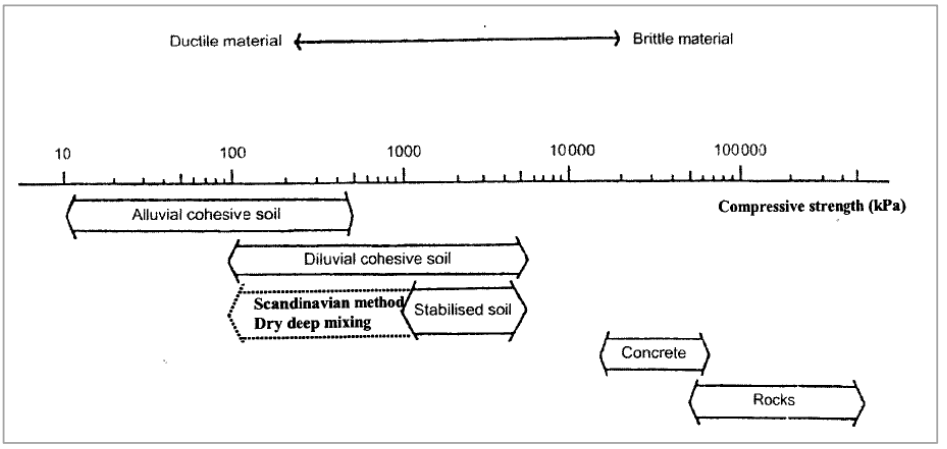
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง [JCA, 1994; Kawasaki et al., 1978, Terashi et al., 1977, 1980,1983]

หมวด	คุณสมบัติดิน	แนวโน้มของคุณสมบัติดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง*
คุณสมบัติทั่วไป (Physical properties)	ปริมาณน้ำในดิน	ลดลงประมาณ 20%
	ความหนาแน่น	เพิ่มขึ้น 3-15%
	การซึมผ่านของน้ำ	เท่าเดิมหรือลดลง
คุณสมบัติด้านกำลัง (Engineering properties)	กำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ ($S_{u\,(lab)}$)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ500 ถึง 2000 kPa
	กำลังรับแรงเฉือนในสนาม ($S_{u\,(field)}$)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 0.3 - 0.6 S_u (lab)
	โมดูลัสของดิน (E_u)	(เพิ่มขึ้น) มีค่าประมาณ 175 ถึง 500 S_u
	Poisson's ratio	(เท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) มีค่าระหว่าง 0.25 - 0.45
คุณสมบัติด้านการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)	CR&RR	มีค่าเท่ากับดินเดิม
	$\sigma'_p / (q_u)$	มีค่าประมาณ 1.3

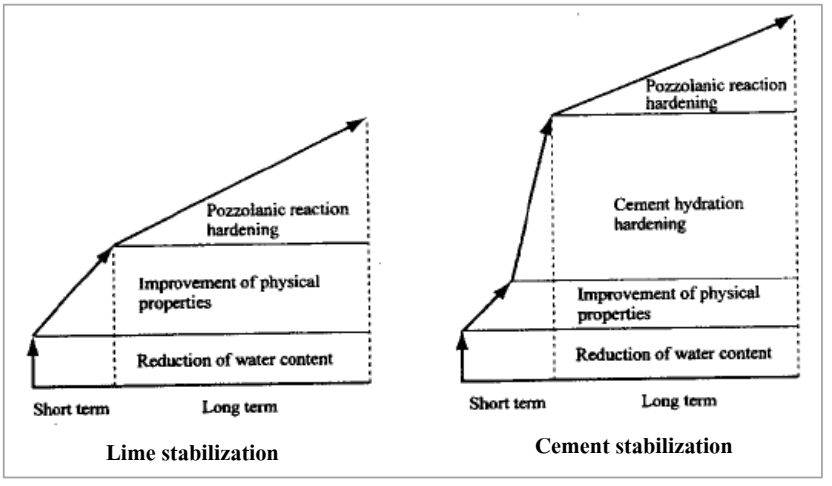
หมายเหตุ: * แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินที่ผ่านการผสมเมื่อเทียบกับดินเดิม



ภาพที่ 10 คุณสมบัติดินเหนียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ



ภาพที่ 11 กำลังรับแรงอัดของดินที่ผ่านการปรับปรุง (After Honjo, 1982)



ภาพที่ 12 การพัฒนากำลังของดินผสมปูนขาวและดินผสมปูนซีเมนต์ (After Kitasume, 2005)

Honjo 1982 ได้นำเสนอกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ (รูปที่ 11) ได้แก่ ดินเหนียว คอนกรีตและหิน พบว่าดินซีเมนต์มีพฤติกรรมอยู่ระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ ซึ่งการเลือก Failure strain ในการออกแบบจะต้องพิจารณาข้อมูลในส่วนนี้ด้วย

Terashi et al., 1980 นำเสนอคุณสมบัติทางกำลังรับแรงดึงของดินผสมซีเมนต์ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงมีค่าประมาณ 0.15 Q_u ในขณะที่กำลังรับแรงดัดของดินผสมซีเมนต์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.10-0.60 Qu

ในด้านการรับแรงระยะยาวนั้นได้มีผู้ทำการวิจัยหลายท่านได้แก่ CDIT, 1999; Terashi & Kitazume, 1992 และ Yoshida et al., 1992 ทำการทดสอบการบ่มดินซีเมนต์และทดสอบตั้งแต่อายุดินซีเมนต์ 7 วัน จนถึง 5,000 วัน พบว่ากำลังของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นแบบแปรผันกับเวลาในรูปแบบ Logarithm

การผสมดินซีเมนต์ในกรณีที่ดินเดิมเป็นดินเหนียวอ่อนนั้น ค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of internal friction) จะมีค่าเท่ากับ 0 (ศูนย์) ส่วนในทรายจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมของทราย (Niina et al., 1977)

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการกำลังของดินที่ผ่านการปรับปรุง

มีหลายๆปัจจัยที่ส่งผลให้กำลังรับแรงของดินซีเมนต์มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยในการผสมดินซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดิน

หมวด	**ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง**
1. คุณสมบัติของวัสดุผสม	ชนิดของวัสดุผสม
	คุณภาพของวัสดุผสม
	น้ำที่ผสมและสารผสมเพิ่มคุณสมบัติ
2. คุณสมบัติของสภาพของดินที่จะผสม	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ผสม
	ปริมาณอินทรียสาร
	ความเป็นกรด-ด่างของดิน
	ปริมาณน้ำในดิน
3. การผสมดินกับวัสดุผสม	อัตราการผสม (Degree of mixing)
	รูปร่างและลักษณะของใบพัด
	ระยะเวลาในการผสม
	ปริมาณวัสดุที่ใช้ผสม
4. สภาพการบ่มของดินซีเมนต์	อุณหภูมิที่บ่ม
	ระยะเวลาในการบ่ม
	ความชื้นในดิน

ในหมวดแรกด้านคุณสมบัติของวัสดุผสมมีวัสดุหลายชนิดที่สามารถใช้ในการปรับปรุงดิน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และเถ้าลอย ในบทความนี้จะเน้นเฉพาะการใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงดิน เนื่องจากมีข้อดีหลายๆประการคือ 1. มีเสถียรภาพสูงไม่สลายตัวง่าย 2. สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้ดินโดยไม่ต้องผสมกับสารประกอบดินเหนียว 3. สามารถเป็นวัสดุประสานกับดินเกือบทุกชนิด 4. สามารถลดปริมาณน้ำในดินเหนียว 5. เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายมีในท้องตลาด

การกำหนดสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) มีผลต่อกำลังรับแรงของดินและความหนาแน่น การผสมระบบแห้งที่มีค่า w/c = 0 จึงมีแนวโน้มจะให้กำลังที่สูงที่สุด สำหรับการผสมระบบเปียกเชิงกล

และ Jet grouting ค่า w/c ที่นิยมใช้ = 1 ทั้งนี้การเลือก w/c จะพิจารณาตามความสามารถในการไหลของน้ำปูน ระยะเวลาในการแข็งตัว และปริมาณน้ำในดินที่จะผสมเป็นหลัก ภาพที่ XX แสดงกำลังของดินซีเมนต์ของ w/c ระหว่าง 1 ถึง 2

ปัจจัยด้านคุณสมบัติของดินในเชิงกายภาพ Niina et al., 1977 ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของทรายต่อดินเหนียวต่อกำลังของดินพบว่าปริมาณทรายที่มีสัดส่วน 60% จะให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่สูงที่สุดและปริมาณน้ำในดินที่สูงจะทำให้กำลังรับแรงของดินต่ำกว่าในดินเหนียว สำหรับคุณสมบัติเชิงเคมี มีผลต่อกำลังของดินที่ผ่านการปรับปรุงดังนี้ เกษม และคณะ 2544 ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดินที่จะทำการผสมด้วยปูนซีเมนต์ พบว่า ปริมาณของ NaCl ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังของดิน ในขณะที่ปริมาณอินทรียสารกลับมีผลทำให้กำลังรับแรงของดินลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอินทรียสารลงไปในดิน ในกรณีที่ดินมีสภาพเป็นกรด (pH ต่ำกว่า 7) จะทำให้กำลังรับแรงของดินลดลง

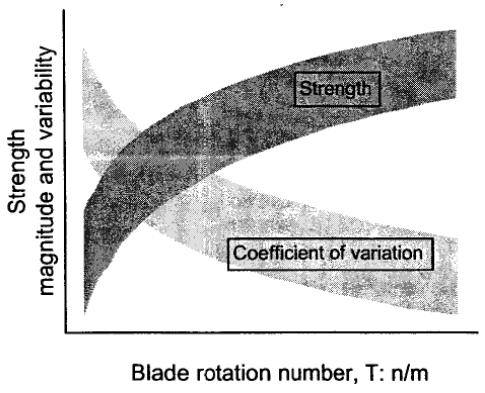
การผสมดินกับวัสดุผสมก็ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่แม้ว่าจะมีข้อกำหนดค่าต่างๆให้เหมือนกัน แต่ผู้ก่อสร้างแต่ละรายอาจทำให้กำลังของดินที่ได้มีค่าไม่เท่ากัน อัตราการผสม (Degree of mixing) และระยะเวลาในการผสม ภาพที่ 13 และ 14 แสดงจำนวนรอบการผสมต่อกำลังและความแปรปรวนของดินซีเมนต์ (Larsson, 2005) และระยะเวลาในการผสมดินซีเมนต์ (Nakamura et al., 1982) จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการผสมที่มากขึ้นและจำนวนรอบการผสมที่มากขึ้นจะทำให้กำลังของดินซีเมนต์สูงมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความแปรปรวนจะลดลง รูปร่าง รูปแบบและความหนาของใบพัดผสมดินซีเมนต์ก็ถือเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อกำลังและความสม่ำเสมอ Dong et al., 1996 ได้ทำการทดสอบใบพัดขนาดและความหนาไม่เท่ากัน โดยควบคุมอัตราการกดและรอบหมุนให้คงที่พบว่า ในรูปร่างของใบพัดที่เหมือนกัน ใบพัดที่บางจะผสมดินให้มีกำลังที่สูงกว่า และรูปร่างใบพัดที่ออกแบบให้มีระยะที่เหมาะสมในการกวนดินและมีใบพัดต้านการหมุนตามใบผสม (Anti-rotation vane) จะให้กำลังที่สูงกว่าใบพัดที่หมุนทางเดียวกันเพียงอย่างเดียว

การบ่มดินซีเมนต์ที่ดีจะทำให้กำลังเพิ่มขึ้นในระยะยาว Kawasaki et al., 1981 ได้ทำการทดสอบผสมซีเมนต์กับดินหลายชนิดพบว่า กำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในดินทุกประเภท โดยปริมาณซีเมนต์ที่มากกว่าจะมีอัตราการเพิ่มตามระยะเวลาที่มากกว่า ในด้านอุณหภูมิการบ่ม Saito et al., 1980 พบว่าดินที่มีอุณหภูมิใต้ดินสูงกว่าจะให้กำลังรับน้ำหนักที่สูงกว่า

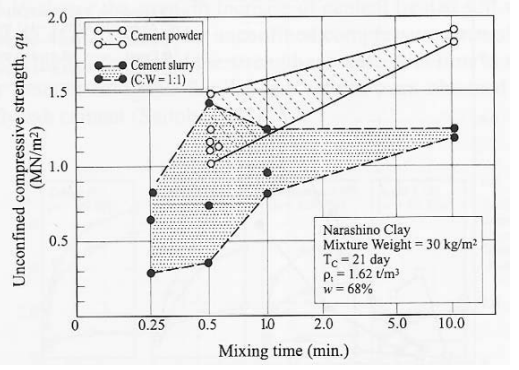
Larsson (2005) ได้ทำการสรุปปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินที่ผสมทั้งระบบแห้งและระบบเปียกจากการทบทวนงานวิจัยและทำการวิจัยเพิ่มเติมไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของดินที่จะทำการผสมและเทคนิคที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์มีผลต่อกำลังรับแรงของดินมากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม การทำนายกำลังรับแรงของดินซีเมนต์จึงไม่มีสูตรตายตัวที่แน่นอน จึงควรมีการทำการทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและในสนามก่อนเพื่อจะได้แนวทางในการกำหนดกำลังรับแรงของดินซีเมนต์

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของการปรับปรุงดินแบบผสม (Larsson, 2005)

ปัจจัยในการผสม	ผลต่อกำลังของดินที่ปรับปรุง
รูปร่างและขนาดของใบผสม กับการพ่นวัสดุผสม	มีผลมากที่สุด
คุณสมบัติของดินที่ทำการผสม	มีผลมากที่สุด
พลังงานที่ให้เมื่อทำการผสมดินซีเมนต์	มีผลมากที่สุด
อัตราการกด/ถอนก้านผสม	มีผลมาก
จำนวนใบพัดที่ผสม	มีผลมาก
ปริมาณวัสดุที่ผสม	มีผลมาก
ปริมาณอากาศที่ใช้พ่นผงวัสดุผสม	มีผลมาก
รูปแบบของใบพัด	มีผลปานกลาง
ชนิดของวัสดุผสม	มีผลปานกลาง
ความเร็วการผสมของใบพัด	มีผลน้อย
แรงดันอากาศ	มีผลน้อย



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการหมุนกับกำลังของดิน (Larsson, 2005)



ภาพที่ 14 ระยะเวลาในการผสมกับกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ (Nakamura et al., 1982)

5. การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดิน

การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการขุดดินควรจะต้องพิจารณาทั้งการออกแบบเสถียรภาพของกำแพงกันดิน และการวิเคราะห์ผลกระทบข้างเคียงที่เกิดจากการขุดดิน โดยทั่วไปจะถือว่าเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีพฤติกรรมแบบกำแพงให้น้ำหนักตัวเอง (Gravity wall) เนื่องจากดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ากำลังรับแรงดึงและแรงดัดหลายเท่า (Terashi et al., 1980) จึงไม่ควรออกแบบให้ระบบป้องกันดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงดัดหรือแรงดึงโดยตรง โดยทั่วไปจะใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ใน

รูปแบบกำแพงหรือแบบบล็อค ให้มีระยะขบกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ 50-100 มม. เพื่อป้องกันการไหลของดินหรือน้ำและเพื่อลดพื้นที่ ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง

5.1 การคำนวณเสถียรภาพและแรงที่เกิดขึ้นด้วยวิธี Conventional method

การคำนวณเสถียรภาพด้วยวิธีการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาภาพรวมของรูปร่าง ขนาดและความลึกของดินซีเมนต์ ว่าสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นจากการขุดดินได้หรือไม่ และมีเสถียรภาพเพียงพอหรือไม่ วิธีการพิจารณาด้วยวิธีนี้จะถือว่ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังเท่ากันตลอดโดยใช้วิธีเฉลี่ยกำลังรับแรงของดิน กับดินซีเมนต์โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างต้นเป็นกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของกำแพง หัวข้อต่อไปนี้เป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการคำนวณ

5.1.1 เสถียรภาพจากแรงภายนอก

- Sliding failure resistance
- Overturning failure resistance
- Bearing capacity of retaining wall
- Slip circle analysis

5.1.2 หน่วยแรงภายในกำแพงกันดิน

- Toe pressure
- Shear stress analysis
- Extrusion of untreated soil (through the gap of wall)

5.1.3 คำนวณการทรุดตัวของกำแพง

- Immediate settlement
- Long term settlement

5.2 การคำนวณเสถียรภาพและแรงที่เกิดขึ้นด้วยวิธี Finite element

เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธี Conventional method ยังไม่สามารถพิจารณาผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง รวมถึงการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินรอบๆ พื้นที่ขุดดินได้ จึงควรมีการคำนวณโดยละเอียดอีกครั้งด้วยวิธี Finite element analysis เพื่อศึกษาผลกระทบต่อพื้นที่รอบข้าง โดยจะต้องประเมินและหาทางป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียงจากการขุดดิน การคำนวณโดยวิธีนี้จะทำแบบจำลองการก่อสร้างในคอมพิวเตอร์ โดยเลือกใช้ตัวแปรให้มีความเหมาะสมกับสภาพและเงื่อนไขที่ใช้งาน ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นจะต้องป้อนเพื่อคำนวณประกอบด้วย

- รูปร่าง ขนาด ความลึก ระยะ ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ และโครงสร้างข้างเคียง
- ชั้นดินและคุณสมบัติทางกายภาพของดิน รวมทั้งคุณสมบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์

- กำหนดขั้นตอนการก่อสร้าง และระบบค้ำยัน
- กำหนดน้ำหนักจรบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง
- กำหนดข้อมูลระดับน้ำใต้ดิน หรือระดับน้ำภายนอกในกรณีที่อยู่ติดลำน้ำธรรมชาติ
- คุณสมบัติ ระยะห่าง ขนาดของโครงสร้างใต้ดินอื่นๆในบริเวณข้างเคียง

การคำนวณด้วยวิธีนี้มักใช้ในกรณีที่มีโครงสร้างข้างเคียงทั้งบนดินและใต้ดิน เช่น อุโมงค์ เสาเข็ม สถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น เพื่อพิจารณาถึงแรงกระทำที่เกิดจากงานขุดดินต่อโครงสร้างเหล่านี้และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างข้างเคียงว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่

5.3 เขียนข้อกำหนดเฉพาะงาน

การใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละโครงการจะมีความแตกต่างกัน ตามลักษณะของชั้นดิน น้ำใต้ดินและน้ำในลำน้ำธรรมชาติ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ลักษณะการใช้งานและข้อจำกัดอื่นๆ ในแต่ละพื้นที่ก็จะไม่เหมือนกัน รวมทั้งกำลังสุดท้ายที่ต้องการของดินซีเมนต์สำหรับการใช้งานไม่ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์จะเป็นโครงสร้างชั่วคราวหรือโครงสร้างถาวร ข้อกำหนดเฉพาะงานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์และ เพื่อกำหนดขั้นตอนในการขุดดินให้สอดคล้องกับการออกแบบและวิเคราะห์ผลที่ได้

ข้อกำหนดเฉพาะงานมักประกอบด้วย ช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในงาน ประเภทของวัสดุผสม กำลังของดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน การเสริมแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยเหล็กรูปพรรณ (ถ้ามี) การทดสอบและข้อกำหนดในการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ การติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (Inclinometer) และข้อกำหนดอื่นๆ เพื่อให้งานก่อสร้างมีความสมบูรณ์

6. การทดสอบและควบคุมคุณภาพของงาน

เพื่อที่จะให้ดินที่ผ่านการปรับปรุงมีคุณสมบัติตามที่ออกแบบไว้ จะต้องทำการทดสอบและควบคุมคุณภาพของงานปรับปรุงดินตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมงานก่อสร้าง ระหว่างการก่อสร้าง และทำการทดสอบคุณภาพงาน

การควบคุมคุณภาพงานในช่วงการเตรียมงานก่อสร้างทำโดย เลือกเครื่องจักรที่มีความเหมาะสม คือ มีกำลังสูง มีความยาวก้านตามที่ออกแบบ มีใบผสมเหมาะสมกับชนิดของดิน มีอัตราการทำงานที่เร็ว ในส่วนของการเลือกวัตถุดิบนั้น ซีเมนต์ที่ใช้ตามปกติจะเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หากใช้วัสดุประสานเป็นประเภทอื่นควรศึกษาพฤติกรรมของสารผสมนั้นก่อนว่ามีความเหมาะสมกับดินที่จะทำการปรับปรุงหรือไม่

ก่อนเริ่มงานก่อสร้างควรมีการคำนวณอัตราส่วนการผสมปูนซีเมนต์กับดิน ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีต่างๆเช่น ศึกษาจากโครงการที่ผ่านมา ดูข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา ทำการทดสอบส่วนผสมใน

ห้องปฏิบัติการ ทำการผสมดินซีเมนต์ตัวอย่างในพื้นที่ก่อสร้าง (Field pilot test) เพื่อดูว่าอัตราส่วนผสมและวิธีการก่อสร้างนั้นจะทำให้ดินที่ทำการปรับปรุงมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร

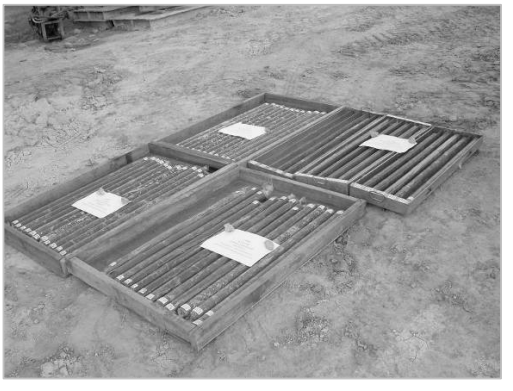
การควบคุมงานระหว่างการก่อสร้างทำสามารถทำได้โดย ตรวจสอบปริมาณและอัตราการส่งน้ำปูนที่ผสมกับดิน ตรวจสอบอัตราการกดและถอนของก้านผสมดินรวมทั้งความลึกที่ทำการผสม ตรวจสอบอัตราการหมุนของใบพัดผสมดิน ตรวจสอบระยะเวลาก่อสร้างตั้งแต่ทำการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนถึงเวลาผสมน้ำปูนกับดิน ตรวจสอบตำแหน่งที่ทำการผสมดิน หากก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นแบบเสาเข็มเดี่ยว ควรทำการเปิดหน้าดินเพื่อดูขนาดของเสาเข็มและสภาพทั่วไปของงานปรับปรุงดิน ภาพที่ 16 แสดงการวัดขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อทำการเปิดหน้าดินมาแล้ว

การทดสอบคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ทำการผสมสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่

1. เก็บตัวอย่างน้ำปูนใส่ในแบบก่อนการผสมกับดินเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น กำลังรับแรงอัด (UCS Test) ความหนืดของน้ำปูนและความหนาแน่นของน้ำปูน
2. เก็บตัวอย่างดินที่ทำการผสมโดยการเจาะ (Coring) เพื่อดูลักษณะของดินซีเมนต์ ความต่อเนื่องของการปรับปรุงกำลัง ในกรณีที่เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดและความลึกมากจะใช้วิธีเจาะ 4 รู (ภาพที่ 15 และ 16) ตามปกติจะใช้กับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.0 m ขึ้นไปและสามารถนำตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลัง (ภาพที่ 17)
3. ทำการถอนเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นมา (Pull-out test) ดังภาพที่ 18 เพื่อตรวจสอบความยาว (ภาพที่ 19) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ภาพที่ 20) ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (ภาพที่ 21) รวมทั้งความต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถตัดตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย
4. ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Static load test) ดังภาพที่ 22 ในกรณีที่ออกแบบให้เสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงกดหรือแรงอัด



ภาพที่ 15 การเจาะ 4 รูในเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเก็บตัวอย่างตรวจสอบความสมบูรณ์



ภาพที่ 16 ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เจาะเก็บขึ้นมา



ภาพที่ 17 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เจาะเก็บ



ภาพที่ 18 การถอนเสาเข็มดินซีเมนต์



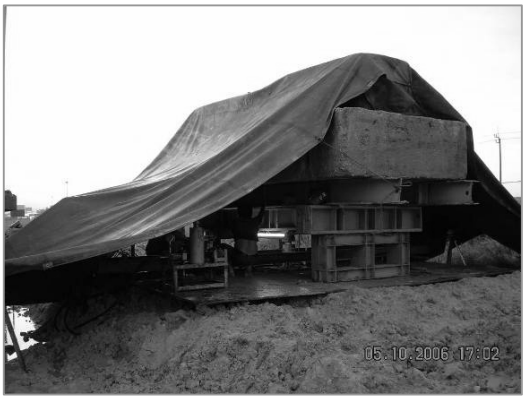
ภาพที่ 19 การวัดความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถอนขึ้นมา



ภาพที่ 20 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถอนขึ้นมา



ภาพที่ 21การผ่าเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอ



ภาพที่ 22 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์

7. การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในการลดการเคลื่อนตัวของดิน (กรณีศึกษา)

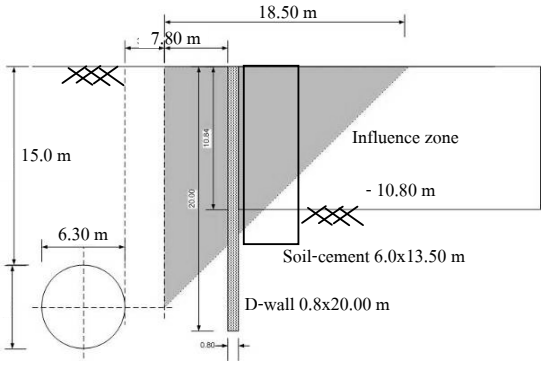
เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการลดการทรุดตัวหรือเคลื่อนตัวของดินได้หลายวิธี กรณีตัวอย่างดังต่อไปนี้แสดงถึงวิธีประยุกต์ใช้การปรับปรุงดินเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ

กรณีศึกษาที่ 1 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเมื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินในแนวเขตป้องกันของรฟม. โดยใช้ Diaphragm wall เป็นกำแพงกันดิน

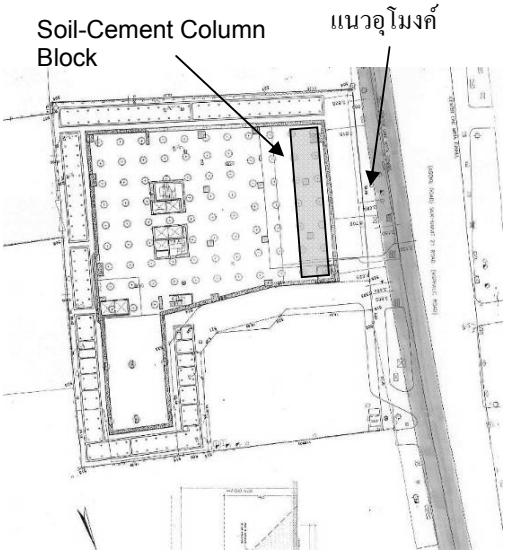
วิธีการนี้ได้มีการใช้ 2 โครงการ ตามแนวของเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดิน

กรณีที่ 1.1 ระดับที่ทำการขุดดินทั่วไปสำหรับโครงการนี้กำหนดไว้ที่ -10.80 ม. จากระดับดินเดิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ 6.30 ม. ระยะห่างจากขอบอุโมงค์ถึงขอบกำแพงกันดินที่ใกล้ที่สุดประมาณ 7.80 ม. ความลึกจากผิวดินถึงขอบอุโมงค์ประมาณ 15.0 ม. ซึ่งแสดงแนวการขุดดินที่อาจมีผลกระทบต่ออุโมงค์ นอกจากใช้กำแพงกันดินระบบ rigid wall แล้ว การปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีผสมลึก (Deep Soil mixing) ปรับปรุงด้านหน้ากำแพง (Excavation side) โดยทำการปรับปรุงดินแบบบล็อค ซึ่งมีความกว้างของการปรับปรุงดินรวม 6.0 ม.มีระดับปลายของการปรับปรุงกำลังอยู่ที่ -13.5 ม. จากผิวดิน ดังแสดงในภาพที่ 23

จากการเปรียบเทียบข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินด้วยอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Inclinometer) พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้านที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงกำลังมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 20-27 มม. ในขณะที่กำแพงด้านที่มีการปรับปรุงดินมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 15-18 มม.



Section

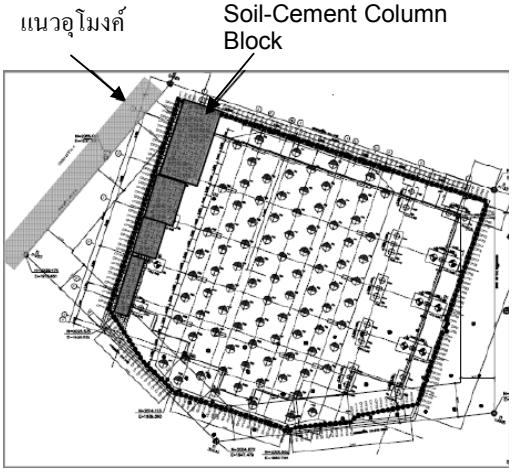


Plan

ภาพที่ 23 การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Diaphragm wall

กรณีที่ 1.2 ระดับที่ทำการขุดดินทั่วไปสำหรับโครงการนี้กำหนดไว้ที่ -10.20 ม. จากระดับดินเดิม โดยที่งานขุดดินของโครงการนี้อยู่ในพื้นที่ควบคุมของแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมีอุโมงค์คู่ในลักษณะซ้อนกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ 6.30 ม. ระยะห่างจากขอบอุโมงค์ถึงขอบกำแพงกันดินที่ใกล้ที่สุดประมาณ 7.00 ม. ความลึกจากผิวดินถึงขอบอุโมงค์ตัวบนประมาณ 10.5 ม. กำแพงกันดินที่ใช้เป็นเสาเข็มเจาะแบบเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile) ซึ่งถือว่าเป็นระบบ rigid wall จากโครงการในกรณีที่ 1.1 สามารถลดการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ได้ จึงได้เสนอการปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีผสมลึก ปรับปรุงด้านหน้ากำแพง (Excavation side) ในรูปแบบบล็อค ซึ่งมีความกว้างของการปรับปรุงดินจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินโดยความกว้างกำแพงดินซีเมนต์ที่มากที่สุดเท่ากับ 7.1 ม. บริเวณที่ใกล้กับอุโมงค์รถไฟใต้ดิน และมีความหนา 3.6 ม. ในส่วนที่ห่างจากอุโมงค์ออกไปดังแสดงในภาพที่ 24 โดยที่ระดับปลายของการปรับปรุงกำลังอยู่ที่ -13.5 ม. จากผิวดิน

ข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินที่วัดโดย Inclinometer 4 ชุดในโครงการ แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินด้านที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงกำลังมีการเคลื่อนตัวในแนวราบอยู่ในช่วง 15-17 มม. ในขณะที่กำแพงด้านที่มีการปรับปรุงดินมีการเคลื่อนตัวในแนวราบอยู่ในช่วง 11-12 มม. เมื่อพิจารณาระดับการขุดดินประมาณ -6.50 ม. ซึ่งสอดคล้องกับกรณีศึกษาที่ 1.1 ซึ่งบล็อคเสาเข็มดินซีเมนต์นอกจากจะช่วยลดการเคลื่อนตัวด้านข้างแล้วยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพงานขุดดินป้องกันการเกิดการอูดของดินในบริเวณกำแพงกันดินอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 24 ผังการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดดิน

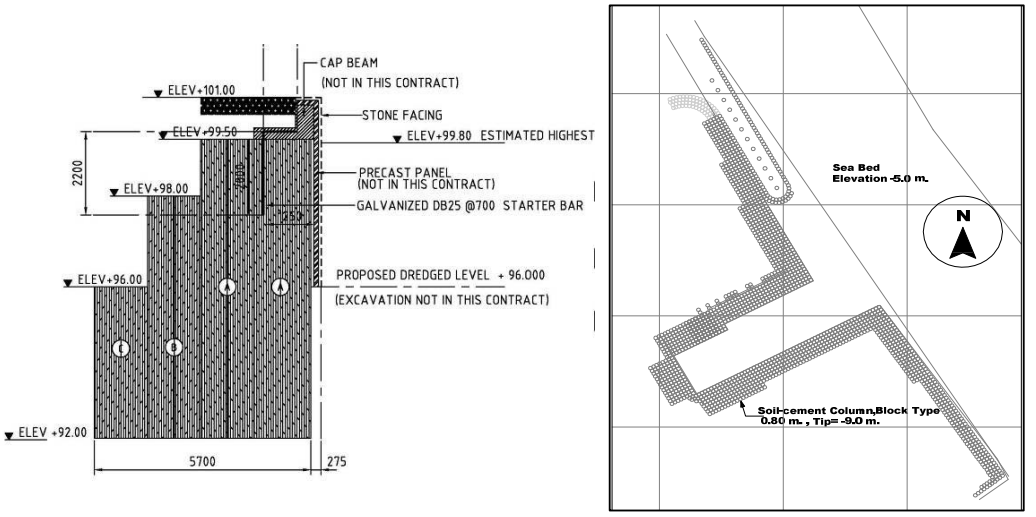


ภาพที่ 25 เสาเข็มดินซีเมนต์ใต้ระดับค้ำยันบริเวณติดกำแพงเสาเข็มเจาะ

กรณีศึกษาที่ 2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ก่อสร้างแบบบล็อคเป็นกำแพงกันดิน เพื่อใช้ในการขุดดินลึกประมาณ 4 ม. เพื่อลอกตลิ่งริมทะเล ลักษณะดินเป็นทรายหลวม ไม่มีสารเชื่อมประสาน กำแพงเขื่อนแบบปกติที่มีอยู่เดิมแยกออกจากโครงสร้างเนื่องจากแรงดันน้ำ เสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการนี้มีความ

ลึก 8 ม. ก่อสร้างแบบบล็อคกว้าง 5.70 ม. ดังแสดงในภาพที่ 26 อย่างไรก็ตามไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดในโครงการนี้ ค่าการเคลื่อนตัวของ ดินจึงได้มาจากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของดินซึ่งแสดงในตารางที่ 4

จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 200% และดินทรายที่ผ่านการผสมมีลักษณะเป็นบล็อคขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของงานขุดดินให้มีเสถียรภาพ ภาพที่ 27 และ 28 แสดงลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ลักษณะบล็อกและแบบต้นเดี่ยวของโครงการที่ทำการเปิดผิวดินซีเมนต์



Section Plan

ภาพที่ 26 การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกเพื่อก่อสร้างกำแพงป้องกันตลิ่ง

ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสดินเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

รายการ	ทรายหลวม	ดินซีเมนต์
ค่ากำลังรับแรงเฉือน (T/m^2)	N/A	30 - 110
SPT-N (blow/ft)	3 - 12	N/A
ค่าโมดูลัสของดิน (T/m^2)	2000 - 4000	7000 - 15 000
วิธีการทดสอบ	SPT-N	UCS-cored sample
หมายเหตุ	E_{sand} = 300 N	E_{50} from UCS

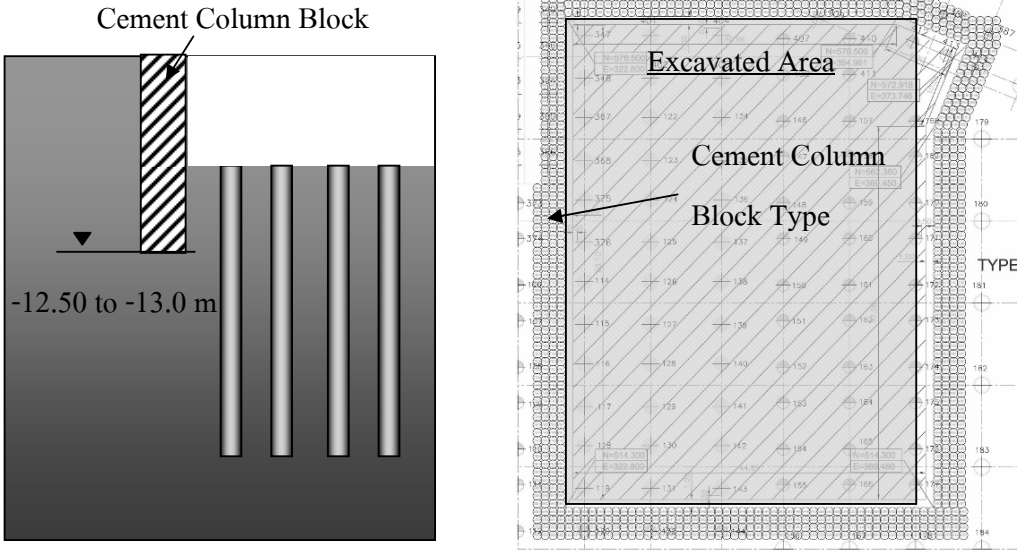


ภาพที่ 27 เสาเข็มดินซีเมนต์ลักษณะบล็อคหลังเปิดหน้าดิน



ภาพที่ 28 เสาเข็มดินซีเมนต์ลักษณะเสาเข็มเดี่ยวหลังเปิดหน้าดิน

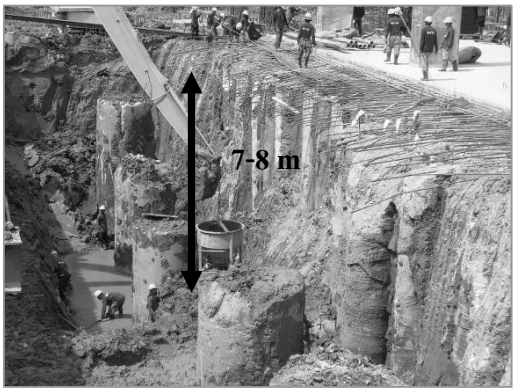
กรณีศึกษาที่ 3 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบบล็อคเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวความหนารวม 4.0 ม. ความลึกปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับ -12.5 ถึง -13.0 ม. ตามภาพที่ 29 เพื่อรองรับงานขุดดินส่วนลึกที่ระดับ -7.0 ถึง -8.5 ม. โดยที่มีระดับงานขุดส่วนตื้นอยู่ที่ -2.5 ถึง -3.0 ม. การเปิดหน้าดินใช้การทำลาดดินจนกระทั่งต้องการก่อสร้างฐานรากและกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถรองรับงานขุดดินลึก โดยการออกแบบต้องเป็นในลักษณะ Gravity wall ได้อย่างปลอดภัย ดังแสดงในภาพที่ 30 และ 31



Section

Plan

ภาพที่ 29 การเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงชั่วคราวในการขุดดิน



ภาพที่ 30 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ลักษณะบล็อคในการขุดดิน



ภาพที่ 31 ผิวเสาเข็มดินซีเมนต์หลังเปิดหน้าดิน

กรณีศึกษาที่ 4 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบบล็อคเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวความหนารวมโดยทั่วไป 2.2 ม. ความลึกปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับ -11.0 ม. เพื่อรองรับงานขุดดินส่วนลึกที่ระดับ -3.0 ถึง -5.5 ม. เสาเข็มดินซีเมนต์บางต้นทำการเสริม H100x100-17.6 kg/m เพื่อติดตั้งค้ำยันชั่วคราว การเปิดหน้าดินใช้การทำลาดดินจนกระทั่งต้องการก่อสร้างฐานรากและกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นช่วงๆ โดยใช้ระยะเวลาในการเปิดผิวหน้าหน้ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ให้สั้นที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 32 และ 33 เนื่องจากการเปิดผิวหน้ากำแพงเป็นเวลานานจะเกิดรอยแตกจากการแห้งตัว ส่งผลให้กำลังของกำแพงลดลงตามระยะเวลาที่เปิดผิวด้วย



ภาพที่ 32 ผิวกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์หลังจากเปิดหน้าดิน



ภาพที่ 33 การขุดดินแบบจำกัดพื้นที่ แล้วทำการก่อสร้างฐานราก ทีละส่วน

กรณีศึกษาที่ 5 งานขุดดินในชั้นทราย ในเมืองพัทยา ได้นำเอาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบบล็อคเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวความหนารวมตั้งแต่ 1.5-2.2 ม. ความลึกปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับ -10.0 ม. ตามภาพที่ 34 เพื่อรองรับงานขุดดินส่วนลึกที่ระดับ -3.0 ถึง -7.0 ม. เสาเข็มดินซีเมนต์บางต้นทำการเสริม H100x100-17.6 kg/m เพื่อติดตั้งค้ำยันชั่วคราวสำหรับงานขุดดินลึก -7.0 ม. จะมีค้ำยันชั่วคราวค้ำ

ในแนวทแยง ตามภาพที่ 35 การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นทรายมักไม่มีปัญหาเรื่องการแตกร้าวจากการหดตัวของดินซีเมนต์ แต่สิ่งที่ควรพิจารณาคือระดับน้ำใต้ดินและเม็ดทรายหลวมที่อาจไหลผ่านรอยต่อระหว่างดินซีเมนต์ อาจส่งผลกระทบให้เกิดการทรุดตัวของพื้นที่ข้างเคียงได้



ภาพที่ 34 ผิวกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์หลังจากเปิดหน้าดินในการใช้งานกับดินทราย



ภาพที่ 35 ค้ำยันเหล็กชั่วคราวที่ติดตั้ง

8. บทสรุป

การใช้การปรับปรุงกำลังของดินด้วยวิธีก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีขั้นตอนการก่อสร้างหรือขุดดินและวิธีการตรวจสอบคุณภาพของงานที่เหมาะสมสามารถใช้เป็นระบบป้องกันดินพังได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดการเคลื่อนตัวของดินเมื่อใช้ร่วมกับกำแพงกันดินแบบแข็งในพื้นที่พิเศษที่ยอมให้มีการเคลื่อนตัวของดินน้อย เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว ทำให้ดินเม็ดหยาบมีการเชื่อมประสาน และเพิ่มเสถียรภาพของงานขุดดินอย่างมีประสิทธิภาพ

การกำหนดค่าปัจจัยต่างๆที่จะใช้การทำงานและการออกแบบควรได้มาจากการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ การผสมทดสอบในสนาม รวมทั้งการเก็บข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติดินซีเมนต์อย่างเป็นระบบจากโครงการที่ผ่านมาเพื่อให้คุณสมบัติดินที่ผ่านการปรับปรุงกำลังมีค่าตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งข้อมูลที่เก็บควรมีจำนวนที่มากพอและมีการคัดกรองเพื่อได้ข้อมูลที่ดีเพื่อจะนำกลับไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบและเป็นมาตรฐานในการก่อสร้างที่ดีต่อไปในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

เอกสารอ้างอิง

เกษม เพชรเกตุ และ โกศล ไกรพัฒนพงศ์, 2544, การศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ สารอินทรีย์และความเป็นกรดต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์แบบเปียก, งานสัมนา, กรุงเทพฯ

เกษม เพชรเกตุ, 2547, เสาเข็มดินซีเมนต์กับการใช้งาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

Aoi, M. and Tsujii, T. 1996. Mechanism of machine for dry jet mixing method. Proc. IS-Tokyo, 579-584

CDIT. 1999. Deep Mixing Method Technical Manual for Marine Works. Japan, 147

Honjo, Y. 1982. A Probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method. Soils and Foundations, 22(1), 23-28

Imanishi, H. and Yamauchi, Y. 1996. Ground behavior during soil improvement by Jet Grouting. Grouting and Deep Mixing. Balkema. Rotterdam

Japan Cement Association, 1994, Soil improvement manual using cement stabilizer (in Japanese), Japan

Jun Dong, Keiji Hiroi & Kazuyuki Nakamura. 1996. Experimental study on behavior of composite ground improvement by deep mixing method under earth pressure. Grouting and Deep Mixing. Balkema. Rotterdam

Kawasaki, Niina, A. Saitoh, S. Suzuki, Y. Honjo, Y. 1981. Deep mixing method using cement hardening agent. Proc. 10th ICSMFE. Stockholm,3, 721-724

Kawasaki,T,A. Niina, S. Saitoh&R. Babasaki , 1978, Studies on Engineering Characteristics of cement-base stabilized soil, Takenaka Technical Research Report , Japan

Larsson, S. 2005. State of Practice Report-Execution, monitoring and quality control. Proc. Int. Conf. on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm, Vol 2. 732-785

Nakamura, M. Matsuzawa, S. and Matsushita, M. 1982. Study of agitation mixing of improvement agent. Proc. Of the 17th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: 2585-2588

Niina, A. Saitoh, H, Babasaki, R. Tsutsumi, I. & Kawasaki, T. 1977. Study on DMM using cement hardening agent (Part 1). Proc. Of the 12th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: 1325-1328

prEN 14679. 2005. Execution of special geotechnical works-Deep mixing. CEN TC 288, AFNOR, Approved standard, 50

Raito, Inc. [online] http://www.raitoinc.com/

Terashi, M. and Kitazume, M. 1992. An investigation of the long-term strength of a lime treated marine clay. Technical Note of Port and Harbour Research Institute. 732

Terashi, M., H. Tanaka, T. Mitsumoto, S. Honma & T. Ohhashi, 1983, Fundamental properties of lime and cement treated soil (3rd Report), Report of the Port and Harbour Research Institute (in Japanese), Japan

Terashi, M., H. Tanaka, T. Mitsumoto, Y. Niidome & S. Honma, 1980, Fundamental properties of lime and cement treated soil (2nd Report), Report of the Port and Harbour Research Institute (in Japanese), Japan

Terashi, M., T. Okumura & T. Mitsumoto, 1977, Fundamental properties of lime treated soil (1st Report), Report of the Port and Harbour Research Institute , Japan

Topolnicki, M. 2004. In situ soil mixing. Chapter 9 in Ground Improvement, 2nd ed. Spon Press, Oxon, 331-428

Wiggers, A.G. and Perzon, J. 2005. The Lekkerkerk trial: Mixed-in-place dike improvement in the Netherlands. Proc. Int. Conf. on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm, Vol 1, 179-183

Yoshida, N. Kuno, G & Kataoka, H. 1992. Long-term strength on cement treated soil by the shallow mixing method. Proc. Of the 27th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: 2323-2326

เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์. ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ ในปัจจุบัน. ใน การสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง ฐานราก' 40, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2540.
2. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์. ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพฯ. ใน การสัมมนาเรื่อง งานฐานราก 2000, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2543.
3. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์. การสร้างมาตรฐานงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในยุคโลกาภิวัฒน์. ใน การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2543 "เทคโนโลยีใหม่ในทศวรรษหน้า", กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2543.
4. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช, สิทธิพล สุรอังกูร และพรพจน์ ตันเส็ง. การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะจากระยะเวลาก่อสร้างและความหนืดของสารละลายเบ็นโทไนท์. ใน การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
5. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ , ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์ และกมล อยู่ยืนพัฒนา. ความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้ง. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
6. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล และสุเมธ ประเวศวรารัตน์. ปัญหาในงานเสาเข็มเจาะที่เกิดจากคุณภาพคอนกรีต. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
7. กมล สิงห์โตแก้ว, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และพรพจน์ ตันเส็ง. น้ำหนักบรรทุกสูงที่สุดเท่าที่เคยทดสอบกับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
8. ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, นที รัตนชูวงค์ และจรุง หิรัญอ่อน. การควบคุมคุณภาพเสาเข็มระบบเจาะแห้งโดยเครื่องเจาะแบบสามขา. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
9. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์. สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบ็นโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพ. ใน การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2542, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2542.

10. สิทธิพล สุรอังกูร, สุเมธ ประเวศวรารัตน์ และตุลา นพพันธ์. อันตรายและมาตรการความปลอดภัยในงานเสาเข็มเจาะ. ใน การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2542, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2542.
11. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และพรพจน์ ตันเส็ง. ประสบการณ์การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, ชลบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2542.
12. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และพรพจน์ ตันเส็ง. การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, เพชรบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2543.
13. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์. การก่อสร้างเสาเข็มเจาะและปัญหา. ใน การอบรมเรื่องการสำรวจชั้นดิน การออกแบบและการก่อสร้างงานฐานราก, ขอนแก่น : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
14. วันชัย เทพรักษ์ และธยานันท์ บุณยรักษ์ . พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2545.
15. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช, ซอว์ ซอว์ เอย์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. คอนกรีตเทคโนโลยีสำหรับงานเสาเข็มเจาะลึกระบบเปียก. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, กาญจนบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2546.
16. สุเมธ ประเวศวรารัตน์ , ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. การเตรียมงานและควบคุมการก่อสร้างฐานรากในพื้นที่ประวัติศาสตร์. ใน งานสัมมนา วิศวกรรมฐานราก '46, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2546.
17. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์. ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบของเสาเข็มเจาะระบบเปียกจากอดีตถึงปัจจุบัน. ใน งานสัมมนา วิศวกรรมฐานราก '46, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2546.
18. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เฉลิมพล มโนสุทธิสาร, ธยานันท์ บุณยรักษ์ และจักรกฤษณ์ จันจัด. การก่อสร้างเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่มากสำหรับสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา โครงการถนนวงแหวนรอบนอกตอนใต้. ใน การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, ภูเก็ต : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2549.
19. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์, ธยานันท์ บุณยรักษ์ และชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. การพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเจาะลึกขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, ชลบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2551.
20. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเนื่องจากการก่อสร้างฐานรากในชั้นดินกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2552.

21. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และกมล สิงห์โตแก้ว. กำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อในชั้นดินกรุงเทพ : ความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น และการป้องกัน. ใน การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2542, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2542.
22. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์. บทเรียนจากการวิบัติของบ่อบำบัดน้ำเสียยานนาวา. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, เพชรบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2543.
23. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และพรพจน์ ตันเส็ง. สารละลายเบ็นโทไนท์ในงานกำแพงกันดินชนิดขุดและหล่อคอนกรีตในชั้นดินกรุงเทพฯ:คุณสมบัติต่างๆ และ วิธีการควบคุม. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, เพชรบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2543.
24. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และกมล สิงห์โตแก้ว. กรณีศึกษาการวิบัติชนิดรุนแรง ในงานขุดดินแบบใช้ค้ำยันในชั้นดินกรุงเทพฯ. ใน งานสัมมนา วิศวกรรมฐานราก '46, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2546.
25. ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. พฤติกรรมของกำแพงพืดกันดินอย่างบางชนิดขุด-หล่อในที่โครงการอาคารจอดรถใต้ดินในกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2547.
26. กมล สิงห์โตแก้ว, สุเมธ ประเวศวารัตน์, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. ข้อที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบโครงสร้างกำแพงพืดกันดินชนิดขุด-หล่อในที่ในงานก่อสร้างใต้ดิน. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, ภูเก็ต : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2549.
27. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง, ธยานันท์ บุณยรักษ์ และจักรกฤษณ์ จันจัด. ความต้านทานความชื้นและน้ำซึมเข้าห้องใต้ดินลึกในชั้นดินกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 4, อุบลราชธานี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2551.
28. ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์, วรพงษ์ อติวรรณาพัฒน์ และสมศักดิ์ สมบูรณ์ทรัพย์. กรณีศึกษาเทคนิคงานขุดดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบก่อสร้างจากบนลงล่าง. ใน การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2548.
29. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ทรงศักดิ์ วิสุทธิพิทักษ์กุล และชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. การก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดินโรงพยาบาลกลางด้วยวิธีก่อสร้างจากบนลงล่าง. ใน การออกแบบและก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2549.
30. ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. เทคนิคงานก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยก. เอกสารประกอบการอบรม สำนักงานโยธา, กรุงเทพมหานคร. 2551.

31. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. วิวัฒนาการงาน Diaphragm wall ในประเทศไทย. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2552.
32. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์ และจรุง หิรัญอ่อน. ประสบการณ์ในการตรวจความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะโดย โซนิก อินเทก'กริที เทสติ้ง. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2544.
33. ภัคพงศ์ ศรีวรรณวิทย์, จรุง หิรัญอ่อน และสมบูรณ์ พิมสาร. การทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มเจาะลึกมากก่อสร้างในชั้นดินกรุงเทพ โดยวิธี Sonic logging และการแปลคลื่นสัญญาณ. ใน การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2542, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2542.
34. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. การประยุกต์วิธีทดสอบครอสโฮลโซนิคล็อคกิ้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพหัวเสาเข็มก่อนทำการขุดเปิดหน้าดิน. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2548.
35. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, ซอว์ ซอว์ เอย์ และธยานันท์ บุณยรักษ์. บทบาทการตรวจวัดพฤติกรรมทางวิศวกรรมปฐพีสำหรับงานก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในกรุงเทพฯ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, อุบลราชธานี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2553.
36. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง และธยานันท์ บุณยรักษ์. การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึก. ใน การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2550.
37. ณรงค์ ทัศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง และธยานันท์ บุณยรักษ์. การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุดดินเหนียวอ่อน. ใน งานสัมมนาเรื่อง ความเข้าใจในงานเสริมกำลังในดินเหนียวอ่อน ด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์, 2552.