การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

โดย

กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสุสร้างทาง

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

กรมทางหลวง

การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

1.บทนำ

ดินซีเมนต์เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพทางวิศวกรรมของดินหรือหินคลุกโดยการผสมซีเมนต์ (Cement Stabilization) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง กรมทางหลวงได้นำวิธีการนี้มาใช้ในการก่อสร้างทางเป็นระยะเวลามากกว่า 30 ปีมาแล้ว ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุ ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในบางพื้นที่ และเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางได้มากขึ้น ลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น ทำให้ถนนมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่าเดิม

การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการทำงานตามมาตรฐานและข้อกำหนดของกรมทางหลวง ที่เกี่ยวกับการใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มได้แก่

- ทล.-ม.203/2532 “พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base)”
- ทล.-ม.204/2533 “มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)”
- ทล.-ม.206/2532 “มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)”

ส่วนผสมของดินซีเมนต์ประกอบด้วย วัสดุมวลรวม ซีเมนต์ และน้ำ การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดตามที่ต้องการ หรือตามที่กำหนดในแบบ ซึ่งจะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จก่อนที่จะเริ่มงานก่อสร้าง ผู้ที่ทำการออกแบบจะต้องมีประสบการณ์และความชำนาญในการกำหนดหาค่าปริมาณซีเมนต์ และวิธีการประเมินผลการทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบแต่ละท่านอาจมีรายละเอียดของการออกแบบและวิธีการประเมินผลการทดสอบที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการออกแบบแต่ละอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่ใช้ หรือการวิเคราะห์ค่า Unconfined Compressive Strength ที่เหมาะสมในแต่ละปริมาณซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งทำให้ได้ผลการออกแบบที่แตกต่างกันแม้จะใช้ข้อมูลผลการทดสอบเดียวกัน

ดังนั้น กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ จึงได้กำหนดแนวทางในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อให้เจ้าหน้าที่ผู้ออกแบบส่วนผสมทุกคนมีแนวการปฏิบัติไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบที่มีมาตรฐานเดียวกันทั้งหน่วยงาน

2. วัตถุประสงค์ในการดำเนินการ

เพื่อกำหนดแนวทางในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ให้ถูกต้องเหมาะสมเป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งหน่วยงาน

3. ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1 ศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับวัสดุดินซีเมนต์และการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างชั้นทาง

3.2 จัดตั้งชุมชนนักปฏิบัติ (CoP : Community of Practice) กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง เรื่อง การจัดทำข้อแนะนำการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์

3.3 ประชุมคณะทำงานวิชาการด้านดินและวัสดุมวลรวมเพื่อพิจารณา ร่างการจัดทำข้อแนะนำการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์ ที่จัดทำโดยชุมชนนักปฏิบัติ (CoP : Community of Practice) กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง

3.4 กำหนดแนวทางการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างชั้นทาง

4. ทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้อง

4.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินเป็นกระบวนการใดๆที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน เพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน สามารถรับน้ำหนักจากการจราจร และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นต้น โดยอาจใช้วิธีการต่างๆ เช่น การบดอัด การทำให้แน่นด้วยเทคนิคเฉพาะ หรือการใช้สารผสมเพิ่มซึ่งอาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือเป็นผงมาเติมลงในดิน โดยการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆหลายประการ เช่น คุณสมบัติของดิน ส่วนประกอบของแร่ดินเหนียว ราคา และความสะดวกในการทำงาน เป็นต้น

การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization) สามารถแบ่งได้หลายวิธี เช่น

1) การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน เพื่อที่ดินจะได้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น เช่น Cement Stabilization, Lime Stabilization, Sodium Chloride Stabilization

2) การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางกายภาพ (Physical Stabilization) ซึ่งจะไม่ทำให้โครงสร้างภายใน และการยึดเกาะของดินเปลี่ยนไปจากเดิม เช่น Thermal Stabilization, Pressure Stabilization

3) การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical Stabilization) ซึ่งจะทำให้เม็ดดินมีการขัดตัวกันภายใน (Mechanical Interlock) สูง เช่น Sand Piling, Vibroflotation

4) การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Stabilization) เป็นวิธีการลดปริมาณความชื้นในดิน ทำให้เกิดการออสโมสิสของน้ำในดินโดยใช้ขั้วไฟฟ้าคือขั้วบวกและขั้วลบเป็นตัวทำให้เกิดประจุไฟฟ้า ประจุที่เกิดขึ้นเป็นตัวนำพาน้ำให้เคลื่อนที่ออกไปจากพื้นที่ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ

จากตัวอย่างวิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน 4 ประเภทที่กล่าวมา การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี เป็นวิธีการที่กรมทางหลวงนิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นทาง

4.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีผสมลงในดิน มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งพิจารณาได้จากการบวมตัว และการหดตัวของดิน ปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือพฤติกรรมของ Stress-Strain ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมผ่านของน้ำในดิน และเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

สารเคมีหรือวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ปูนซีเมนต์ปูนขาว หรือเถ้าลอย ซึ่งจะทำให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัยสำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุผสมเพิ่มนั้นจะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมีองค์ประกอบที่ไม่มีพิษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย

4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

1) คุณสมบัติของดิน (Soil Properties) ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัว ซึ่งลักษณะพื้นฐานทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เมื่อพิจารณาธรรมชาติของดิน สรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) ซึ่งก็คือสัดส่วนของทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) ดินเหนียว (Clay) อินทรีย์สาร (Organic Material) และสารประกอบอื่นๆ เช่น เกลือซัลเฟต หรือคลอไรด์ และองค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติดินซีเมนต์

2) วัสดุผสมเพิ่ม (Stabilizing Agent) โดยทั่วไปแล้ว วัสดุผสมเพิ่มชนิดเดียวกันที่ผสมในปริมาณที่มากกว่าจะให้กำลังมากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรอื่นคงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการ

เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ในทางกลับกัน วัสดุผสมเพิ่มต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementitious Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อวัสดุผสมเพิ่มนั้นทำปฏิกิริยากับดิน

3) น้ำ (Water) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะว่าน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

4) เทคนิคการปรับปรุง (Techniques of Stabilization) นอกจากองค์ประกอบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว กำลังของดินยังขึ้นอยู่กับเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ ระยะเวลาในการผสมที่แตกต่างกัน ความเร็วในการผสม เงื่อนไขในการบ่ม ตลอดจนการเตรียมสภาพดินก่อนการปรับปรุง และการดูแลหลังการผสม (Pre and Post Treatment) จะมีผลทำให้กำลังของดินที่แตกต่างกันไป

4.4 คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงหลังจากปรับปรุงคุณภาพ

1) คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity) วัสดุผสมเพิ่มเมื่อเติมลงไปในดินจะทำให้ความเหนียวของดินเปลี่ยนแปลง โดยคุณสมบัติด้านความเหนียวจะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยา Hydration จะทำให้เกิด Calcium Ions แล้วมีการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบเม็ดดิน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน เม็ดดินจะจับตัวเป็นก้อน ค่าคุณสมบัติด้านความเหนียวจึงลดลง

2) คุณสมบัติทางด้านการบดอัด (Compaction) เมื่อผสมวัสดุผสมเพิ่มลงไปในดินจะทำให้คุณสมบัติของดินทางด้านการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของดินเดิมที่ใช้

DIVIDSON (1961) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Optimum Moisture Content (OMC) และ Maximum Dry Density (MDD) ของดินผสมซีเมนต์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะการผสมขึ้นและ/หรือ การทำการบดอัดให้ช้าลง โดยทั่วไปจะมีผลทำให้ OMC เพิ่มขึ้น ความแน่นแห้งลดลง กำลังรับแรงอัดลดลง

MARSHAL (1954) พบว่าการผสมที่ช้าลงจะทำให้ OMC ของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น และจะมีผลต่อกำลังสูงสุด (Maximum Strength) การหน่วงเวลาการผสม และการบดอัดให้ช้าลงจะมีผลต่อกำลัง

เพียงเล็กน้อยสำหรับดินทราย ถ้าเป็นดินตะกอนและดินเหนียวการหน่วงเวลาการผสมและการบดอัดให้ช้าลงจะมีผลมาก

3) คุณสมบัติทางด้านกำลัง (Compressive Strength) กำลังของส่วนผสม ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

4) การยึดประสาน (Cementation) ในการบดอัดดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ส่วนประกอบต่างๆ ของซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในอัตราที่แตกต่างกัน เม็ดดินจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนและสามารถรับแรงอัดได้ การยึดเกาะนี้จะเกิดขึ้นทั้งระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์ และซีเมนต์กับซีเมนต์เอง ซึ่งแยกประเภทสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ดังนี้

- ดินเม็ดละเอียด ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะสูงกว่าดินเม็ดหยาบเพราะว่าดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่า ซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยให้การเกาะตัวของเม็ดดินแข็งแรงขึ้น ดังนั้นนอกจากซีเมนต์จะทำให้ค่าของคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลงแล้ว ยังเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนอีกด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเกิดตามผิวเม็ดดินจะไปไล่น้ำที่เกาะอยู่รอบผิวเม็ดดินออกไปและซีเมนต์จะเข้าไปอยู่แทนที่ ทำให้ลดการอ่อนตัวของดินเมื่อน้ำภายนอกซึมเข้าไปอีก

- ดินเม็ดหยาบ ในกรณีของดินเม็ดหยาบ ปฏิกิริยาของซีเมนต์จะทำหน้าที่คล้ายกับการผสมคอนกรีต เว้นแต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์จะขัดตัวกันด้วย Mechanical Interlock และยึดเกาะกันด้วย Chemical Cementation กรณีของทรายการยึดเกาะกันจะมีตรงบริเวณผิวสัมผัสกัน เมื่อทรายมีการบดอัดแน่นช่องระหว่างเม็ดทรายจะมีน้อยพื้นที่สัมผัสมีมากขึ้น การยึดเกาะกันจะแข็งแรงขึ้นด้วยแต่ถ้าเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันจะมีพื้นที่สัมผัสน้อยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมากกว่าชนิดที่ขนาดคละกันดี

4.5 วัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันแพร่หลายโดยทั่วไป เนื่องจากปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ มีมาตรฐานและข้อกำหนดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพในต่างประเทศสามารถนำมาอ้างอิง ดัดแปลงให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ กรมทางหลวงจึงนิยมใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพ

สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ประกอบด้วย ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และ เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 1

4.5.1 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่งโดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า Dormant Period หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันจะยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่าจุดก่อตัวเริ่มต้น (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดก่อตัวเริ่มต้นเรียกว่า เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือจุดก่อตัวสุดท้าย (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป จนสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เราเรียกว่า การแข็งตัว (Hardening)

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (1วัน)	เร็วมาก (1วัน)
กำลังอัดประลัย	ปานกลาง	น้อย	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)

4.5.2 กลวิธีการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration เป็นหลัก ปฏิกิริยา Cement Hydration ที่เกิดในดินซีเมนต์จะคล้าย ๆ กับปฏิกิริยา Cement Hydration ที่เกิดในคอนกรีต กล่าวคือ เมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า Cement Hydration ผลของปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจะก่อให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Calcium Hydroxide [$Ca(OH)_2$] สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด โดยสามารถเกาะยึดมวลเม็ดดินเข้าด้วยกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง

ส่วน $Ca(OH)_2$ ที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยา Hydration จะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง

ปฏิกิริยา Cement Hydration สามารถจะเขียนออกมาในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Cement} + H_2O \longrightarrow CSH + CAH + Ca(OH)_2 \quad \text{....(1)}$$

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{++} + 2\,(OH)^-$$

$$Ca^{++} + 2\,(OH)^- + \text{Soil Silica } (SiO_2) \longrightarrow CSH \quad \text{....(2)}$$

$$Ca^{++} + 2\,(OH)^- + \text{Soil Alumina } (Al_2O_3) \longrightarrow CAH \quad \text{....(3)}$$

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยา Cement Hydration ในดินจะก่อให้เกิดสาร CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด ดังแสดงในสมการที่ (1), (2) และ (3)

สมการที่ (1) เป็นสมการที่แสดงว่า CSH และ CAH เกิดจาก Cement Hydration โดยตรง ดังนั้น CSH และ CAH ที่เกิดจาก Cement Hydration โดยตรงนี้จะเรียกว่า Primary Reaction ส่วนสมการที่ (2) และ (3) จะเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องภายหลัง โดยจะเกิดขึ้นภายใต้ระยะเวลาที่ยาวนาน ส่งผลให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Secondary Reaction หรือปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction

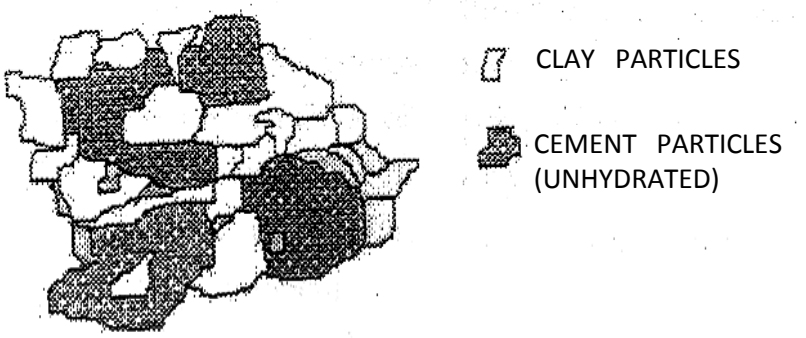
4.6 โครงสร้างของพื้นทางดินซีเมนต์

Mitchell and Jack [1966] เสนอแนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์ เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังในรูปที่ 1 ซึ่งแบ่งให้เห็นเป็น 3 ขั้นตอนคือ

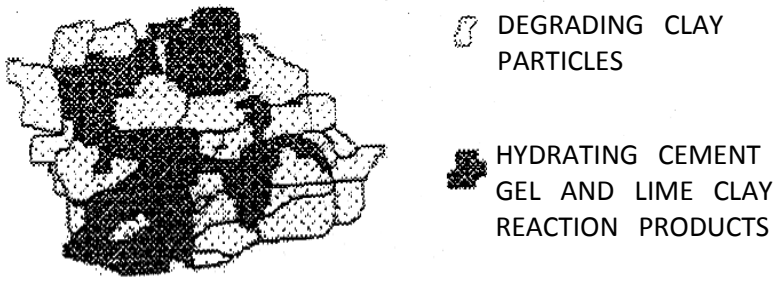
- ภายใต้การบดอัด ขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่ซีเมนต์ไม่เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดินตามรูปที่ 1(a)

- ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration จะเริ่มมีปฏิกิริยา Cement Hydration ขึ้น ทำให้เกิดเป็น Cement Gel แทรกซึมตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และ Released Lime เริ่มทำปฏิกิริยากับดินที่เป็น Active Soil Silica หรือ Active Soil Alumina ในสารละลายจะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของ Soil Silica และ Soil Alumina ในดิน และผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนที่จะแผ่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังแสดงในรูปที่ 1(b)

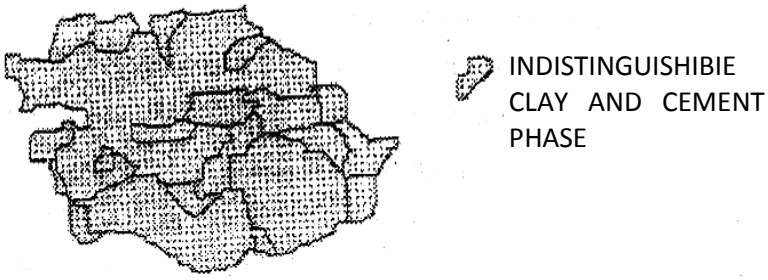
- ภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของซีเมนต์จะเกิดกระบวนการ Cement Hydration อย่างสมบูรณ์อันมีผลทำให้ปริมาณ Cement Gel และขอบเขตการแทรกซึมของ Cement Gel แผ่กระจายไปทั่วทั้งก้อนของ Soil-Cement ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นแสดงในรูปที่ 1(c)



(a) โครงสร้างดินภายใต้การบดอัด



(b) โครงสร้างดินภายใต้การบ่มระยะสั้น



(c) โครงสร้างดินภายใต้การบ่มระยะยาว

รูปที่ 1 โครงสร้างของดินซีเมนต์

4.7 ประเภทของดินซีเมนต์

Portland Cement Association (PCA) ได้จำแนกชนิดของดินซีเมนต์ตามส่วนประกอบหลักออกเป็น 3 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะในการใช้งานดังนี้

1) Cement – Modified Soils (CMS)

ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินประเภทนี้จะน้อยมาก จุดประสงค์ของการปรับปรุงก็เพื่อแก้ไขคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาของดินที่มีปัญหา หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานให้มีคุณสมบัติเหมาะสมเพียงพอสำหรับการก่อสร้าง ไม่ได้ต้องการให้ดินซีเมนต์แข็งขึ้นโดยดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแล้วจะก่อตัวเป็นก้อนหรือแข็งขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจะยังมีคุณสมบัติหลักเหมือนดินอยู่ ระดับของการปรับปรุงคุณภาพขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ และชนิดของดิน คุณสมบัติของดินที่ได้รับการปรับปรุงสามารถสรุปได้ดังนี้

- คุณสมบัติด้านความเหนียวของดินลดลง
- ปริมาณอนุภาคขนาด Silt และ Clay ลดลง
- เพิ่ม CBR (California Bearing Ratio)
- เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน
- คุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลง

Cement – Modified Soils แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามขนาดของวัสดุดังนี้

- Cement – Modified Silt – Clay Soils เป็นดินที่มีปริมาณของวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือ 0.075 มิลลิเมตรมากกว่า 35 % วัตถุประสงค์ทั่วไปในการปรับปรุงดินเพื่อจะลดคุณสมบัติด้านความเหนียว กับคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เพิ่มกำลังแบกทาน หรือเพื่อทำชั้น Working platform ให้มั่นคงพอที่จะก่อสร้างชั้นโครงสร้างทางด้านบนต่อไปได้

- Cement – Modified Granular Soils เป็นดินที่มีปริมาณวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือ 0.075 มิลลิเมตรน้อยกว่า 35 % โดยปกติวัตถุประสงค์คือเปลี่ยนแปลงวัสดุที่มีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐาน ให้มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะเป็นชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง

2) Cement – Treated Base (CTB)

ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะต้องออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงอัดหรือความแข็งแรงทนทาน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินจะต้องมากพอที่จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดหรือกำลังแบกทานได้ตามที่กำหนด จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับชั้นพื้นทาง โดยทำการผสมวัสดุมวลรวมหรือดินกับซีเมนต์และน้ำตามปริมาณที่ออกแบบไว้ แล้วทำการบดอัดให้ได้ความแน่นสูงสุด และจะต้องมีระยะเวลาการบ่มที่เพียงพอให้ปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะให้ได้ส่วนผสมที่แข็งแกร่งขึ้น ก่อนที่จะปูผิวทางแอสฟัลต์หรือผิวทางคอนกรีตทับด้านบน ปัจจัยพื้นฐานที่จะควบคุมคุณภาพมีดังนี้

- สัดส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม
- ปริมาณความชื้นที่เพียงพอ
- การผสมให้ทั่วถึง
- การบดอัดที่เพียงพอ
- ระยะเวลาและวิธีการบ่มที่เหมาะสม

การผสมส่วนผสมทั้งหมดโดยทั่วไปจะทำการผสมในโรงผสม ซึ่งอาจจะเป็นโรงผสมแบบต่อเนื่องโดยใช้สายพาน (Continuous – Flow) หรืออาจจะเป็นโรงผสมแบบชุด (Batch – Type Pugmill Mixer) CTB สามารถผสมในที่ได้โดยใช้ Transverse – Shaft Pulvermixers หรือโรงผสมแบบเคลื่อนที่

เมื่อเปรียบเทียบความหนาที่จะต้องใช้รองรับปริมาณจราจรจำนวนเท่ากัน ชั้น CTB จะต้องการความหนาที่น้อยกว่าชั้นพื้นทางหินคลุก เพราะ CTB มีซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานให้วัสดุแข็งแกร่ง (Rigid) ซึ่งสามารถกระจายน้ำหนักบรรทุกได้เป็นบริเวณกว้าง คล้ายคุณลักษณะของแผ่นพื้นและคาน ซึ่งแตกต่างจากพื้นทางหินคลุก ที่จะเกิดความเสียหายทันทีเมื่อสูญเสีย Interlock ไป ชั้น CTB ที่แข็งแกร่งจะเป็นชั้นที่ทึบน้ำ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศ และสามารถพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องตามอายุการใช้งานที่มากขึ้นแม้อยู่ใต้สภาวะรองรับการจราจรก็ตาม

3) Full – Depth Reclamation (FDR)

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) โดยนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์และพื้นทางข้างใต้ผิวทางเก่าที่เสียหาย มาทำให้แข็งแรงขึ้นด้วยการผสมกับซีเมนต์เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะจะใช้เป็นพื้นทางสำหรับถนนใหม่ กระบวนการนี้จะใช้กับถนนลาดยาง โดยผิวทางแอสฟัลต์เก่าและวัสดุพื้น

ทางจะถูกขุดรื้อและย่อย ก่อนที่จะถูกผสมด้วยซีเมนต์และน้ำ แล้วทำการบดอัดให้แน่นเพื่อใช้เป็นพื้นทางสำหรับรองรับผิวทางแอสฟัลต์ใหม่ หรือผิวทางคอนกรีต

Full-Depth Reclamation จะใช้ผิวทางแอสฟัลต์เก่าและวัสดุพื้นทาง มาก่อสร้างเป็นถนนใหม่ จึงไม่ต้องมีการขนวัสดุผิวทางเก่าไปกำจัด และไม่ต้องมีการขนวัสดุใหม่มาเพิ่ม เป็นการลดปริมาณจราจรของรถบรรทุกในการขนส่งวัสดุ และลดการสูญเสียทรัพยากร ช่วยประหยัดเงินและทรัพยากรธรรมชาติ พื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงจะแข็งแกร่งขึ้นมากกว่าเดิม และเพิ่มการต้านทานต่อความชื้นมากกว่าเดิม ผลที่ได้จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของถนน ลดการซ่อมบำรุง และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือราคาในการทำ Recycling จะถูกกว่าการขุดรื้อถนนเก่าและแทนที่ด้วยถนนใหม่ประมาณ 25 - 50 %

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ จะมีขั้นตอนกระบวนการเหมือนกับการก่อสร้างชั้นทางดินซีเมนต์ปกติ ปัจจัยที่จะทำให้ได้ชั้นพื้นทางใหม่ที่แข็งแกร่งนั้นขึ้นอยู่กับ

- การขุดรื้อและย่อยขนาดวัสดุให้เหมาะสม
- สัดส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม
- สัดส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสม
- ความแน่นของการบดอัดที่เพียงพอ
- มีระยะเวลาการบ่มที่เพียงพอ

5. ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

5.1 วิวัฒนาการ การออกแบบถนนดินซีเมนต์ (Soil Cement) ในประเทศไทย

การก่อสร้างถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์ (Soil Cement) เริ่มต้นครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ.2508 โดยกรมทางหลวง ซึ่งวิวัฒนาการของการก่อสร้างถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงระยะเวลาดังต่อไปนี้

ช่วงต้น (พ.ศ.2508 – พ.ศ.2515) ปี พ.ศ.2508 กรมทางหลวงร่วมกับปูนซีเมนต์ไทยได้จัดสร้างถนนโดยได้นำดินซีเมนต์มาก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทางสายวาริน ชำราบ – เดชอุดม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สายทางมีความยาวประมาณ 5 กิโลเมตร เนื่องจากถนนที่มีพื้นทางเป็นดินซีเมนต์สายแรกนี้แสดงพฤติกรรมที่ดี กรมทางหลวงจึงได้ทำการก่อสร้างถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์เพิ่มอีกหลายสายทางในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงปี พ.ศ.2508 – พ.ศ.2515 รวมความยาวทั้งสิ้น 1,400 กิโลเมตร การที่กรมทางหลวงต้องก่อสร้างชั้นทางเป็นดินซีเมนต์ เพราะพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือขาดแคลนวัสดุหินคลุกที่มีคุณสมบัติพอที่จะนำมาใช้เป็นพื้นทางของถนน และเนื่องจากเป็นการนำดินซีเมนต์เข้ามาใช้ในงานทางครั้งแรก เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องยังไม่มีความรู้และเข้าใจพฤติกรรมของดินซีเมนต์ดีพอ เป็นเหตุให้ถนนบางช่วงของบางสายทางเกิดความเสียหายในลักษณะของรอยแตกสะท้อนเนื่องจากการหดตัวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Reflective Crack) เป็นจำนวนมาก ซึ่งความเสียหายนี้จะเป็นปัญหาในการบำรุงทาง ทำให้กรมทางหลวงระงับโครงการก่อสร้างถนนที่ใช้ดินซีเมนต์เป็นวัสดุชั้นทางไว้ในปี พ.ศ.2515 เพื่อศึกษาปัญหาให้ละเอียดลงไป ก่อนตัดสินใจนำกลับมาใช้ใหม่

ช่วงกลาง (พ.ศ.2515 – พ.ศ.2525) ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาของการศึกษาพฤติกรรมของถนนดินซีเมนต์ที่มีอยู่เดิมอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาวิจัยดินซีเมนต์เพิ่มเติม โดยวิจัยในห้องปฏิบัติการและทำการก่อสร้างถนนทดลอง รวมทั้งศึกษารายงานข้อมูลจากต่างประเทศ ผลการศึกษาในช่วงเวลาดังกล่าวทำให้เข้าใจถึงธรรมชาติของถนนที่มีชั้นทางเป็นดินซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น

ช่วงปัจจุบัน (พ.ศ.2525 – ปัจจุบัน) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 เป็นต้นมาเป็นช่วงของการนำดินซีเมนต์กลับมาก่อสร้างเป็นชั้นทางของถนนโดยยึดเอาผลที่ได้จากการศึกษาในช่วงกลางมาเป็นแนวทาง พบว่าถนนที่สร้างขึ้นในระยะหลังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับรอยแตกภายหลังการก่อสร้างแต่อย่างไร

ถนนที่มีพื้นทางเป็นดินซีเมนต์โดยทั่วไป จะแสดงพฤติกรรมที่ดีในด้านความแข็งแรงทนทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปิดใช้งานไปหลายปี ก็ยังไม่เกิดรอยร่องล้อ (Rutting) หรือหลุมบ่อ (Pothole) บนผิวหน้าถนนตรงกันข้ามกับถนนที่มีพื้นทางเป็นหินคลุก ซึ่งจะปรากฏรอยร่องล้อและหลุมบ่ออย่างชัดเจนเมื่อเปิดใช้งานไปนานๆ การที่ถนนที่มีพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ไม่แสดงรอยร่องล้อเป็นเพราะความสามารถในการ

รับน้ำหนักของดินซีเมนต์ดีกว่าหินคลุก ดินซีเมนต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Cemented Aggregate Base จะสามารถต้านทานแรงเฉือนทางด้านข้างได้ดีกว่าหินคลุกที่มีลักษณะเป็น Unbound Granular Base ซึ่งหินคลุกจะสามารถขยับตัวได้เมื่อมีแรงเฉือนทางด้านข้างมากระทำ ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้ถนนเกิดรอยร่องล้อ และเสียหายลุกลามจนกลายเป็นหลุมบ่อ

5.2 การออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ (Mix Design)

ในการก่อสร้างถนนที่มีชั้นพื้นทางเป็นดินซีเมนต์ครั้งแรกของกรมทางหลวง การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ได้ใช้ข้อกำหนดค่า California Bearing Ratio (CBR) ของดินซีเมนต์จะต้องไม่น้อยกว่า 120 เปอร์เซ็นต์ แต่ในปัจจุบันการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ กรมทางหลวงได้ใช้วิธีการออกแบบตามวิธีที่แนะนำโดย Portland Cement Association (PCA) และใช้ข้อกำหนดที่แนะนำโดย Transport and Road Research Laboratory (TRRL)

การออกแบบส่วนผสมจะทำการผสมดินและซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ กัน ณ ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content (OMC) แล้วบดอัดส่วนผสมเพื่อทำแท่งตัวอย่างด้วยวิธี Modified Compaction หลังจากนั้นทำการบ่มแท่งตัวอย่างในถุงพลาสติกเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบอายุบ่ม นำแท่งตัวอย่างไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined Compression Test) ค่าปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทางดินซีเมนต์นั้น จะต้องให้ค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength ,UCS) ที่อายุ 7 วัน ของชั้นทางแต่ละชั้น ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2

ในช่วงปี พ.ศ.2515 ถึงปี พ.ศ.2525 ศ.เกียรติคุณ ดร.ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และคณะนักวิจัยศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ของถนนที่ทำการก่อสร้างในระหว่างปี พ.ศ. 2510 ถึงปี พ.ศ.2514 และได้นำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) ของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากสนามนั้น มีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วันอย่างมาก ซึ่งสันนิษฐานว่า น่าจะเนื่องมาจาก Pozzolanic Reaction ดังนั้นการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่สูงในระยะเวลาเริ่มต้นจึงเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น (รื่นไกรฤกษ์,2539) และเนื่องมาจาก Reflective Crack บนชั้นผิวทาง Dheeragool and Ruenkrairergsa (1994) ได้มีการเสนอให้มีการควบคุมค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมดินซีเมนต์ โดยกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วันไม่มากกว่า 300 psi สำหรับดินซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

ชั้นทาง	**กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน (Unconfined Compressive Strength)**
ทล-ม. 203/2532 - ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base)	ไม่น้อยกว่า 350 psi (24.6 ksc)
ทล-ม. 204/2533 - ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)	ไม่น้อยกว่า 250 psi (17.5 ksc)
ทล-ม. 206/2532 - ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)	ไม่น้อยกว่า 100 psi (7.0 ksc)

ดร.ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ รายงานว่า จากการศึกษาเป็นระยะเวลายาวนานในการก่อสร้างถนนที่มีดินซีเมนต์เป็นชั้นทางในระยะเริ่มแรก (พ.ศ.2508 – พ.ศ.2515) และการศึกษา การออกแบบ และมีการทดสอบถนนในช่วงกลาง (พ.ศ.2515 – พ.ศ.2525) ค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ที่เหมาะสมหลังจากการบ่มที่อายุ 7 วันเท่ากับ 250 psi ซึ่งเหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขจราจรในประเทศไทย ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้อยู่ในช่วง 3 – 5 % ก็เพียงพอ และในการก่อสร้างควรจะควบคุมให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน อยู่ในช่วง 200 – 300 psi การบดอัดในสนามควรมีค่าความแน่น (Field Density) ไม่น้อยกว่า 95 % Modified Compaction ความหนาต่ำสุดของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ควรจะประมาณ 15 cm. และได้แนะนำวิธีการป้องกันการเกิด Reflective Crack โดยให้เปิดการจราจรหลังจากทำชั้นพื้นทางแล้วเสร็จ และบ่มด้วยน้ำประมาณ 3 วัน หลังจากนั้นจึงทำ Prime Coat และควรจะปูผิวแอสฟัลต์หลังจาก Prime Coat ทิ้งไว้ประมาณ 1 – 2 เดือน จะนานแค่ไหนขึ้นกับคุณสมบัติของดินและปริมาณจราจร ข้อกำหนดหลักที่สำคัญสำหรับวัสดุที่ใช้ในการทำดินซีเมนต์ชั้นทางต่างๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

คุณสมบัติ	ทล.-ม. 206/2532 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์	ทล.-ม. 204/2533 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์	ทล.-ม. 203/2532 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์
1.ดิน 1.1 การหาขนาดของวัสดุ (ทล.-ท.205/2517)	ขนาดเม็ดโตสุด $\leq$ 50 มม. ผ่านตะแกรง #200 $\leq$ 40%	ขนาดเม็ดโตสุด $\leq$ 50 มม. ผ่านตะแกรง #10 $\leq$ 70% ผ่านตะแกรง #200 $\leq$ 25%	เกรด B, C, D ส่วนที่ผ่านตะแกรง #200 $\leq$ (2/3) ของส่วนที่ผ่านตะแกรง #40
1.2 ค่า Liquid Limit (ทล.-ท.102/2515)	$\leq$ 40%	$\leq$ 40% (ถ้าเกิน 40% ต้องผสมปูนขาวไม่น้อยกว่า 2%)	$\leq$ 25%
1.3 ค่า Plasticity Index (ทล.-ท.103/2515)	$\leq$ 20%	$\leq$ 15% (ถ้าเกิน 15% ต้องผสมปูนขาวไม่น้อยกว่า 2%)	$\leq$ 6%
1.4 ค่าความสึกหรอ (ทล.-ท.202/2515)	-	$\leq$ 60%	$\leq$ 40%
1.5 ค่าความคงทน (ทล.-ท.213/2531)	-	-	$\leq$ 9% (ใช้โซเดียมซัลเฟต)
1.6 C.B.R. (ทล.-ท.109/2517)	-	-	$\geq$ 80%
2. ปูนซีเมนต์	ชนิดปอร์ตแลนด์ Type 1 (มอก.15) หรือชนิดปูนซีเมนต์ผสม (มอก.80)	ชนิดปอร์ตแลนด์ Type 1 (มอก.15)	ชนิดปอร์ตแลนด์ Type 1 (มอก.15)
3. ปูนขาว 3.1 การหาขนาดของวัสดุ (ทล.-ท.205/2517)	-	ผ่านตะแกรง #200 $\geq$ 70%	-
4. น้ำ	สะอาดปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรียวัตถุหรือสารอื่นใดๆ ห้ามใช้น้ำทะเลผสมหรือบ่ม	สะอาดปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรียวัตถุหรือสารอื่นใดๆ ห้ามใช้น้ำทะเลผสมหรือบ่ม	สะอาดปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรียวัตถุหรือสารอื่นใดๆ ห้ามใช้น้ำทะเลผสมหรือบ่ม
5. กำลังรับแรงอัด (ทล.-ท.105/2515)	7.0 ksc. (100 psi.)	17.5 ksc. (250 psi.)	24.6 ksc. (350 psi.)

6. ขั้นตอนในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ แบ่งเป็นขั้นตอนหลักๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

- การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น
- การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสม
- การทดลองผสม
- การวิเคราะห์ผลทดสอบ

6.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น

นำตัวอย่างดินที่จะใช้ในการออกแบบส่วนผสมมาทดสอบคุณภาพ ตามมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง ดังนี้

- ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ ให้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่ ทล.-ม.206/2532
- ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ให้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่ ทล.-ม.204/2533
- ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ให้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่ ทล.-ม.203/2532

6.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสม

ปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมไม่ควรน้อยกว่า 150 กิโลกรัม นำตัวอย่างมาทำให้แห้ง โดยวิธีตากแห้ง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีน้ำประมาณ 1 – 3%) ทำการแบ่งสี่ (Quartering) หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample Splitter) ดังรูปที่ 2 จากนั้นถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด (Maximum Size) มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ

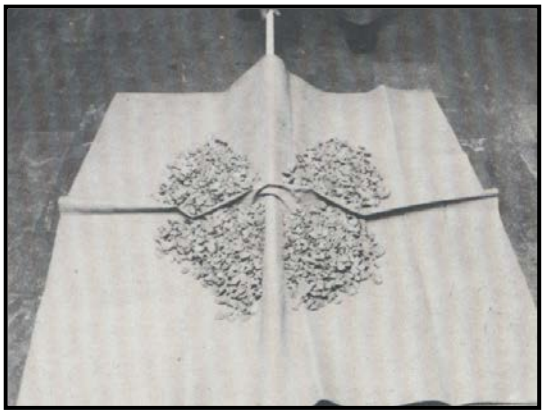
- ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)
- ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)
- ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

ทำการชั่งหามวลของวัสดุแต่ละขนาด ที่เตรียมไว้ทั้ง 3 ขนาด จากนั้นนำตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ทิ้งไป แล้วแทนที่มวลด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น

ตัวอย่างทั้งหมดมีมวล 3000 กรัม
มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร 900 กรัม
มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 1600 กรัม
มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 500 กรัม

จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว จะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้คือ
มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 900 + 1600 = 2500 กรัม
และมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร = 500 กรัม
คลุกตัวอย่างที่เตรียมได้ให้เข้ากัน

กรณีขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด (Maximum Size) มีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง (มีน้ำประมาณ 1 -3%) และทำการแบ่งสี่หรือใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง และคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน



การแบ่งสี่ (Quartering)

เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample Splitter)

รูปที่ 2 การแบ่งตัวอย่าง

6.3 การทดลองผสม ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม ควรกำหนดไม่น้อยกว่า 4 ค่า โดยพยายามกำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ให้ใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดตามกำหนดมากที่สุด โดยให้มีเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ทั้งที่น้อยกว่าและมากกว่า เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดที่กำหนด เช่น ต้องการออกแบบส่วนผสมพื้นทางดินซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดที่กำหนดคือ 17.5 ksc จากประสบการณ์คาดว่าใช้ซีเมนต์ 3% จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดตามกำหนด ดังนั้นอาจกำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่จะใช้ในการออกแบบคือ 1%, 2%, 3% และ 4%

ข้อแนะนำในการกำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ในการทดลองผสม สำหรับชั้นทางต่างๆ ดังนี้

- ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ควรกำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ในช่วง 1 – 3%
- ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ควรกำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ในช่วง 1 – 5%
- ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ ควรกำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ในช่วง 1 – 5%

2) ผสมตัวอย่างกับซีเมนต์ ตามเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่กำหนดไว้ในข้อ 1) นำมาทดลอง Compaction Test เพื่อหาปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content (OMC) ของแต่ละเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ หรืออาจใช้ปริมาณน้ำที่ OMC ที่ได้จากการทดลอง Compaction Test ของวัสดุนั้นๆ ก่อนผสมซีเมนต์

3) ทำแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อทดลองกำลังรับแรงอัด โดยแต่ละเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ควรทำแท่งตัวอย่างไม่น้อยกว่า 6 แท่งตัวอย่าง และในการทดลองควรใช้แบบฟอร์มตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3 ถึง 5

ขั้นตอนที่ 1 นำตัวอย่างดินที่เตรียมจากข้อ 6.2 จำนวน 3,000 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่เหมาะสมเพื่อผสมกับซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 หาค่ามวลรวมแห้งของตัวอย่างดิน (M_1) ดังนี้

$$M_1 = \frac{M_2}{\left(1+\left[\frac{W}{100}\right]\right)}$$

เมื่อ M_1 = มวลแห้งของตัวอย่างดิน (กรัม)

M_2 = มวลของตัวอย่างดิน ที่ใช้ทดลอง (กรัม)

W = ความชื้นของตัวอย่างดิน (%)

ขั้นตอนที่ 3 หามวลของซีเมนต์ที่ใช้ผสม (M_3)

$$M_3 = \frac{C}{100} \times M_1$$

เมื่อ M_3 = มวลของซีเมนต์ที่ใช้ผสม (กรัม)

C = เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ใช้ผสม (%)

M_1 = มวลแห้งของดิน (กรัม)

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าปริมาณน้ำที่ต้องใช้ผสมเพื่อให้ได้ปริมาณตาม OMC ที่ได้จากข้อ 2)

$$W_1 = W_2 - W$$

เมื่อ W_1 = เปอร์เซ็นต์น้ำที่ต้องผสมเพิ่ม (%)

W_2 = เปอร์เซ็นต์น้ำที่ OMC (%)

W = ความชื้นของตัวอย่างดิน (%)

และ $$M_4 = \frac{W_1}{100} \times \left(M_1 + M_3\right)$$

เมื่อ M_4 = มวลของน้ำที่ต้องผสมเพิ่ม (กรัม)

W_1 = เปอร์เซ็นต์น้ำที่ต้องผสมเพิ่ม (%)

M_1 = มวลแห้งของดิน (กรัม)

M_3 = มวลของซีเมนต์ที่ใช้ผสม (กรัม)

ขั้นตอนที่ 5 ผสมตัวอย่างดิน และซีเมนต์ให้เข้ากัน แล้วจึงเติมน้ำคลุกเคล้าให้เข้ากันสม่ำเสมอ บดอัดตัวอย่างตามวิธีการทดลองที่ ทล.- ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” (ดังรูปที่ 6)

ขั้นตอนที่ 6 เก็บตัวอย่างส่วนผสมตามขั้นตอนที่ 5 ทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแท่งตัวอย่าง (W_4)

และ $$W_4 = \frac{\left(M_{wet} - M_{dry}\right)}{M_{dry}} \text{ x } 100$$

W_4 = เปอร์เซ็นต์ความชื้นแท่งตัวอย่าง (%)

M_{wet} = มวลของตัวอย่างส่วนผสมเปียก (กรัม)

M_{dry} = มวลของตัวอย่างส่วนผสมแห้ง (กรัม)

ขั้นตอนที่ 7 นำแท่งตัวอย่างออกจากแบบ โดยใช้แม่แรงดันออก ต้องระมัดระวังอย่าให้แท่งตัวอย่างเสียหาย (ดังรูปที่ 7)

ขั้นตอนที่ 8 บันทึกมวลและปริมาตรของแท่งตัวอย่าง (ปริมาตรของแท่งตัวอย่างอาจใช้เท่ากับขนาดของโมลโดยอนุโลม) เพื่อหาความแน่นแห้ง (D_1)

$$D = \frac{M_5}{V}$$

เมื่อ D = ความแน่นเปียก (กรัมต่อมิลลิลิตร)

M_5 = มวลของแท่งตัวอย่าง (กรัม)

V = ปริมาตรแท่งตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

และ

$$D_1 = \frac{D}{1+\frac{W_4}{100}}$$

เมื่อ D_1 = ความแน่นแห้ง (กรัมต่อมิลลิลิตร)

W_4 = เปอร์เซ็นต์ความชื้นแท่งตัวอย่าง (%)

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

งาน .....

Test No. ..... Description .....

Source ..... Stockpile No. .....

Location Of Sampling .....

Cement ..... Tested by ..... Date .....

Type Of Test	- - - - - - - -	
Mass Of Sample	- - - - - - - -	gm.
Moisture Of Sample	- - - - - - - -	%
Mass Of Dry Soil	- - - - - - - -	gm.
Cement (- - - - %)	- - - - - - - -	gm.
Mass Of Dry Soil + Cement	- - - - - - - -	gm.
O.M.C.	- - - - - - - -	%
Used Water	- - - - - - - -	%
Water Added	- - - - - - - -	gm.

WATER CONTENT

Can No.				
Mass Of Can + Wet Soil	gm.			
Mass Of Can + Dry Soil	gm.			
Mass Of Water	gm.			
Mass Of Can	gm.			
Mass Of Dry Soil	gm.			
Water Content	%			
Average Water Content	%			

รูปที่ 3 แบบฟอร์มตัวอย่างการหาอัตราส่วนผสม

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

งาน .....

Test No. ..... Description .....

Source ..... Stockpile No. .....

Location Of Sampling .....

Cement ..... Tested by ..... Date .....

Type Test ..... Mold Mass ..... Kgs. Volume ..... ml.

DENSITY

Sample No.										
Mass Of Mold + Soil	Kg.									
Mass Of Mold	Kg.									
Mass Of Sample	Kg.									
Wet Density	gm./ml.									
Dry Density	gm./ml.									
Average Dry Density	gm./ml.									

WATER CONTENT

Can No.										
Mass Of Can + Wet Soil	gm.									
Mass Of Can + Dry Soil	gm.									
Mass Of Water	gm.									
Mass Of Can	gm.									
Mass Of Dry Soil	gm.									
Water Content	%									
Average Water Content	%									

COMPRESSIVE STRENGTH

Proving Ring No. ..... K Factor = ... lbs.

Sample No.	Date Molded	Date Broken	Curing Days	Dimensions			Dial Reading	Ultimate load lbs.	Uc Psi.	Uc ksc.	Remark
				D (in.)	H (in.)	A ($in.^2$)					
Average Unconfined Compressive Strength = ... ksc.											

รูปที่ 4 แบบฟอร์มตัวอย่างการทำแท่งตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

MIX DESIGN .....

Test No. ..... Description .....

Source ..... Stockpile No. .....

Location Of Sampling .....

Cement ..... Tested by ..... Date .....

Cement ..... % UCS. = ... ksc.

Cement ..... % UCS. = ... ksc.

Cement ..... % UCS. = ... ksc.

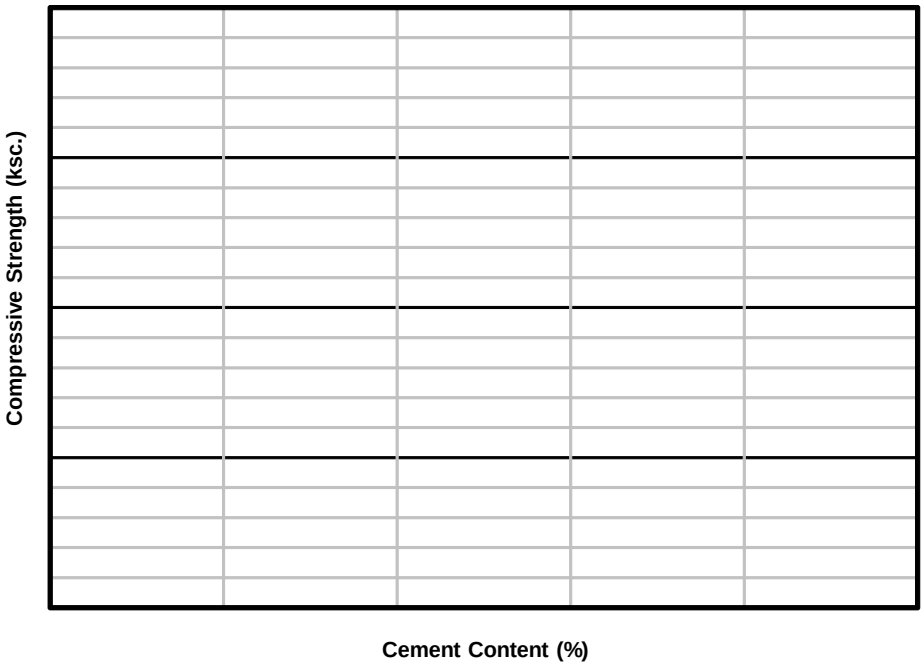
Cement ..... % UCS. = ... ksc.

Cement ..... % UCS. = ... ksc.

Required Unconfined Compressive Strength = ... ksc.

..... % Required Unconfined Compressive Strength = ... ksc.

Cement Content At ..... % Required UCS. = ... %



รูปที่ 5 แบบฟอร์มตัวอย่างสำหรับการหาเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ใช้งาน

1. เทส่วนผสมดินกับซีเมนต์

2. ผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากัน

3. เติมน้ำหลังจากผสมดินกับซีเมนต์ให้เข้ากันแล้ว

4. คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน

5. เก็บตัวอย่างไปหาค่าความชื้น

6. บดอัดแท่งตัวอย่าง

รูปที่ 6 ขั้นตอนการทำแท่งตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 7 การดันแท่งตัวอย่างออกจากแบบ

ขั้นตอนที่ 9 นำแท่งตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกทันที เพื่อรักษาความชื้นในตัวอย่างไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง

ขั้นตอนที่ 10 ดำเนินการทำซ้ำตามขั้นตอนก่อนหน้านี้ทั้ง 9 ขั้นตอน เพื่อให้ได้แท่งตัวอย่างตามที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 11 ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 - 10 โดยเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ตามที่กำหนดในข้อ 1)

4) การบ่ม ทำการบ่มแท่งตัวอย่างแต่ละแท่งในถุงพลาสติก เพื่อรักษาความชื้นในตัวอย่างไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8

รูปที่ 8 การบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติก

5) การทดลองกำลังรับแรงอัด หลังจากบ่มจนครบกำหนด นำแท่งตัวอย่างออกจากถุงพลาสติก แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ทิ้งไว้ให้หมาด แล้วนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดตามวิธีการทดลองที่ ทล.– ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน” โดยอนุโลม ซึ่งดำเนินการดังนี้

- วางแท่งตัวอย่างระหว่างแผ่นกดและแผ่นฐาน โดยให้ศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างอยู่ตรงศูนย์กลางแผ่นกดและแผ่นฐาน

- เริ่มกดทดสอบให้ได้อัตราการกดที่จะใช้ (ประมาณ 0.5 - 2.0% ของความยาวต่อนาที) จนกระทั่งได้แรงกดสูงสุด สังเกตจากน้ำหนักกดที่อ่านจากวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) เริ่มลดลง ทำการบันทึกแรงกดสูงสุด

- คำนวณหากำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS)

$$UCS = \frac{P}{A}$$

เมื่อ UCS = กำลังรับแรงอัด (ksc หรือ psi)

P = แรงกดสูงสุด (kg หรือ lb)

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง ($cm.^2$ หรือ $in.^2$) = πr^2

r = รัศมีของแท่งตัวอย่าง (cm.หรือ in.)

รูปที่ 9 ทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์โดยวิธี Unconfined Compression Test

6.4 การวิเคราะห์ผลทดสอบเพื่อเป็นเกณฑ์ในการกำหนดอัตราส่วนผสม

1) หาค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างแต่ละเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ โดยตัดค่าที่สูงหรือต่ำผิดปกติทิ้งไป ค่ากำลังรับแรงอัดที่นำมาหาค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 3 ค่า (ดังรูปที่ 10)

2) เขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย โดยความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยแปรผันโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ ลากเส้นตรงให้ใกล้เคียงจุดต่างๆ มากที่สุด (ดังรูปที่ 11)

3) กำหนดเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพื่อใช้ในการก่อสร้างแปลงทดลอง ให้เลือกเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์จากกราฟที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 105 – 125% ของแรงอัดที่กำหนด (โดยทั่วไปควรเลือกที่ประมาณค่าตัวกลางคือ 115%) เช่น

แรงอัดที่กำหนดในแบบ	=	24.5	ksc
105 % แรงอัดกำหนดในแบบ	=	25.7	ksc
115 % แรงอัดกำหนดในแบบ	=	28.2	ksc
125 % แรงอัดกำหนดในแบบ	=	30.6	ksc

เลือกเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ ซึ่งให้กำลังรับแรงอัด = 28.2 ksc เพื่อทำแปลงทดลองในสนามจากรูปที่ 12 ต้องใช้ซีเมนต์ 1.78% ในการผสมเริ่มแรก

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง

งาน Cement Modified Crushed Rock Base

Test No. GM - 1 Description Cement Modified Crushed Rock Base

Source โรงโม่หินศิลาสินทรัพย์ km.129+000 RT. 0.8 กม. Route No.1 สายพหลโยธิน Stockpile No. 1 KM.30+800 Route No.9

Location Of Sampling KM.29+175 - KM.34+700

Cement 1.50 % (Portland Type 1 ตรานกอินทรีย์) Tested by คมกฤต, จรัญ, สุวัฒน์ Date 21 มีนาคม 2552

Type Test Modified Compaction Mold Mass 4.935 Kgs. Volume 948 ml.

DENSITY

Sample No.		1	2	3	4	5	6			
Mass Of Mold + Soil	Kg.	7.207	7.170	7.225	7.197	7.210	7.225			
Mass Of Mold	Kg.	4.935	4.935	4.935	4.935	4.935	4.935			
Mass Of Sample	Kg.	2.272	2.235	2.290	2.262	2.275	2.290			
Wet Density	gm./ml.	2.397	2.358	2.416	2.386	2.400	2.416			
Dry Density	gm./ml.	2.293	2.246	2.305	2.274	2.290	2.295			
Average Dry Density	gm./ml.	2.284								

WATER CONTENT

Can No.		41	27	39	15	7	50			
Mass Of Can + Wet Soil	gm.	321.0	320.5	315.0	321.5	293.2	344.5			
Mass Of Can + Dry Soil	gm.	308.7	307.0	302.2	308.1	281.4	329.1			
Mass Of Water	gm.	12.3	13.5	12.8	13.4	11.8	15.4			
Mass Of Can	gm.	35.4	35.4	34.8	35.4	35.2	35.0			
Mass Of Dry Soil	gm.	273.3	271.6	267.4	272.7	246.2	294.1			
Water Content	%	4.5	5.0	4.8	4.9	4.8	5.2			
Average Water Content	%	4.9								

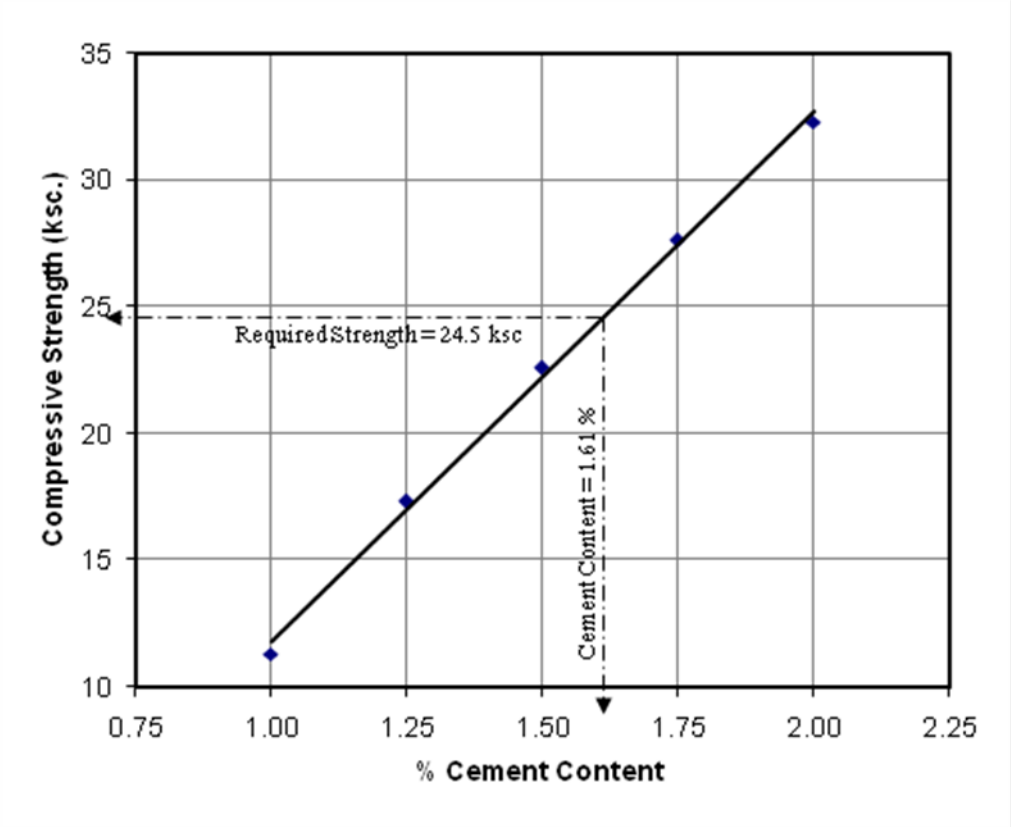
COMPRESSIVE STRENGTH

Proving Ring No. 490209 K Factor = (D X 24.301) + (-188) lbs.

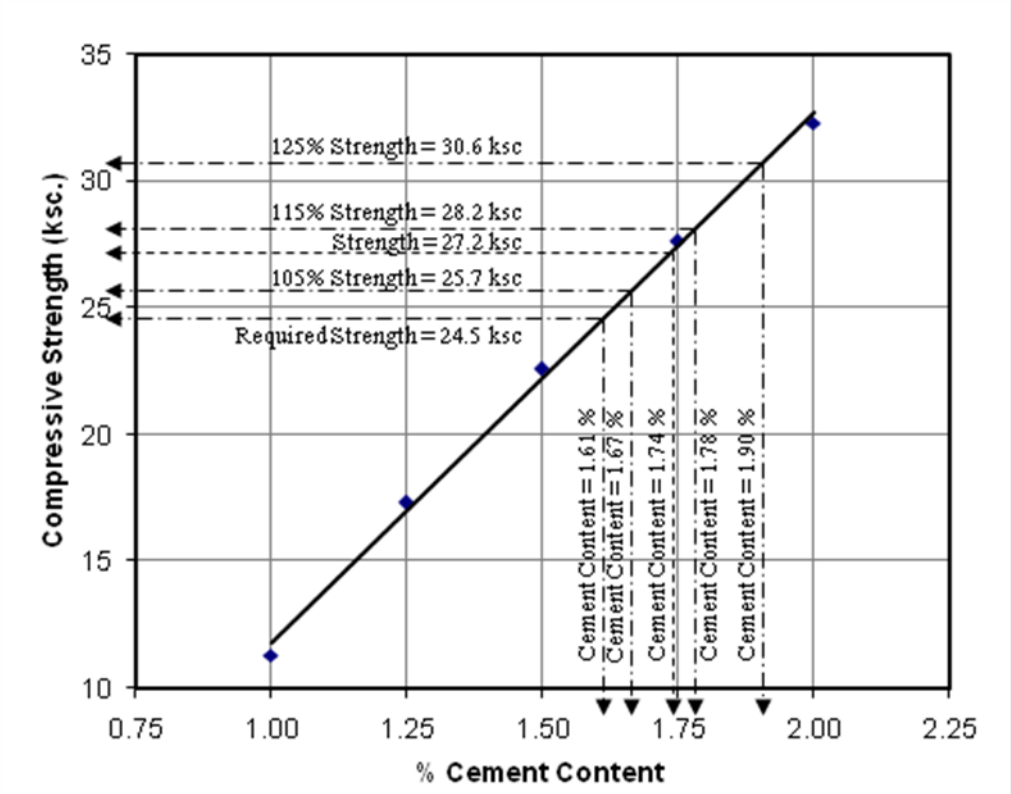
Sample No.	Date Molded	Date Broken	Curing Days	Dimensions D (in.)	H (in.)	A (in.^{2})	Dial Reading	Ultimate load lbs.	Uc Psi.	Uc ksc.	Remark
1	21 มี.ค. 52	28 มี.ค. 52	7	4.0	4.6	12.57	165	3821.67	304.1	21.4	
2	21 มี.ค. 52	28 มี.ค. 52	7	4.0	4.6	12.57	180	4186.18	333.1	23.5	
3	21 มี.ค. 52	28 มี.ค. 52	7	4.0	4.6	12.57	202	4720.80	375.7	26.5	ไม่ใช้
4	21 มี.ค. 52	28 มี.ค. 52	7	4.0	4.6	12.57	175	4064.68	323.5	22.8	
5	21 มี.ค. 52	28 มี.ค. 52	7	4.0	4.6	12.57	175	4064.68	323.5	22.8	
6	21 มี.ค. 52	28 มี.ค. 52	7	4.0	4.6	12.57	200	4672.20	371.8	26.2	ไม่ใช้

Average Unconfined Compressive Strength = 22.62 ksc.

รูปที่ 10 การหาค่าเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างในแต่ละเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์



รูปที่ 12 การหาปริมาณปูนซีเมนต์ตามประสิทธิภาพของเครื่องจักร

4) ตรวจสอบค่ากำลังรับแรงอัดจากแปลงทดลองในสนาม เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ขณะก่อสร้างแปลงทดลอง ให้ครอบคลุมแปลงทดลองทั้งหมด ให้ได้จำนวนแท่งตัวอย่างไม่น้อยกว่า 27 แท่งตัวอย่าง หาค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ได้จากแปลงทดลอง

5) <u>เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ใช้ผสมในระหว่างก่อสร้าง จะต้องคิดเผื่อประสิทธิภาพของการผสมด้วย</u> เมื่อใช้เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ตามที่ได้เลือกไว้ในข้อ 3) ประสิทธิภาพของการผสมสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพของการผสม} = \frac{\text{กำลังรับแรงอัดจากแปลงทดลองในสนาม}}{\text{กำลังรับแรงอัดจากการผสมในห้องทดลอง}} \times 100$$

เช่น แรงอัดที่กำหนดในแบบคือ 24.5 ksc

เลือกเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ 115% ของแรงอัดที่กำหนดคือ 28.2 ksc ใช้ซีเมนต์ 1.78%

จากการทำแปลงทดลองได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 25.4 ksc

ดังนั้น ประสิทธิภาพการผสม $= \frac{25.4}{28.2} \times 100 = 90\ \%$

การปรับส่วนผสมที่จะใช้ในระหว่างการก่อสร้าง $= \frac{24.5}{\left(\frac{90}{100}\right)} = 27.2$ ksc

นำค่า 27.2 ksc ไปหาค่าเปอร์เซ็นต์จากกราฟ ในรูปที่ 12

จะได้เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่จะใช้ในระหว่างก่อสร้าง = 1.74 %

ข้อควรระวังในการคิดประสิทธิภาพ

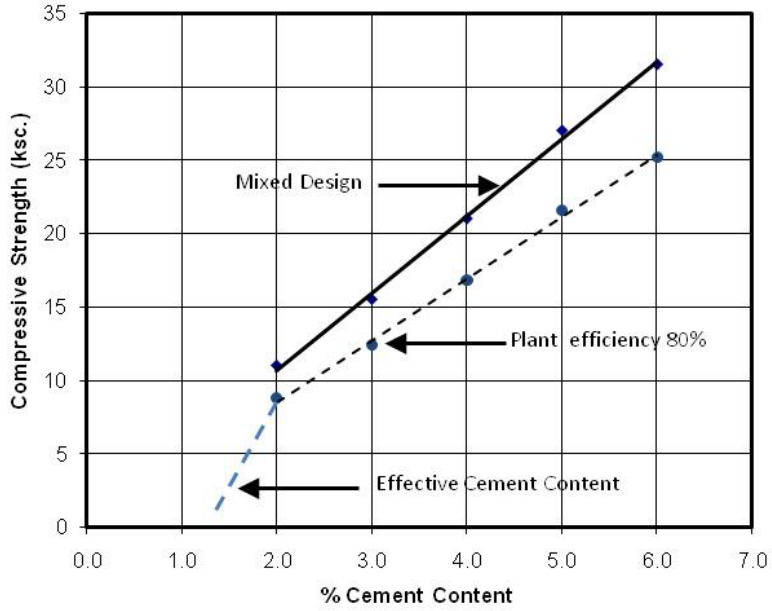
- เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นแหล่งวัสดุ เครื่องจักร เครื่องมือ หรือสิ่งอื่นใด ที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการผสมเปลี่ยนไป จะต้องทำการตรวจสอบหาประสิทธิภาพของการผสมใหม่ทุกครั้ง เพื่อปรับส่วนผสมให้ถูกต้องอยู่เสมอ

- ในกรณีใช้โรงผสมแบบเคลื่อนที่ในการก่อสร้างชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ ถ้าเจ้าหน้าที่ของบริษัทก่อสร้างไม่เคยทำงาน Soil Cement มาก่อน อาจคิดประสิทธิภาพเริ่มต้นที่ 50 เปอร์เซ็นต์

- ส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์น้อยมาก เช่น ถ้าวัสดุมวลรวมมีคุณภาพดีมากอาจต้องการซีเมนต์เพียง 2 เปอร์เซ็นต์ แต่โรงผสมไม่สามารถทำได้เช่นเดียวกับการผสมในห้องทดลอง ดังนั้นจะต้องตรวจสอบ

โรงผสมว่าจำนวนซีเมนต์ที่น้อยที่สุด ที่โรงผสมสามารถผสมได้ (Effective Cement Content) มีค่าเท่าใด ดังรูปที่ 13

- ในการออกแบบส่วนผสมห้ามทำการต่อ Curve ออกไป เช่น ออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ 3-7 เปอร์เซ็นต์ ถ้าจะใช้ส่วนผสมที่น้อยกว่า 3 หรือมากกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ จะต้องทำตัวอย่างเพิ่มเพื่อหาค่าที่แท้จริง เพราะในการออกแบบส่วนผสมจำนวนเปอร์เซ็นต์น้อยลงจะมี Effective Cement Content โดยปริมาณซีเมนต์ที่น้อยมาก จะไม่สามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างของมวลรวมได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ไม่ได้กำลังอัดตามต้องการ



รูปที่ 13 แสดงข้อควรระวังในการคิดประสิทธิภาพเนื่องจาก Effective Cement Content ของ Plant

7. สรุป

จากโครงการพัฒนาคุณภาพการบริหารจัดการภาครัฐ ของกรมทางหลวง หมวด 4 เรื่องการวัด การวิเคราะห์ และการจัดการความรู้ กลุ่มงานตรวจสอบและแนะนำวัสดุสร้างทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ จึงได้มีการจัดตั้งชุมชนนักปฏิบัติ (CoP) เพื่อจัดทำข้อแนะนำการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์ ซึ่งในอดีตเจ้าหน้าที่ผู้ทำการออกแบบวัสดุดินซีเมนต์แต่ละท่านอาจมีรายละเอียดของการออกแบบและวิธีการประเมินผลการทดสอบที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงได้มีการศึกษา ค้นคว้า รวบรวมข้อมูล ทั้งจากเอกสารและจากเจ้าหน้าที่ผู้มีประสบการณ์ทำงานด้านการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์ และประชุมคณะทำงาน

วิชาการด้านดินและวัสดุมวลรวม เพื่อที่จะกำหนดแนวทางในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ให้ถูกต้องเหมาะสมเป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งหน่วยงาน จนสรุปได้แนวทางในการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์ตามที่กล่าวมาแล้วในเอกสารข้างต้น เพื่อให้เจ้าหน้าที่ในหน่วยงานได้นำไปเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมวัสดุดินซีเมนต์ต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2532. **ทล.-ม.203/2532 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base)**

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2533. **ทล.-ม.204/2533 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)**

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2532. **ทล.-ม.206/2532 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)**

ศุภกิจ นนทนานันท์. **การปรับปรุงคุณภาพดิน**, เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, อนันต์ ทวีวรรณสดใด, 2543. **คุณสมบัติความเค้นความเครียดของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวดิ่ง.** รายงานฉบับที่ วพ.179 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

จุฑา สุนิตย์สกุล และคณะ, 2549. **คุณสมบัติของดินซีเมนต์**, รายงานฉบับที่ วพ.229 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

Portland Cement Association (PCA), 2011. **Soil – Cement Pavements and Applications**. (http://www.cement.org/pavements/pv_sc.asp)

Wirtgen Cold Recycling Technology, 3rd Edition 2010.

****