กรมทางหลวง

การเสริมกำลังโครงสร้าง

Structural Strengthening

เอกสารความรู้ด้านงานบำรุงรักษาและเสริมกำลังโครงสร้าง







เนื้อหาสำคัญภายในเล่ม

การเสริมกำลังจุดต่อ
- การสร้าง Corbel Bearing ขึ้นมาใหม่
- การติดตั้ง Compression Strut ภายนอก
- การติดตั้ง Bearing Assemble ภายนอก

การลดความเค้นในโครงสร้าง
- การติดตั้งรอยต่อเพื่อการขยายตัว
- การหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเคลื่อนที่ด้านข้าง

วัสดุพิเศษเสริมกำลังด้วยไฟเบอร์ (FRP)
- การติดตั้งระบบ FRP
- การเสริมกำลังในการรับแรงดัด
- การเสริมกำลังในการรับแรงเฉือน

แนวทางการซ่อมแซม ปรับปรุง และเสริมกำลังโครงสร้าง

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 หลักการเสริมกำลังให้กับโครงสร้าง	**1-1**
1.1 ประเภทของการเสริมกำลัง	1-1
1.2 เทคนิคในการเสริมกำลัง	1-2
1.3 ข้อควรพิจารณาในการเสริมกำลัง	1-5
1.4 การออกแบบการเสริมกำลัง	
บทที่ 2 การเสริมกำลังรับแรงอัด	**2-1**
2.1 บทนำ	2-1
2.2 การเสริมกำลังโดยการเทคอนกรีตทับหน้าและการขยายหน้าตัด	2-2
2.3 การเสริมกำลังโดยการประกบด้วยวัสดุเสริม	2-3
2.4 การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกที่หลัง	2-5
2.5 การเสริมกำลังโดยการลดความยาวช่วง	2-6
2.6 การเสริมกำลังกำแพงกันดิน	2-7
บทที่ 3 การเสริมกำลังความสามารถในการรับแรงเฉือน	**3-1**
3.1 บทนำ	3-1
3.2 การเสริมกำลังความแข็งแรงภายในแบบ Passive	3-2
3.3 การเสริมกำลังรับแรงเฉือนในบริเวณจุดหมุนของคาน	3-3
3.4 การเสริมกำลังโดยวิธี External Post-Tensioned Straps	3-4
บทที่ 4 การเสริมกำลังความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างชิ้นส่วน	**4-1**
4.1 บทนำ	4-1
4.2 เดือยเหล็กรับแรงเฉือน	4-3
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในรูเจาะเพื่อเสริมกำลังรับแรงเฉือน	4-4
4.4 การทำ Grout Subgrade	4-5
4.5 การใส่แขนเพื่อรับแรงเฉือน	4-5
บทที่ 5 การเสริมกำลังในเสา	**5-1**
5.1 การเสริมกำลังรับแรงอัดให้แก่เสาโดยวิธีขยายขนาด	5-1
5.2 การเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยใช้ปลอกรับแรงเฉือน	5-2

	หน้า
5.3 การเสริมกำลังรับโมเมนต์ระหว่างคานและเสา	5-3
5.4 การเสริมกำลังโดยการหุ้ม	5-4
บทที่ 6 การเสริมกำลังจุดต่อ	**6-1**
6.1 การสร้าง Corbel Bearing ขึ้นมาใหม่	6-1
6.2 การติดตั้ง Compression Strut ภายนอก	6-1
6.3 การติดตั้ง Bearing Assemble ภายนอก	6-4
บทที่ 7 การลดความเค้นในโครงสร้าง	**7-1**
7.1 การติดตั้งรอยต่อเพื่อการขยายตัว	7-1
7.2 การหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเคลื่อนที่ด้านข้าง	7-1
บทที่ 8 วัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยไฟเบอร์	**8-1**
8.1 บทนำ	8-1
8.2 ข้อมูลต่างๆ ของระบบ FRP	8-5
8.3 วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุ	8-7
8.4 การขนส่ง การเก็บรักษา และการนำไปใช้	8-11
8.5 การติดตั้งระบบ FRP	8-12
8.6 การตรวจสอบ การประเมินงาน และการรับงาน	8-21
8.7 การดูแล และ ซ่อมแซม	8-25
8.8 ข้อพิจารณาทั่วไปในการออกแบบ	8-26
8.9 การเสริมกำลังในการรับแรงดัด	8-29
8.10การเสริมกำลังในการรับแรงเฉือน	8-36
8.11รายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมกำลัง	8-40
8.12 แบบ	8-42

บทที่ 1

หลักการเสริมกำลังให้กับโครงสร้าง

1.1 ประเภทของการเสริมกำลัง

การเสริมกำลังโครงสร้าง (Structural Strengthening) เป็นกระบวนการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความมั่นคงแข็งแรง หรือความสามารถในการรับน้ำหนักให้กับโครงสร้าง โดยใช้เทคนิคและวิธีการต่างๆ ซึ่งการพิจารณาเทคนิควิธีในการเสริมกำลังนั้นจะต้องคำนึงถึงสภาพ พฤติกรรม และคุณสมบัติของโครงสร้างอย่างรอบคอบ เพราะในบางครั้งการปรับปรุงคุณสมบัติอย่างหนึ่ง อาจเป็นการสร้างภาระอย่างอื่นให้กับโครงสร้าง เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เพิ่มขึ้น หรือการเปลี่ยนแปลงการกระจายของแรงทำให้ชิ้นส่วนอื่นของโครงสร้างเกิดการวิกฤต เป็นต้น ส่งผลให้โครงสร้างมีความไม่ปลอดภัย หรือ มีความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

วิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้าง สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะใหญ่ ตามกลไกของการต้านทานแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง ได้แก่

1.) *การเสริมกำลังแบบ Active* เป็นการเสริมกำลังโดยการใส่แรงเข้าไปในโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงที่กระทำกับโครงสร้าง เช่น การอัดแรง (Prestressing) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเสริมกำลังแบบนี้จะทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทันที แม้จะยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำ เช่น การแอ่นตัวหรือหน่วยแรงภายในมีค่าลดลง นิยมใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีหน่วยแรงภายในสูงเกินปกติ (Overstressed)

2.) *การเสริมกำลังแบบ Passive* โดยปกติ การเสริมกำลังในประเภทนี้จะไม่ได้ช่วยโครงสร้างรับแรงในทันที แต่จะช่วยกระจายแรงเนื่องน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้นมาหลังจากการเสริมกำลังแล้ว ตัวอย่างเช่น การเพิ่มความหนาของหน้าตัดพื้นสะพานไม่ได้ทำให้หน่วยแรงภายใน หรือการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างลดลง (ในทางกลับกันหน่วยแรงภายในหรือการแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างมีน้ำหนักบรรทุกคงที่มากขึ้น) แต่พื้นสะพานที่เสริมกำลังแล้วจะมีการสั่นไหว หน่วยแรงภายในที่เพิ่มขึ้น หรือการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นลดลง ในขณะที่มีรถบรรทุกวิ่งอยู่บนพื้นสะพาน แต่ในบางครั้งการเสริมกำลังแบบ Passive นี้อาจทำให้สามารถช่วยรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และช่วยลดการแอ่นตัว

ของโครงสร้างได้ ด้วยการปรับวิธีการทำงานบางส่วน เช่น การใช้แรงดันให้พื้นสะพานยกตัวสูงขึ้นก่อนการขยายหน้าตัดพื้นสะพาน

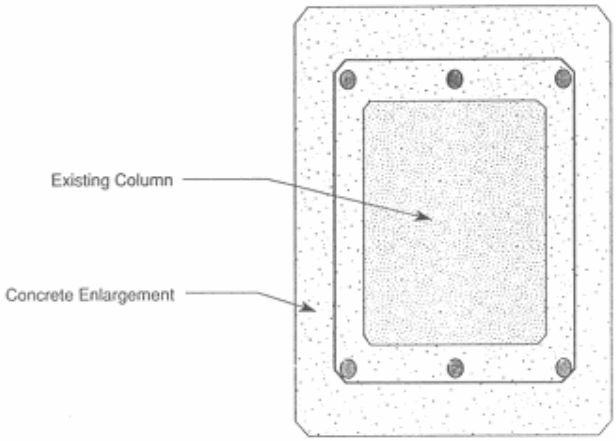
1.2 เทคนิควิธีการในการเสริมกำลัง

การเสริมกำลังของโครงสร้างสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับแนวความคิดของผู้ออกแบบเสริมกำลัง ซึ่งในแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยเทคนิควิธีการเสริมกำลังต่างๆ ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันสามารถสรุปในหลักการได้ดังนี้

1.2.1 การขยายขนาดหน้าตัด (Section Enlargement)

การขยายขนาดหน้าตัดเป็นวิธีการเสริมกำลังที่ง่ายที่สุด โดยการเพิ่มปริมาณของวัสดุ อันได้แก่ คอนกรีตและเหล็กเสริมให้แก่ชิ้นส่วนโครงสร้างเดิม สามารถกระทำได้ทุกชิ้นส่วนไม่ว่าจะเป็นคาน พื้น เสา หรือ กำแพง ซึ่งการขยายขนาดหน้าตัดนี้จะเป็นการเพิ่มความแข็ง (Stiffness) หรือ ความสามารถในการบรรทุกน้ำหนัก (Load Carrying Capacity) โดยส่วนใหญ่แล้วหน้าตัดส่วนที่เพิ่มขึ้นมานี้จะต้องยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเดิมได้อย่างดี เพื่อทำให้เป็นชิ้นส่วนแน่นและมีพฤติกรรมเป็นเนื้อเดียวกัน

แต่การขยายขนาดหน้าตัดจะมีข้อเสีย คือ จะทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักบรรทุกคงที่มากขึ้น ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้มาจะต้องแบกรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น บางครั้งอาจจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน นอกจากนั้น ถ้าชิ้นส่วนอื่นไม่สามารถรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาได้ อาจทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นในบริเวณที่มีข้อจำกัดด้านสถานที่ อาจทำให้การขยายขนาดทำไม่ได้

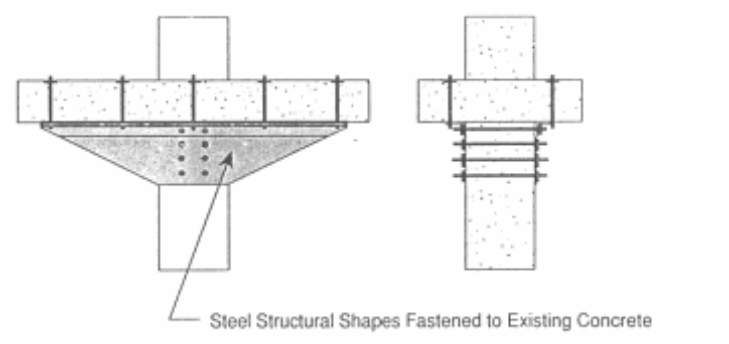


***รูปที่ 1-1** แสดงการขยายขนาดชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต*

1.2.2 การประกบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน (Composite Construction)

ในกรณีที่การขยายหน้าตัดด้วยวัสดุเดิมไม่สามารถทำได้ การใช้วัสดุอื่นที่มีความเหมาะสมเข้ามาเสริมแทนก็นับว่าเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่ง โดยสามารถช่วยเพิ่มความแข็งหรือความสามารถในการรับน้ำหนักได้ ด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่

ที่น้อยลง หรือต้องการพื้นที่ดำเนินการที่น้อยกว่า วัสดุที่นิยมนำมาให้มากที่สุดคือ เหล็ก (Steel) ซึ่งจะใช้แผ่นเหล็กหรือเหล็กรูปพรรณมาประกอบเป็นรูปร่างต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อข้อกำหนดหรือความต้องการใช้งาน สิ่งที่สำคัญซึ่งต้องพิจารณาในการเสริมกำลังวิธีนี้ คือการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุก (Load Transfer) ระหว่างวัสดุเก่าและวัสดุใหม่ โดยอาจใช้ สารเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesives) การเทอุด (Grout) หรือใช้ระบบกลไกเพื่อยึดต่างๆ (Mechanical Anchorage)



รูปที่ 1-2 *แสดงการประกบด้วยวัสดุต่างชนิด*

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาใช้วัสดุประเภทอื่น ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงที่ดี มาเป็นวัสดุประกบ เช่น CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าเหล็ก 10 เท่า แต่การใช้งานยังไม่แพร่หลายมากนัก เพราะมีราคาสูง และต้องการการติดตั้งจากผู้เชี่ยวชาญ

1.2.3 การเสริมเหล็กรับแรงดึงภายหลัง (Post-Tensioning)

วิธีเสริมเหล็กรับแรงดึงภายหลังนี้จะถูกนำมาใช้โดยการให้แรงดึงแก่โครงสร้างไปก่อน (Prestressing) โดยจะทำให้โครงสร้างสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น การติดตั้งชิ้นส่วนที่ใช้รับแรงดึงนั้น สามารถทำได้ทั้งแบบภายในและภายนอกขององค์อาคาร โดยทั่วๆ ไปแล้ว ชิ้นส่วนที่ใช้รับแรงดึงได้แก่ แผ่นเหล็ก (Steel Plates) แท่งเหล็ก (Rods) ลวดเอ็น (Tendons) หรือ ลวดเกลียว (Strand) การให้แรงดึงแก่ส่วนประกอบต่างๆ นั้น ทำได้โดยการใช้แม่แรง (Jacking) หรือการให้ความร้อน (Pre-Heating) วิธีการเสริมกำลังประเภทนี้จะช่วยลดหน่วยแรงในโครงสร้าง (Overstress) จากการเกิดแรงดึงแบบเฉือน แรงอัด หรือแรงบิดได้ นอกจากนั้นวิธีการนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้กับการลดการแอ่นตัว หรือการเคลื่อนที่ไม่ต้องการของโครงสร้างต่างๆ และช่วยให้เปลี่ยนจากโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องให้เป็นองค์อาคารที่มีความต่อเนื่องได้

1.2.4 การลดแรงเค้น (Stress Reduction)

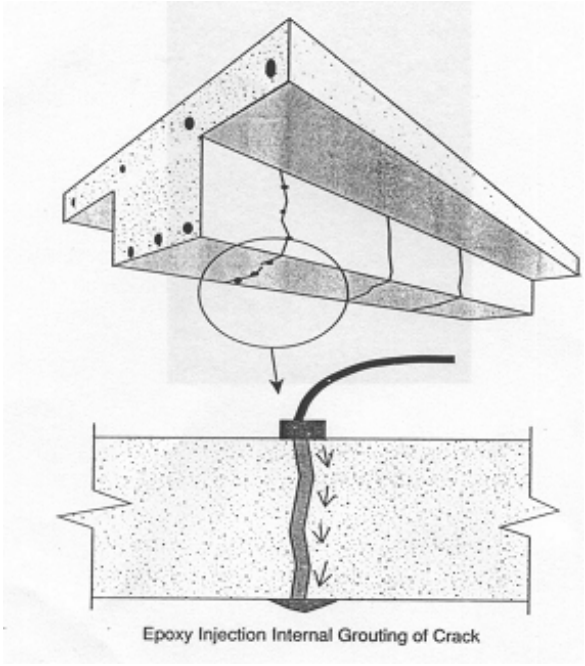
เป็นวิธีการที่มีจุดมุ่งหมายในการลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง โดยอาศัยหลักการในการกำจัดส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้างออกไป วิธีการที่ใช้โดยทั่วๆ ไปก็คือ การตัดแนวรอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint) ขึ้นมาใหม่ และการติดตั้งฐานรองรับ (Bearing) เพื่อแยกส่วนของโครงสร้างออกไป การเสริมกำลังโครงสร้างวิธีนี้ถือว่าเป็นการเปลี่ยนพฤติกรรมของโครงสร้างอย่างหนึ่ง เช่นเดียวกับการทำให้โครงสร้างมีความต่อเนื่อง เพื่อทำให้มีการกระจายแรงจากชิ้นส่วนหนึ่งไปอีกชิ้นส่วนหนึ่ง ทำให้หน่วยแรงภายในลดลง

1.2.5 การเติมวัสดุภายใน (Internal Grouting)

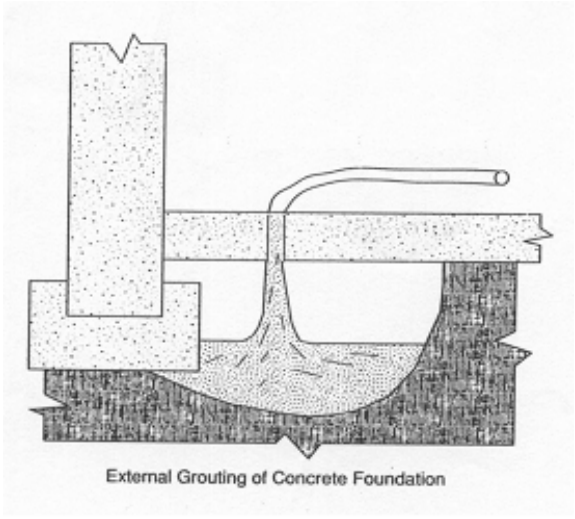
เป็นวิธีการเติมวัสดุที่สามารถไหลเข้าไปอุดช่องว่างที่เกิดขึ้นได้ เช่น รอยแตกภายในชิ้นส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีต โดยวัสดุชนิดนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างนั้นและทำให้บริเวณนั้นมีความแข็งแรงเหมือนเดิม นอกจากนี้วิธีการเติมวัสดุภายในนี้ยังถูกนำมาใช้ในการซ่อมความไม่สมบูรณ์ของคอนกรีตแบบรังผึ้ง (Honeycomb) หรือการเกิดช่องว่าง (Void) ในคอนกรีตด้วย วัสดุที่นิยมนำมาใช้จะเป็นวัสดุจำพวกโพลิเมอร์ (Polymers) หรือ วัสดุที่มีส่วนผสมของซีเมนต์

1.2.6 การเติมวัสดุด้านนอก (External Grouting)

การเติมวัสดุด้านนอกจะเป็นวิธีการที่ใช้วัสดุที่ถูกปั๊มได้ (Pumpable) เข้าไปสู่บริเวณที่ต้องการ ซึ่งจะอยู่ภายนอกโครงสร้าง และโดยทั่วๆ ไปแล้ว ได้แก่ บริเวณดินรอบๆ ฐานราก หรือ ที่ผิวสัมผัสระหว่างโครงสร้างและดิน ที่ดินอาจเกิดการทรุดตัว หรือถูกชะออกไป ทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่างโครงสร้างและดิน วัสดุที่ใช้เติมนี้จะสามารถช่วยในการถ่ายเทน้ำหนักระหว่างโครงสร้างและดินได้ รวมทั้งขจัดปัญหาการทรุดตัวได้ วัสดุที่นิยมใช้ทำเติม ได้แก่ วัสดุที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ คล้ายกับการเติมวัสดุภายใน



รูปที่ 1-3 *แสดงการเติมวัสดุภายใน*



รูปที่ 1-4 *แสดงการเติมวัสดุภายนอก*

1.3 ข้อควรพิจารณาในการเสริมกำลัง

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า การพิจารณาเลือกวิธีการเสริมกำลังสะพานจะต้องมีความละเอียดรอบคอบ เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้น ข้อควรพิจารณาต่างๆ ในการกำหนดเทคนิควิธีการเสริมกำลังสามารถสรุปได้ดังนี้

1.) *คุณสมบัติที่ต้องการเสริมกำลัง* เนื่องจากการเสริมกำลังในแต่ละลักษณะจะส่งผลกับโครงสร้างแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะต้องระบุคุณสมบัติของโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลังให้แน่ชัด เช่น การเสริมความสามารถในการต้านทานแรงดัด แรงเฉือน แรงในแนวแกน หรือหลายอย่างรวมกัน เป็นต้น

นอกจากนั้นยังมีการเสริมความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือน การเสริมกำลังจุดต่อ และการเสริมเสถียรภาพของรอยร้าว อีกด้วย รายละเอียดในแต่ละประเภทของการเสริมกำลังจะกล่าวถึงในบทถัดๆ ไป

2.) *สภาพและคุณสมบัติของโครงสร้างเดิม* ก่อนการเสริมกำลังของโครงสร้าง จะต้องมองข้อจำกัดต่างๆ ของโครงสร้างเดิมด้วย เช่น ระยะห่าง (Clearance) บริเวณที่สามารถทำงานได้ ตลอดจนลักษณะความเสียหาย และคุณสมบัติของวัสดุเดิม ซึ่งในกรณีที่สะพานมีความเสียหาย จะต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างเสียก่อนตัวอย่างเช่น การประกบด้วยวัสดุอื่น (Composite Section) จะสามารถกระทำได้เมื่อผิวของโครงสร้างเดิมมีความสมบูรณ์ ปราศจากช่องว่าง และจะต้องมีกำลังรับแรงดึงเพียงพอ หากผิวของคอนกรีตเดิมเกิดการหลุดร่อน จะต้องทำการปรับปรุงสภาพผิวของคอนกรีตเดิมให้อยู่ในสภาพดีเสียก่อน

3.) *วัสดุและวิธีที่ใช้* ในการเสริมกำลังแต่ละวิธี จะสามารถเลือกวัสดุและวิธีการทำงานได้หลายวิธี ซึ่งในบางวิธีจะต้องอาศัยผู้รับเหมาที่มีความชำนาญพิเศษ หรือต้องใช้อุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติม

4.) *ผลกระทบต่อโครงสร้าง* เป็นประเด็นที่จะต้องให้ความสนใจพิเศษ โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในระหว่างและภายหลังการเสริมกำลัง ว่าจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างใดจะต้องรับแรงเพิ่มขึ้นหรือไม่ เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เพิ่มขึ้น การกระจายหน่วยแรงไปยังหน้าตัดหรือช่วงความยาวอื่น หรือการเหนี่ยวนำให้เกิดหน่วยแรงเพิ่มเติมจากการอัดแรง เป็นต้น ซึ่งในหลายๆ กรณีพบว่า การเสริมกำลังในส่วนหนึ่งส่งผลให้โครงสร้างส่วนอื่นๆ ได้รับความเสียหาย และอาจไม่ได้ทำให้โครงสร้างทั้งหมดรับแรงเพิ่มขึ้นได้อย่างคุ้มค่าการลงทุน ซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการเสริมในส่วนอื่นๆ เพิ่มเติมด้วย

5.) *การป้องกันความเสียหายและการบำรุงรักษา* การเสริมกำลังบางวิธีจะต้องมีมาตรการป้องกันความเสียหายและการบำรุงรักษาในภายหลัง เช่น การป้องกันการเกิดสนิมของแผ่นเหล็กที่นำมาประกบ การตรวจสอบแรงดึงของระบบอัดแรง เป็นต้น

1.4 การออกแบบการเสริมกำลัง

การออกแบบการเสริมกำลังของโครงสร้าง สามารถกระทำได้ในลักษณะเช่นเดียวกับการออกแบบโครงสร้างใหม่ โดยการอ้างอิงข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น

แต่ในบางกรณีที่โครงสร้างมีลักษณะแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไป จะต้องมีการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างทั้งในระหว่างและภายหลังการเสริมกำลังอย่างละเอียด ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์โดยใช้จำลองทางโครงสร้าง หรือ การวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) เป็นต้น

บทที่ 2

การเสริมกำลังรับแรงดัด

2.1 บทนำ

ในโครงสร้างสะพาน การเสริมรับแรงดัดนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับคาน (Beam หรือ Girder) และพื้นของสะพาน (Deck) เมื่อพบว่าชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าวมีการแอ่นตัวมากเกินไป หรือต้องรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น การเสริมกำลังรับแรงดัดสามารถทำได้หลายเทคนิควิธีดังนี้

1.) การเทคอนกรีตทับหน้า (Concrete Overlay)

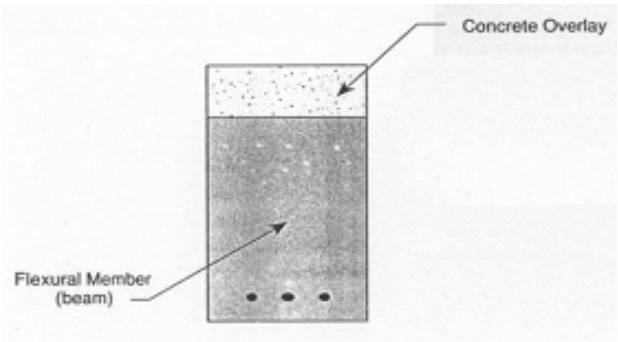
2.) การขยายหน้าตัด (Section Enlargement)

3.) การประกบด้วยวัสดุเสริม (External Bonded Reinforcement)

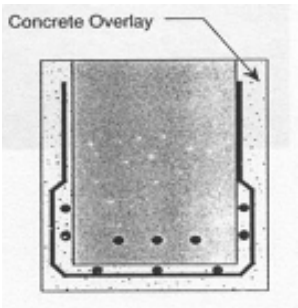
4.) การดึงลวดอัดแรงภายนอกทีหลัง (External Post-Tensioning)

5.) การค้ำยัน (Supplementary Support)

6.) การลดความยาวช่วง (Span Shortening)

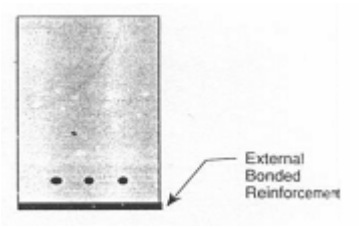


ก.) การเสริมกำลังโดยการเทคอนกรีตทับหน้า

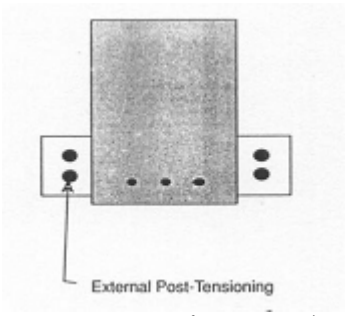


ข.) การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด

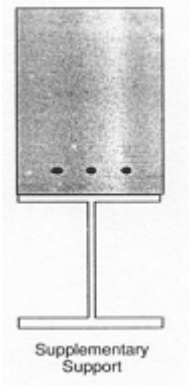
***รูปที่ 2-1** แสดงเทคนิควิธีในการเสริมกำลังรับแรงดัด*



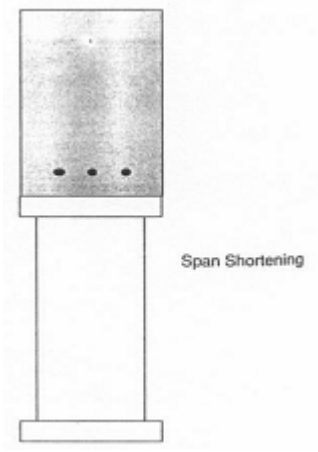
ค.) การเสริมกำลังโดยการประกบด้วยวัสดุเสริม



ง.) การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงทีหลัง



จ.) การเสริมกำลังโดยการค้ำยัน

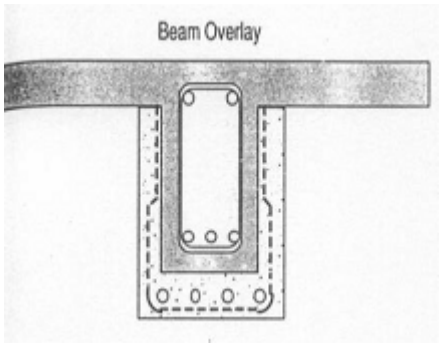


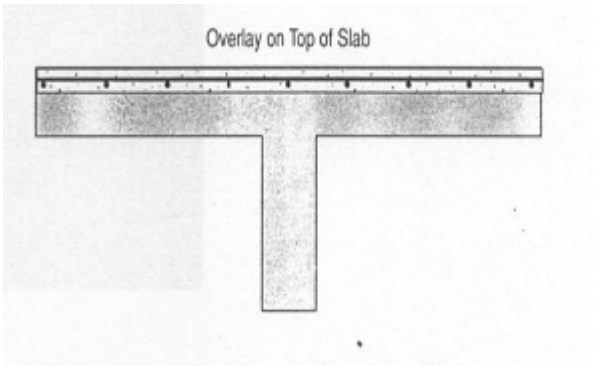
ฉ.) การเสริมกำลังโดยการลดความยาวช่วง

รูปที่ 2-1 *แสดงเทคนิควิธีในการเสริมกำลังรับแรงดัด (ต่อ)*

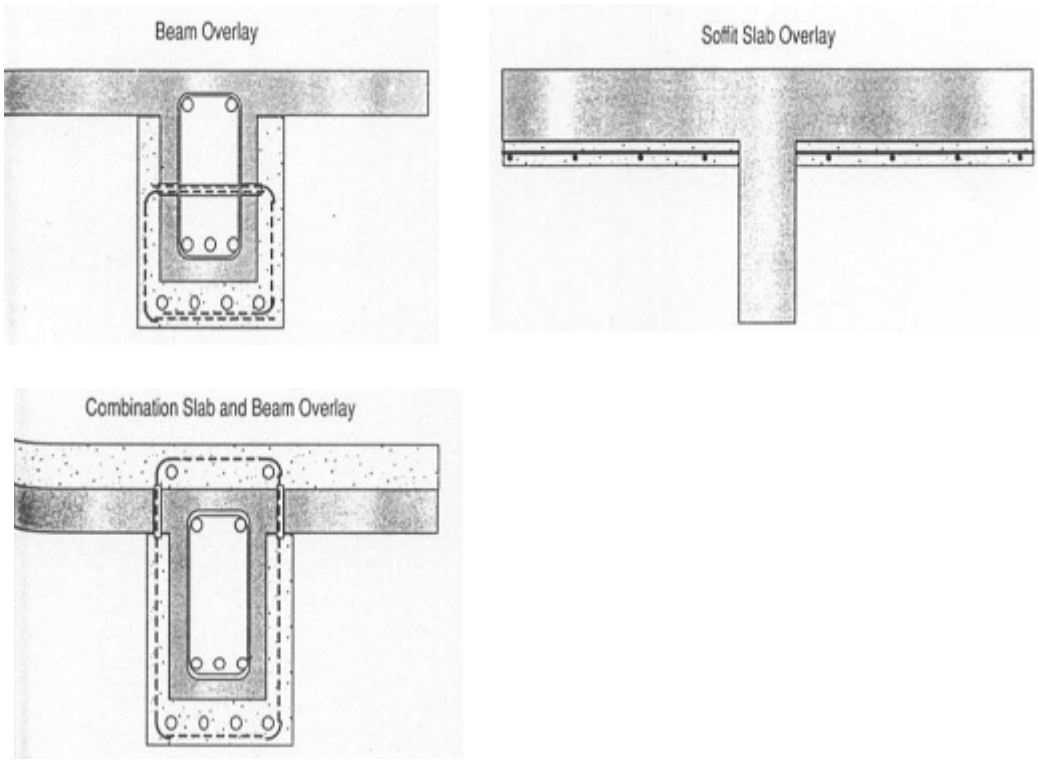
2.2 การเสริมกำลังโดยการเทคอนกรีตทับหน้าและการขยายขนาดหน้าตัด

วิธีการเสริมกำลังโดยใช้ขยายขนาดหน้าตัด (Section Enlargement) นี้ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเมื่อนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดและความแข็งแรงของแผ่นพื้น และคานคอนกรีต แต่การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้จะส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) เพิ่มขึ้น ฉะนั้นจึงต้องมีการคำนวณและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักอยู่ การขยายขนาดหน้าตัดให้แก่แผ่นพื้นนั้นสามารถทำได้ทั้งด้านบน และด้านล่างของแผ่นพื้น ดังแสดงในรูปที่ 2-2 โดยถ้าทำที่ด้านล่าง ก็จะต้องมีการใช้วิธี Shortcrete หรือการตั้งแบบหล่อ (Form) แล้วใช้เทคนิคการปั๊ม (Pump) คอนกรีตเข้าไปในบริเวณที่ต้องการ





รูปที่ 2-2 *แสดงเทคนิควิธีในการเสริมกำลังโดยการขยายขนาดหน้าตัด*



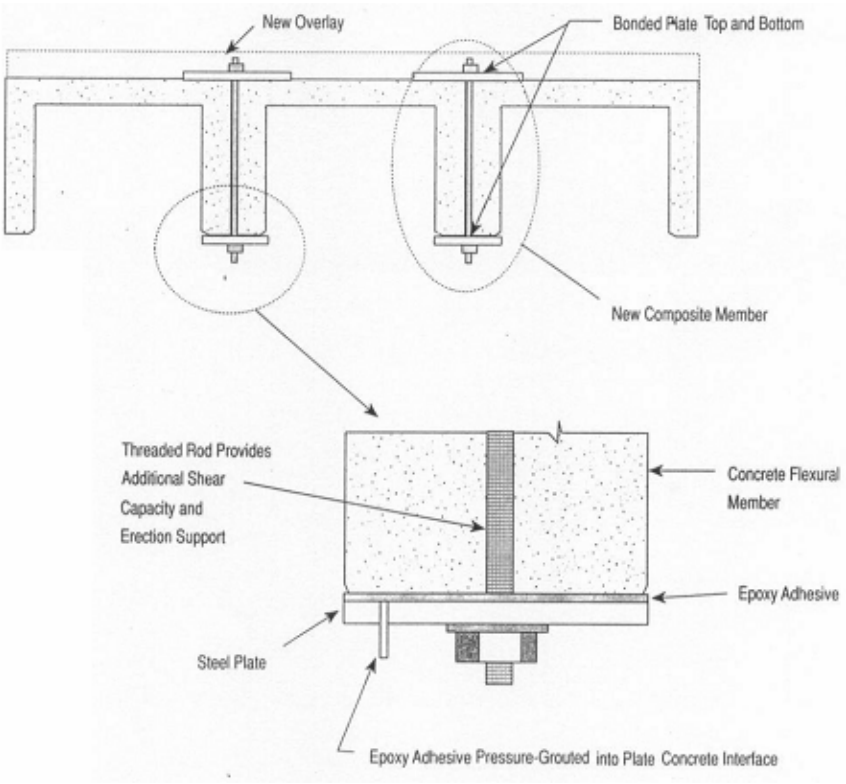
รูปที่ 2-2 *แสดงเทคนิควิธีในการเสริมกำลังโดยการขยายขนาดหน้าตัด (ต่อ)*

2.3 การเสริมกำลังโดยการประกบด้วยวัสดุเสริม

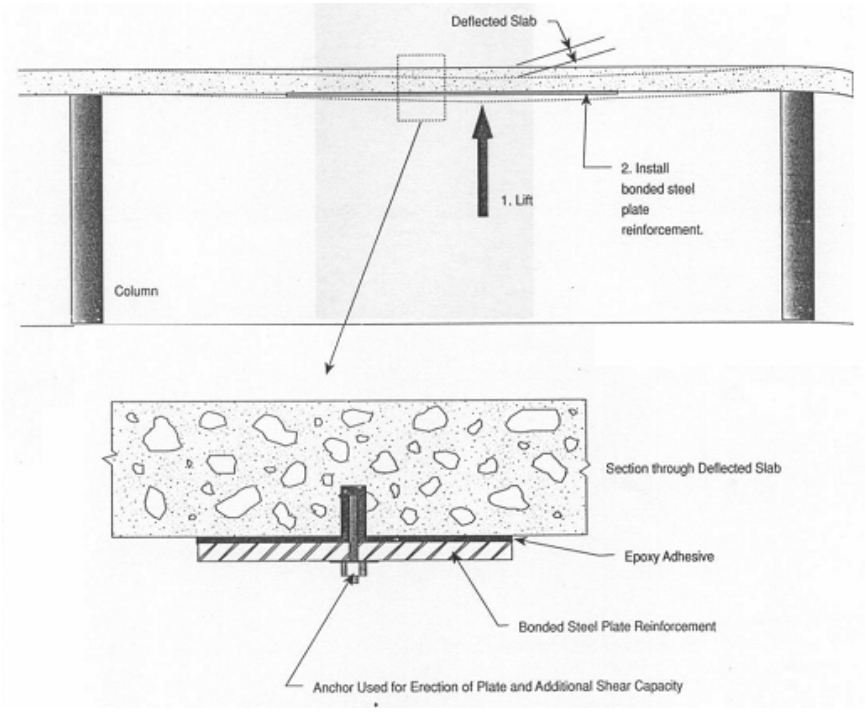
วิธีการเสริมกำลังโดยการประกบด้วยวัสดุเสริมด้านนอก (External Bonded Reinforcement) เป็นวิธีที่ใช้ในการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยแก้ไขการแอ่นตัวที่มากเกินไปได้เป็นอย่างดี ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้แผ่นเหล็ก หรือแผ่น CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างโดยใช้ Epoxy หรือ สลักรับแรงเฉือน (Shear Stud) โดยติดตั้งที่ด้านล่าง หรือด้านข้างของชิ้นส่วนที่รับแรงดัด ข้อได้เปรียบของเทคนิคนี้คือ มีการเพิ่มขนาดขององค์อาคารเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นในการพิจารณาถึงข้อจำกัดของระยะห่างในแนวดิ่งที่จะกระทบต่อการจราจร รวมทั้งข้อคำนึงด้านความสวยงามด้วย การเสริมกำลังโดยการประกบด้วยวัสดุเสริมจะต้องมีการเคลือบป้องกันการเสื่อมสภาพของวัสดุประกบเนื่องจากสภาพแวดล้อมด้านข้างด้วย

การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้เป็นวิธีแบบ Passive ดังนั้น จะเกิดหน่วยแรงที่วัสดุประกบ ก็ต่อเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น หรือไม่ก็มีการใช้แม่แรงยกชิ้นส่วนก่อนที่จะมีการติดตั้งวัสดุประกบ ในระหว่างการติดตั้งจะต้องทำความสะอาดที่ผิวของคอนกรีต เพราะเศษวัสดุต่างๆ จะเป็นปัญหาต่อการสร้างแรงยึดเหนี่ยว การเตรียมผิววัสดุให้หยาบเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้วัสดุเดิมและวัสดุใหม่มีการยึดเกาะกันที่ดี เช่น วิธีการทำ Short Blasting ซึ่งเป็นการทำให้พื้นผิวคอนกรีตมีรอยขรุขระ และมีความหยาบที่ผิวหน้าของวัสดุประกบในกรณีของแผ่นเหล็ก สำหรับผิวคอนกรีตที่ผิวมีความเสียหาย ก็จะต้องมีการทำ Abrasive Blasting จากนั้นจึงใช้วิธีอัดฉีด Epoxy Resin หรือ Epoxy Gel เข้าสู่พื้นผิวคอนกรีตและวัสดุประกบ เพื่อเป็นการสร้างแรงยึดเหนี่ยวที่มีประสิทธิภาพ ในบางครั้งก็อาจต้องใช้ Expansion

Anchor ร่วมกับ Epoxy Adhesive เพื่อเป็นการสร้างระบบการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตและวัสดุประกบให้มีอย่างเพียงพอ ตัวอย่างของการเสริมกำลังโดยวิธีประกบด้วยวัสดุเสริมภายนอก แสดงไว้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 *แสดงการเสริมกำลังด้วยการประกบภายนอกด้วยแผ่นเหล็ก*



รูปที่ 2-4 *แสดงการแก้ไขการแอ่นตัวของแผ่นพื้นด้วยการประกบภายนอกด้วยแผ่นเหล็ก*

การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้ ยังสามารถนำมาใช้ในการปรับให้แผ่นพื้นที่แอ่นตัวให้กลับมาอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2-4 โดยมีขั้นตอนการทำงาน เริ่มต้นจากการยกแผ่นพื้นกลับไปสู่ระดับที่ได้ออกแบบไว้แต่เดิม หรือสูงกว่านั้นเล็กน้อย ทำการติดตั้งแผ่นเหล็กประกบที่ด้านล่างของแผ่นพื้น จากนั้นจึงถอดค้ำยันออก น้ำหนักบรรทุกจะถูกถ่ายเทสู่แผ่นเหล็กประกบที่ติดตั้งใหม่ ซึ่งสามารถควบคุมการแอ่นตัวของแผ่นพื้นได้

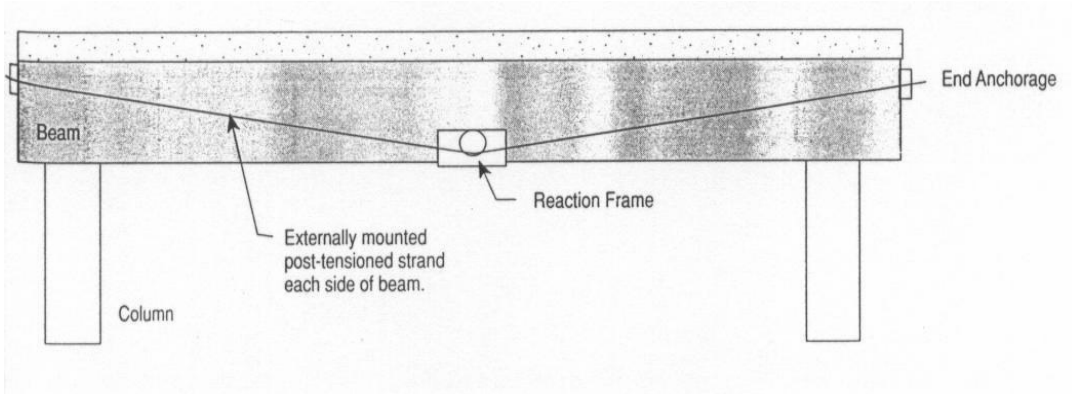
การติดตั้งแผ่นเหล็กเข้าด้านใต้ท้องของแผ่นพื้น ทำได้โดยใช้สลักยึด (Bolt) จากนั้นจึงใช้ Epoxy Adhesive อุดช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กกับคอนกรีต และรวมถึงช่องว่างในรูที่เจาะไว้เพื่อใส่สลักยึดด้วย

2.4 การเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกทีหลัง

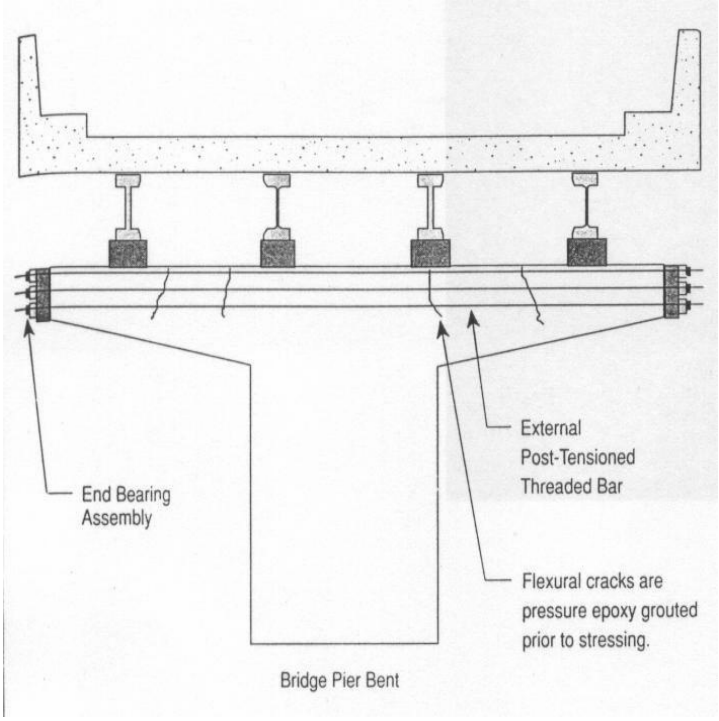
วิธีการเสริมกำลังโดยการดึงลวดอัดแรงภายนอกทีหลัง (External Post-Tensioning) เป็นวิธีที่เหมาะสมมากสำหรับการเสริมกำลังดัด สามารถใช้อุปกรณ์ได้หลากหลายชนิด ซึ่งก็จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักและมีระบบการป้องกันสนิมที่แตกต่างกันไปด้วยเช่นกัน โดยปกติแล้วจะใช้เหล็กเส้นกำลังสูง (High Strength Thread Bar) ในชั้นส่วนที่ตรง และใช้ลวดเกลียว (Strand) ในกรณีที่ต้องมีการดัดแปลงรูปร่าง วิธีการดึงลวดอัดแรงภายนอกทีหลังเป็นวิธีการแบบ Active ซึ่งจะช่วยให้มีการกระจายน้ำหนักบรรทุกได้ในทันที ก่อนที่จะปฏิบัติการโดยใช้เทคนิคนี้ ควรจะต้องมีการซ่อมรอยแตกจากการดัด (Flexural Cracks) ด้วยวิธีการอุดด้วย Epoxy โดยใช้แรงดัน เข้าไปในรอยแตกเพื่อที่จะทำให้เกิดการกระจายแรงอัดอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Compression Distribution)

การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการดึงลวดอัดแรงเข้ากับโครงสร้างเดิมนี้จำเป็นต้องใช้กลไกถ่ายเทแรงเฉือน (Shear Transverse Mechanism) หรือ End Bearing Assembly อย่างใดอย่างหนึ่ง กลไกถ่ายเทแรงเฉือนถูกติดตั้งเข้าที่ด้านข้างหรือที่บริเวณด้านล่างขององค์อาคารที่รับแรงดัด หรือไม่ก็สอดสลักยึดโดยตลอดแนว เพื่อให้มีการถ่ายเทแรงเฉือนอย่างพอเพียง ในบางครั้งแท่งเหล็กหรือเส้นลวดเกลียวอาจถูกทำให้งอที่บริเวณจุดกึ่งกลางช่วงความยาวโดยใช้ Saddle Clamp หรือ Deviator ดังรูปที่ 2-5

ส่วนระบบการป้องกัน (Protection) สำหรับลวดเกลียวและแท่งเหล็ก จากไฟหรือสารกัดกร่อนต่าง ๆ ก็ทำได้โดยใช้คอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast) หรือ Shortcrete Encasement หรือ การใช้ท่อร้อยเหล็กแล้วอัดปูน (Grout) เข้าไป



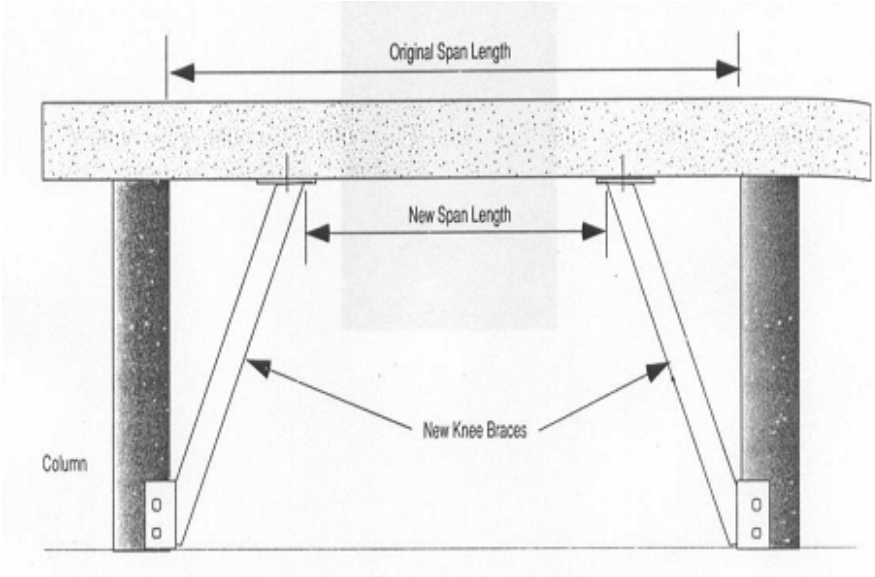
รูปที่ 2-5 *แสดงการเสริมกำลังด้วยการดึงลวดอัดแรง*



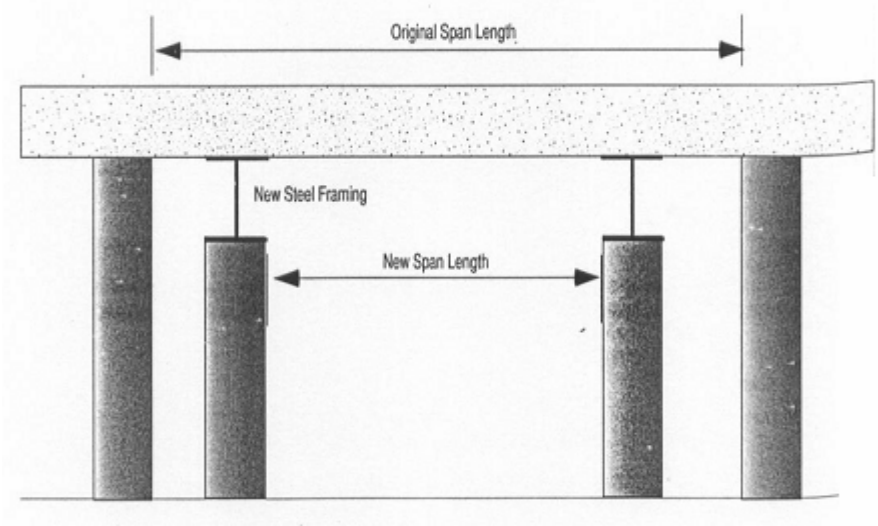
รูปที่ 2-6 *แสดงการเสริมกำลังด้วยการดึงลวดอัดแรง*

2.5 การเสริมกำลังโดยการลดความยาวช่วง

วิธีการเสริมกำลังโดยการลดความยาวช่วงนี้ จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Capacity) หรือเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ได้แก่ องค์อาคาร และยังเป็นวิธีที่คุ้มค่า (Cost Effective) ที่สุดอีกด้วย การลดความยาวช่วงของคานและพื้นนี้ทำได้ในหลายรูปแบบ ซึ่งจะรวมถึงการขยายขนาดของเสา การติดตั้งเสาค้ำ (Bracing) ที่เป็นเหล็กหรือคอนกรีต และการเพิ่มโครงย่อย (Sub-Framing) ให้แก่ช่วงความยาว (Span) นั้นๆ ดังรูปที่ 2-7 และ 2-8



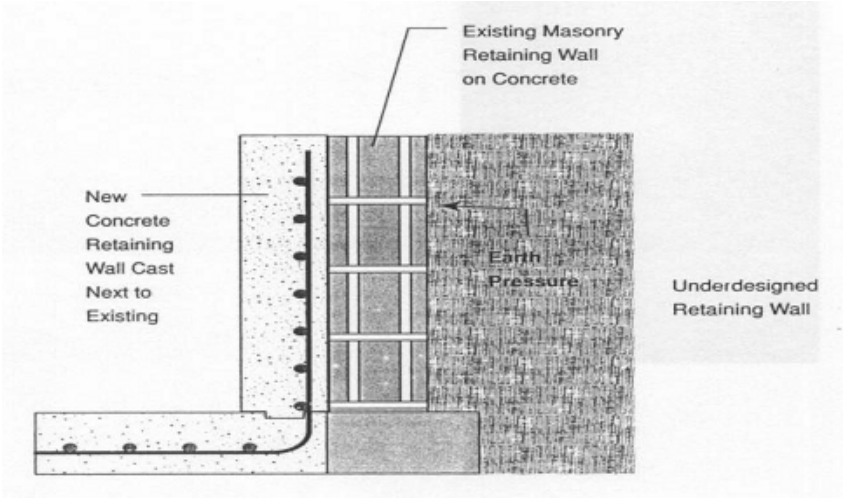
รูปที่ 2-7 *แสดงการเสริมกำลังด้วยการลดความยาวช่วง*



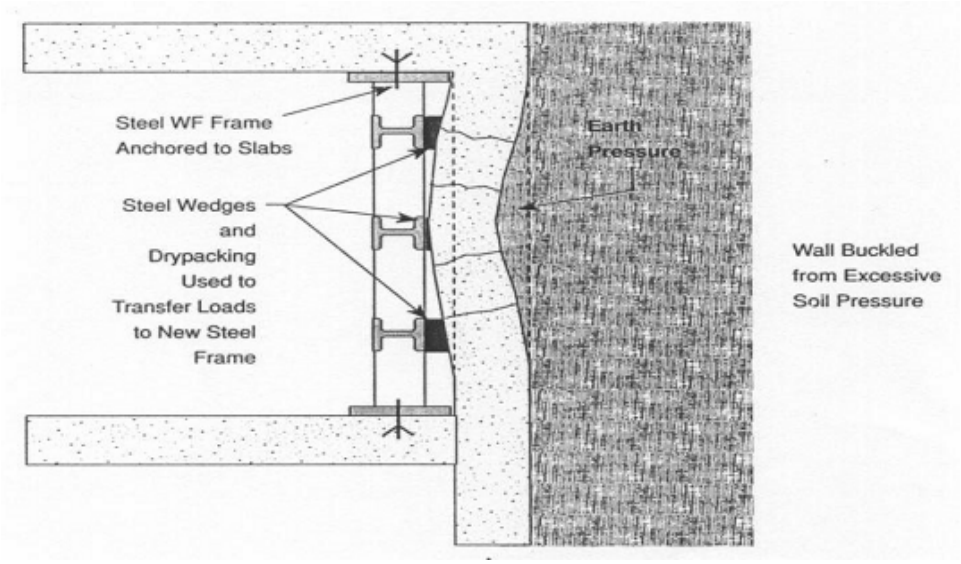
รูปที่ 2-8 *แสดงการเสริมกำลังด้วยการลดความยาวช่วง*

2.6 การเสริมกำลังกำแพงกันดิน

บางกรณีกำแพงกันดิน (Embankment หรือ Retaining Wall) อาจได้รับความเสียหายหรือมีการปรับดินถมให้มีระดับสูงขึ้น จำเป็นต้องมีการเสริมกำลังกำแพงกันดิน โดยสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้คอนกรีตเสริมเหล็กหรือการใช้เหล็กรูปพรรณชนิด Wide Flange (WF) การเสริมกำลังโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็กทำได้โดยติดตั้งเหล็กเสริมในบริเวณด้านหน้าของกำแพงกันดิน ในขณะที่ด้านหลังของกำแพงเป็นด้านที่รับแรงดันจากดินโดยตรง เมื่อจัดวางเหล็กเสริมให้ถูกต้องตามการคำนวณและการวิเคราะห์แล้วก็ทำการหล่อคอนกรีตเข้าไปในแบบที่เตรียมไว้ ซึ่งวิธีการนี้ทำได้ตามกรรมวิธีทั่วไปในการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนการใช้เหล็กรูปพรรณในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้แก่ กำแพงกันดินที่ชำรุดเสียหาย จากการรับแรงดันจากดินนั้น ทำได้โดยการออกแบบอย่างถูกต้องเหมาะสมซึ่งต้องมีการใช้ Steel Wedge ค้ำเหล็กรูปพรรณในตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการจัดวางเหล็กรูปพรรณและการเติมวัสดุ Dry Packing โครงสร้างเหล็กรูปพรรณจะถูกยึด (Anchored) เข้ากับแผ่นพื้นไว้อย่างแน่นหนา การเติมวัสดุ Dry Packing เข้าสู่ช่องว่างที่ติดตั้ง Steel Wedge ไว้นี้จะช่วยให้การถ่ายเทแรง (Force Transfer) ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกเป็นไปได้ดีขึ้น



รูปที่ 2-9 *แสดงการเสริมกำลังกำแพงกันดิน*



รูปที่ 2-9 *แสดงการเสริมกำลังกำแพงกันดิน(ต่อ)*

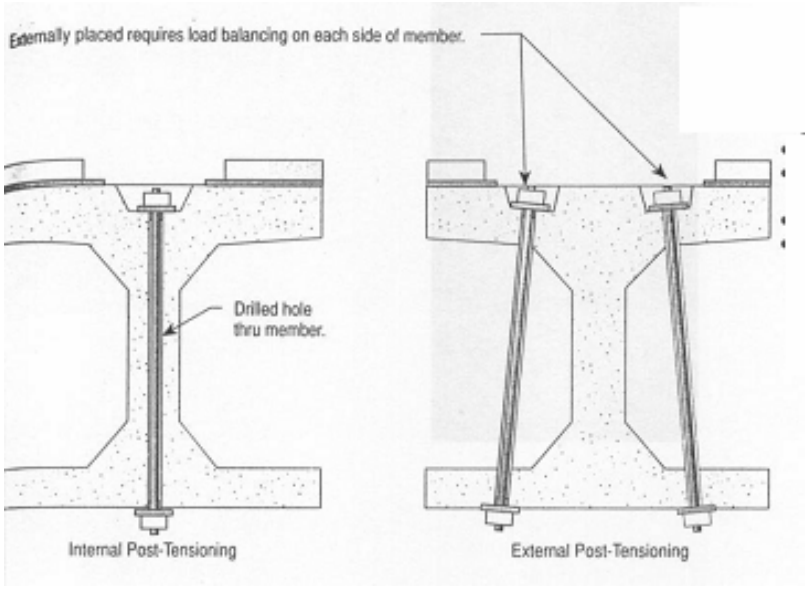
บทที่ 3

การเสริมกำลังความสามารถในการรับแรงเฉือน

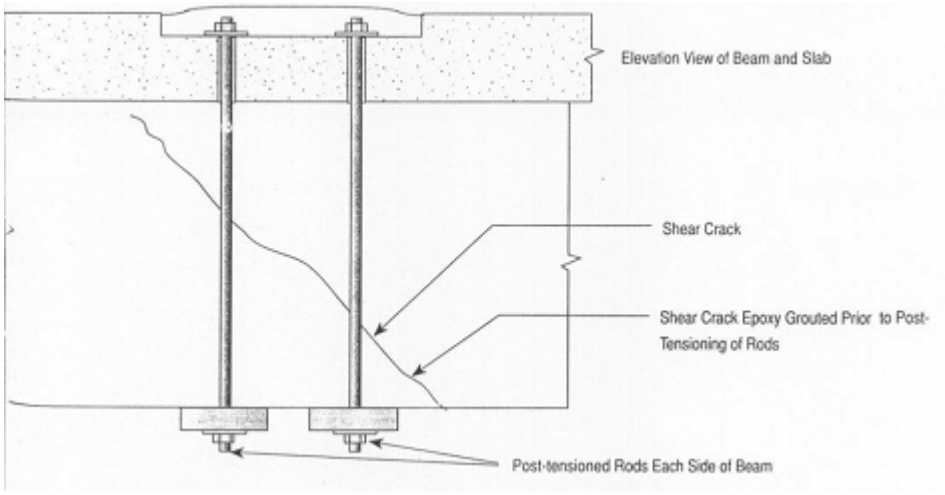
3.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะเน้นที่การเสริมกำลังการรับแรงเฉือนให้แก่คานคอนกรีต ซึ่งจะใช้เทคนิคต่างๆ เช่น

- การทำ Post Tensioning ภายนอก (External Post-Tensioning)
- การทำ Post Tensioning ภายใน (Internal Post-Tensioning)
- การเสริมเหล็กภายใน (Internal Mild Steel Reinforcement)
- การเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Bonded Steel Members)
- การขยายขนาดหน้าตัดขององค์อาคาร (Enlarging Member's Cross-Section)



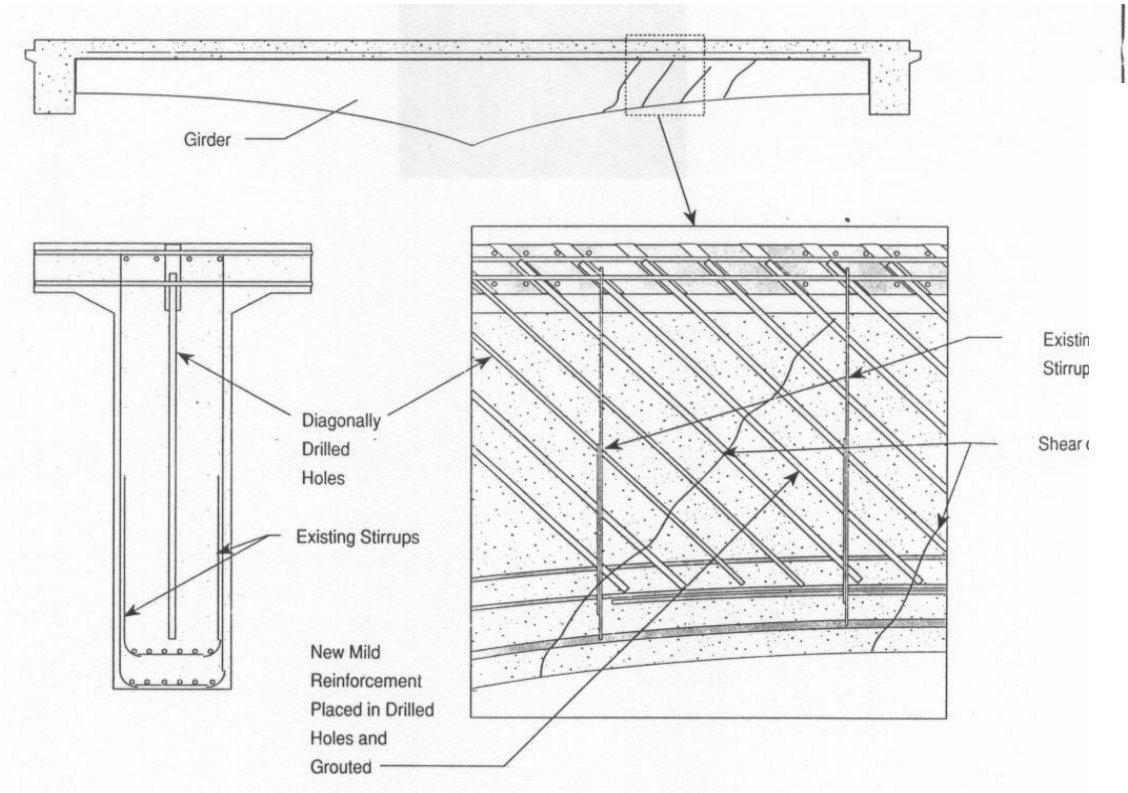
รูปที่ 3-1 *การเสริมกำลังการรับแรงเฉือนให้แก่คานคอนกรีต*



รูปที่ 3-1 *การเสริมกำลังการรับแรงเฉือนให้แก่คานคอนกรีต (ต่อ)*

3.2 การเสริมกำลังความแข็งแรงภายในแบบ Passive

วิธีนี้เป็นวิธีที่ช่วยเสริมกำลังความสามารถในการรับแรงเฉือนโดยการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเข้าไปภายในองค์อาคาร หรือชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต เช่น การใช้เหล็ก Dowel สอดเข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของรอยแตก โดยใช้วิธีการเจาะรูแล้วสอดเหล็กเข้าไป จากนั้นจึงใช้ Epoxy แล้วทำการ Grout ให้เรียบร้อย

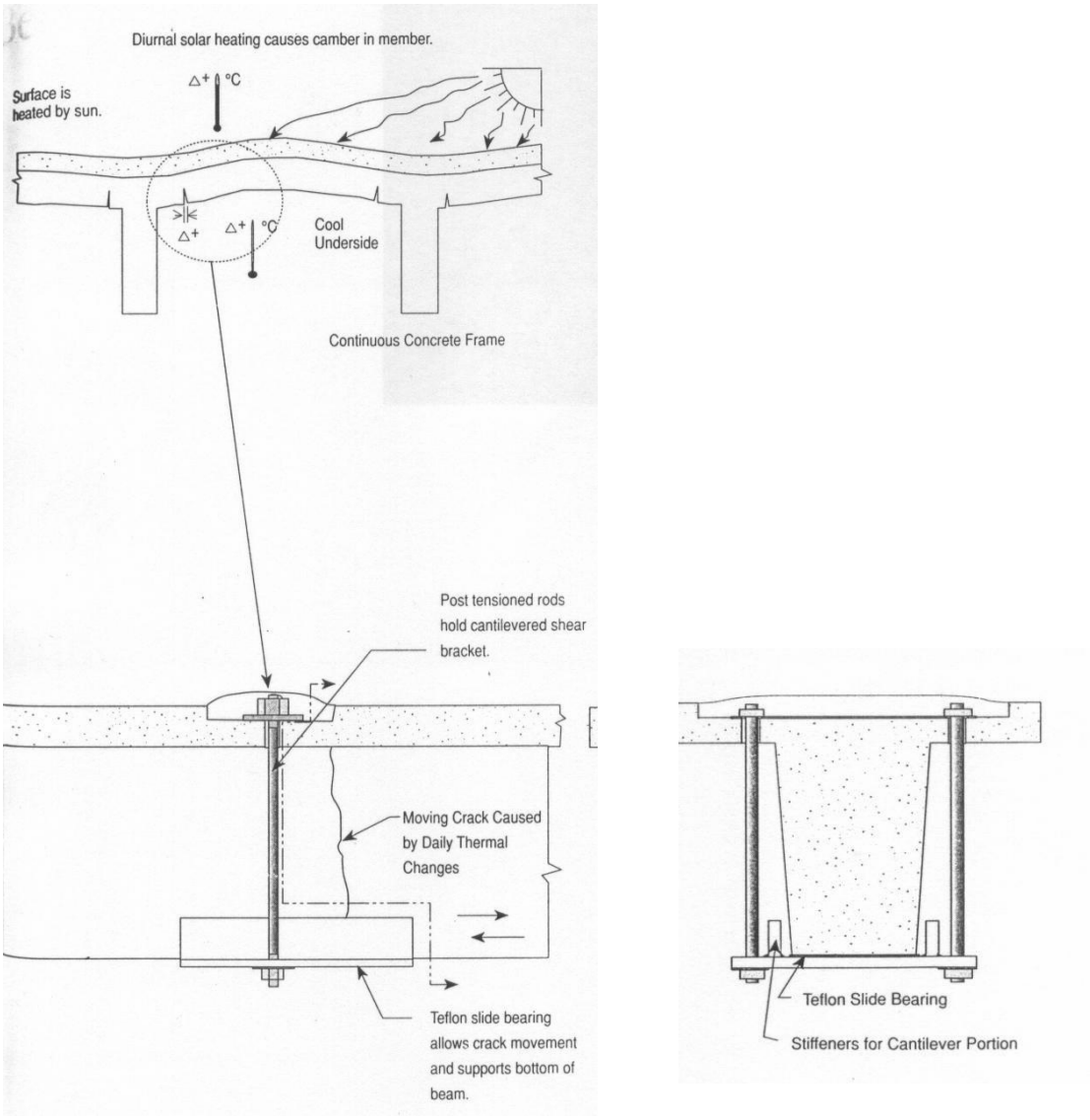


รูปที่ 3- 2 *Internally Placed Passive Shear Strengthening*

3.3 การเสริมกำลังรับแรงเฉือนในบริเวณจุดหมุนของคาน

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างมาก ก็อาจจะเกิด Hinge ขึ้นได้ในสภาวะที่มี Tensile Capacity ไม่เพียงพอ การเกิด Hinge นี้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสุ่ม (Random) ที่บริเวณรอยแตกที่พึ่งจะเกิดขึ้นใหม่ๆ หรือที่รอยต่อก่อสร้าง (Construction Joints) ที่อยู่ใกล้เสา และ Hinge นี้ จะเปิดและปิดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างวัน

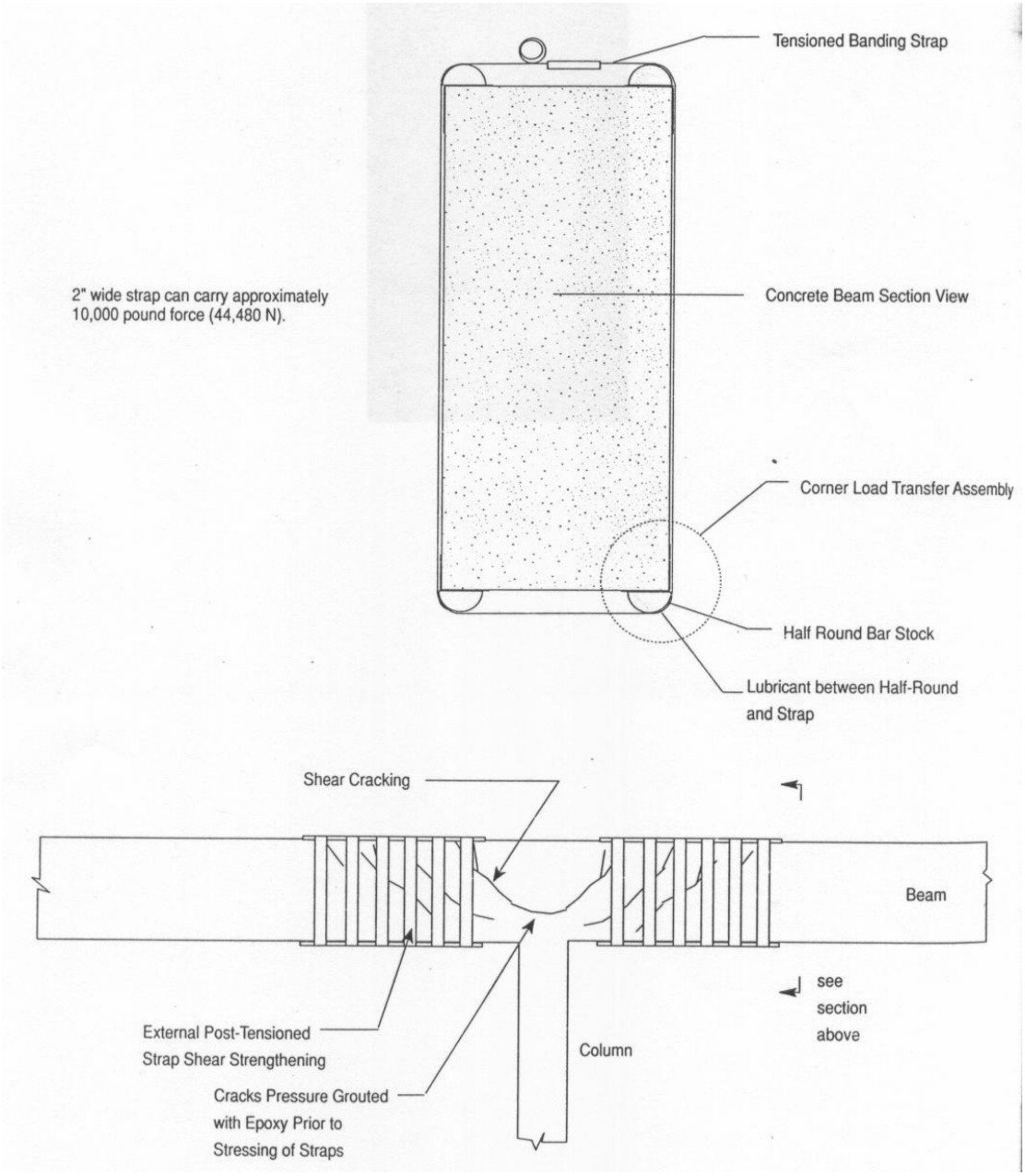
รอยแตกสามารถเป็นปัญหาต่อโครงสร้างได้เพราะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าชิ้นส่วนโครงสร้างมีกำลังรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ เมื่อต้องการเสริมกำลังความแข็งแรงให้แก่องค์อาคาร (Member) โดยการซ่อมรอยแตกแล้วก็ต้องพิจารณาถึงความจำเป็นที่จะต้องให้จุด Hinge นี้เคลื่อนที่ได้ โดยทั่วๆ ไปแล้ว การซ่อมรอยแตกที่มีการเคลื่อนที่โดยใช้ Epoxy มักจะล้มเหลว ในที่นี้จะได้แสดงถึงวิธีการซ่อมแซมที่มีประสิทธิภาพ โดยจะแสดงให้เห็นถึงการเสริมกำลังความแข็งแรงให้แก่คานที่มีรอยแตกโดยการใช้ Post-Tensioned Shear Clamp และ Teflon Slide Bearing ซึ่งจะทำให้ Hinge สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 3- 3 *Beam Shear capacity strengthening at moving hinge*

3.4 การเสริมกำลังโดยวิธี External Post-Tensioned Straps

ก่อนทำการเสริมกำลังวิธีนี้ จะต้องทำการ Grout รอยแตกต่างๆ โดยใช้แรงดัน (Pressure Grout) เสียก่อน แล้วจึงทำการติดตั้งเข็มขัด (Straps) เข้ารอบๆ คานโดยเข็มขัดนี้จะมีความกว้างประมาณ 2 นิ้ว ที่บริเวณมุมของคานจะมีการติดตั้ง Half Round Bar Stock แล้วมีการหล่อลื่นเพื่อไม่ให้มีการเสียดสีระหว่างแท่งเหล็กนี้กับเข็มขัดที่จะใช้รัดคาน



รูปที่ 3- 4 *External Post-Tensioned Straps*

บทที่ 4

การเสริมกำลังความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างชิ้นส่วน

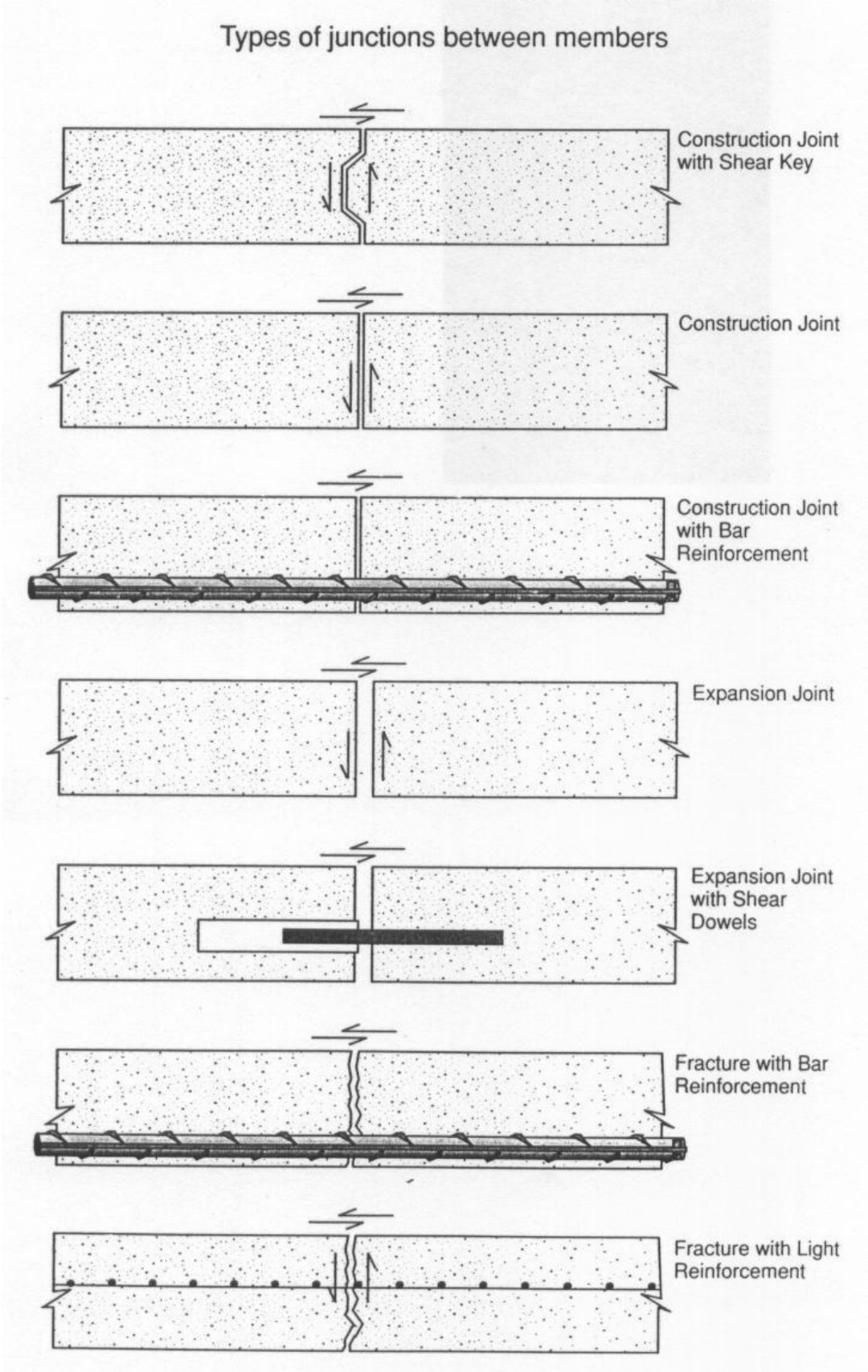
4.1 บทนำ

การถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างพื้น (Slabs) และองค์อาคารอื่นๆ ของโครงสร้างมีความสำคัญมากเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจากล้อ (Wheel Load) เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อสะพาน ความสามารถของรอยต่อในการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุก (หรือแรงเฉือน) จากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งนั้น มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของพื้น (Slab) การถ่ายเทน้ำหนักที่ไม่มีประสิทธิภาพจะส่งผลดังต่อไปนี้

- เกิดการแอ่นตัว (Deflection) สูง และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการโยก (Pumping) และต่อมาก็ทำให้เกิดความเสียหาย (Faulting) ขึ้นได้ในเวลาต่อมา
- การสูญเสียการรองรับ (Support) ข้างใต้พื้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกของพื้น

ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ มักจะเกิดขึ้นเสมอในพื้นที่หล่อบนพื้น (Slab on Grade) หรือระบบพื้นยกที่ผลิตไว้ล่วงหน้า (Elevated Precast Floor System) เทคนิคต่างๆ ที่ใช้เสริมกำลังการถ่ายเทแรงเฉือน มีดังนี้

- เดือยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (Dowel Shear Device)
- อุปกรณ์ที่ใช้ในรูเจาะเพื่อเสริมกำลังรับแรงเฉือน (Drilled Hole Shear Device)
- เดือยเหล็กสำหรับใส่ในร่องรับแรงเฉือน (Sawed Slot Dowel Transfer Device)
- Alternating Cantilever
- Slab Sub Sealing และ Slab Jacking

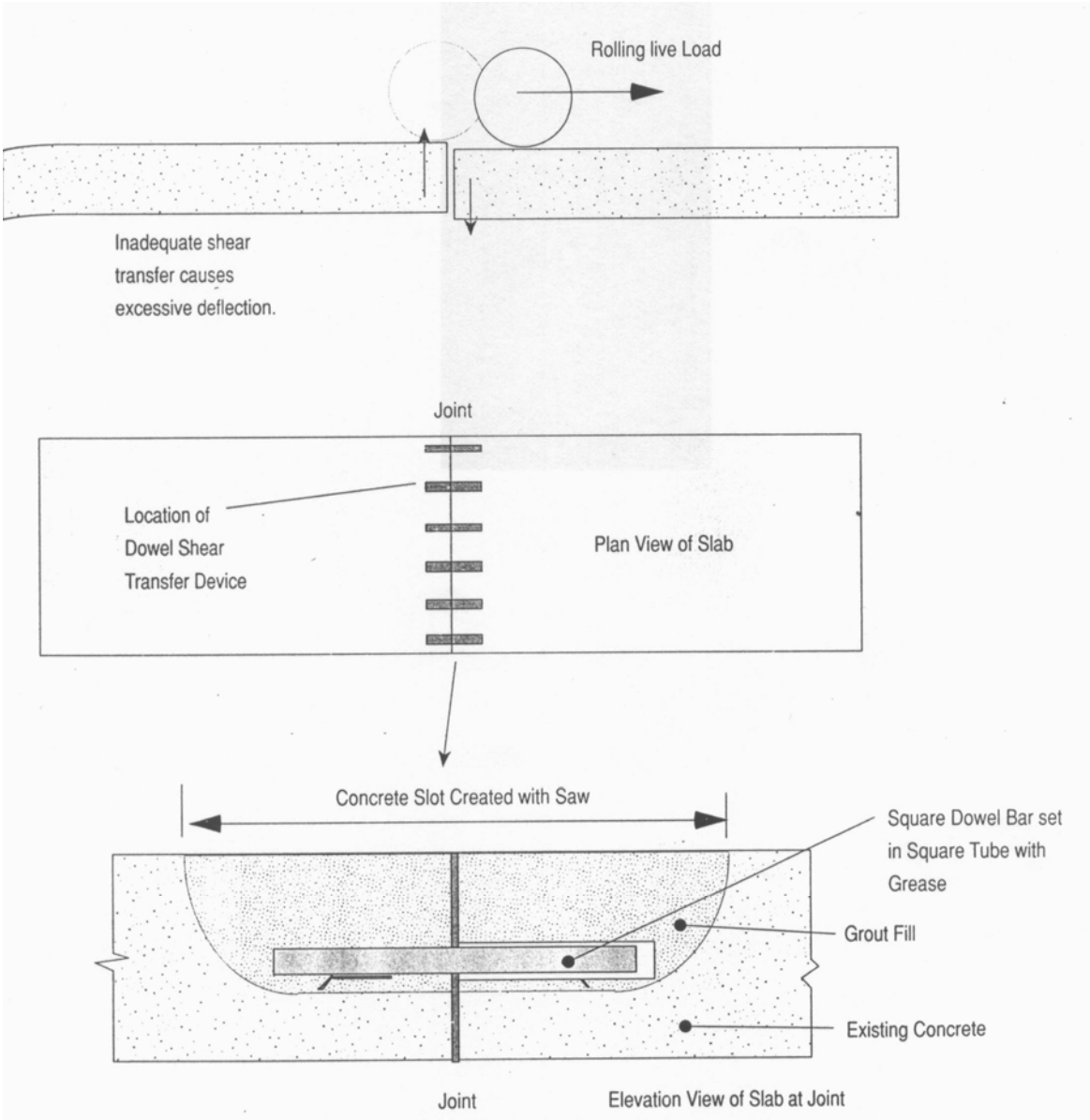


รูปที่ 4-1 *Shear Transfer Strengthening*

4.2 เดือยเหล็กรับแรงเฉือน (Dowel Shear Device)

เมื่อมีการแอ่นตัวมากเกินไปเนื่องจากไม่มีการถ่ายเทแรงเฉือนที่ดีพอ ก็สามารถทำการเสริมเหล็กเดือยเพื่อรับแรงเฉือนระหว่างพื้นได้ วิธีการนี้ทำได้โดยการตัดคอนกรีตส่วนที่ต้องการซ่อมแล้วจัดวางเดือยเหล็ก (Dowel) ไว้ตามตำแหน่งดังรูปที่ 4-2 โดยที่ปลายด้านหนึ่งของเหล็กเดือยจะถูกสอดไว้ในท่อที่ทำการหล่อลื่นภายในท่อไว้แล้ว จากนั้นจึงเติม Grout ปิดพื้นที่นั้นมีข้อควรระวังคือ ต้องจัดวางแนวของเหล็กเดือยให้ตรงแนว เพราะหากมีการจัดวางผิดแนว (Misalignment) ก็จะทำให้เกิด Stress ขึ้นและจะทำให้เกิดรอยแตกได้

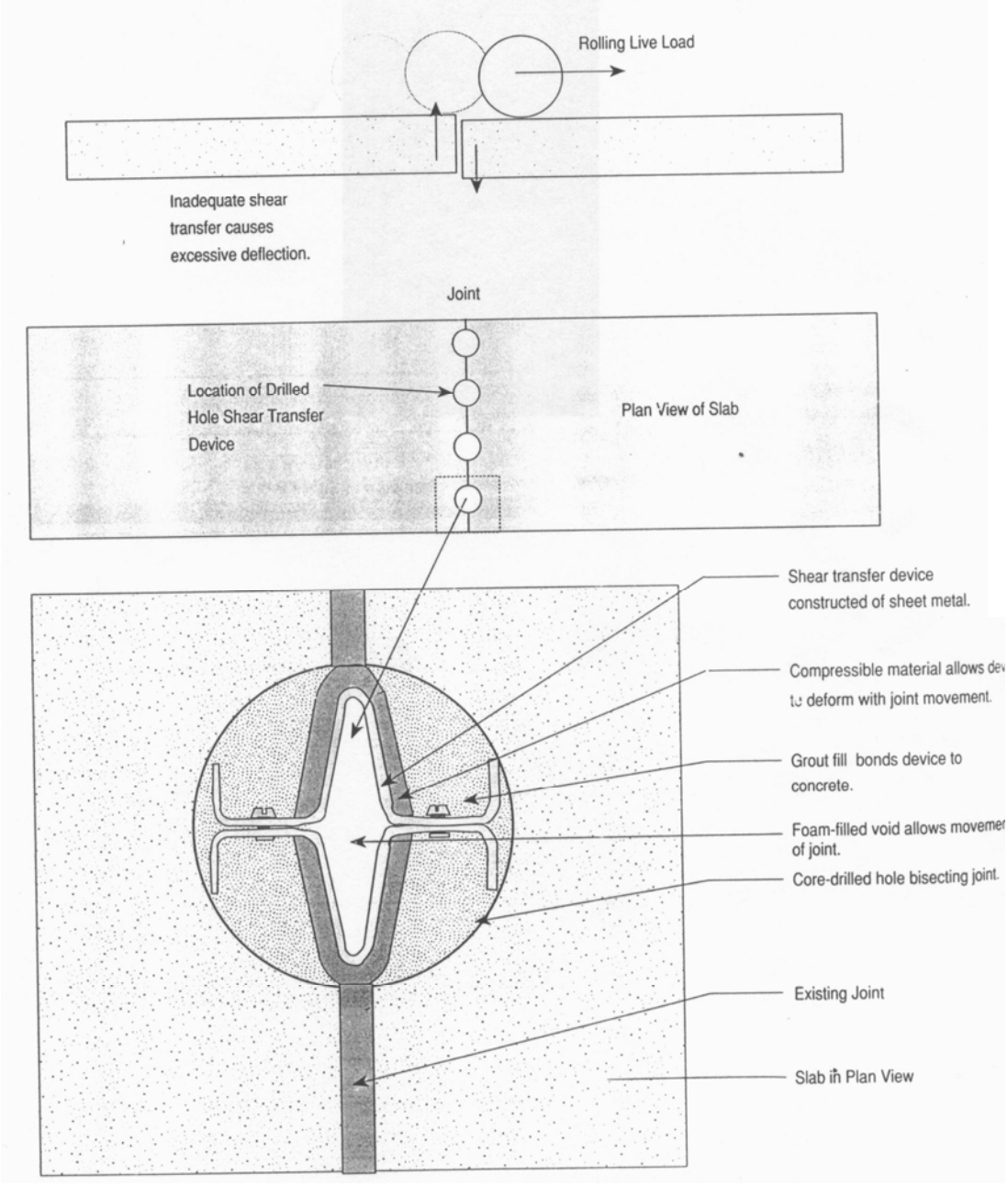
การติดตั้งเดือยเหล็กรับแรงเฉือน ให้ทำตามที่แสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4-2 *Dowel Shear Device*

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในรูเจาะเพื่อเสริมกำลังรับแรงเฉือน (Drilled Hole Shear Device)

การเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยวิธีนี้ทำได้โดยการเจาะรูในแนวที่เกิดแรงเฉือนแล้วติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายเทแรงเฉือนเข้าไปในรูที่เจาะไว้ อุปกรณ์ถ่ายเทแรงเฉือนนี้จะทำมาจากแผ่นเหล็กบาง (Sheet Metal) แล้วติดตั้งร่วมกับวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ (Compressible) เพื่อที่จะรองรับการเคลื่อนที่ของรอยต่อ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็ทำการ Grout รูที่เจาะให้เรียบร้อย ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 *Drilled Hole Shear Transfer Device*

4.4 การทำ Grout Subgrade

เมื่อมีการถ่ายเทน้ำหนักจากล้อรถลงสู่พื้นที่หล่อบนพื้น Subgrade แล้วมีการถ่ายเทแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไป (Excessive Deflection) จึงต้องมีการเจาะรูเพื่อที่จะทำการ Grout โดยใช้แรงดัน (Pressure) ซึ่ง Grout นี้ก็จะไปอุดช่องโหว่ภายใต้พื้นและจะช่วยต้านทานการโก่งตัวได้

4.5 การใส่แขนเพื่อรับแรงเฉือน (Cantilever Shear Arm)

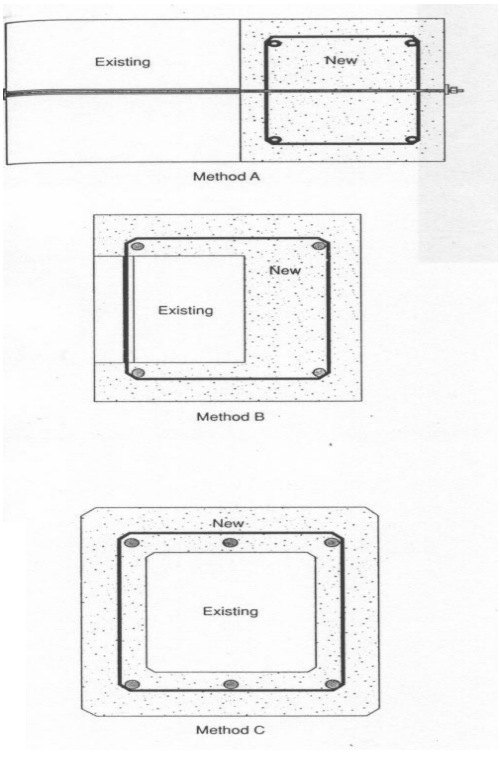
เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาการแอ่นตัวของพื้น โดยจะติดตั้ง Cantilever Shear Transfer Arm มาช่วยในการถ่ายเทแรงเฉือน โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งที่ข้างใต้พื้น โดยใช้สลักยึดและจะมีการติดตั้งสลับกัน (Alternate) และต้องใช้ Slide Bearing ที่ระหว่าง Arm และ Slab เพื่อป้องกันการเสียดสี อันจะเกิดความเสียหายขึ้นได้

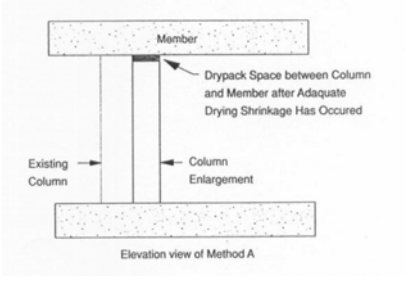
บทที่ 5

การเสริมกำลังในเสา

5.1 การเสริมกำลังรับแรงอัดให้แก่เสาโดยวิธีขยายขนาด

การเพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาคอนกรีตเดิมจะช่วยให้เสานั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น การขยายหน้าตัดของเสาสามารถทำได้ในหลายรูปแบบดังรูปที่5-1 แต่อย่างไรก็ตามก็จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากการหดตัวเนื่องจากการแห้งตัว (Drying Shrinkage Effects) ของคอนกรีตที่ใช้เพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาด้วย เพราะถ้าสามารถยับยั้งหรือจำกัดการเกิดการหดตัวนี้ได้ก็จะเป็นการช่วยลด Tensile Stress ในส่วนที่เพิ่มเข้ามาของเสาได้ ในรูปที่แสดงไว้นี้



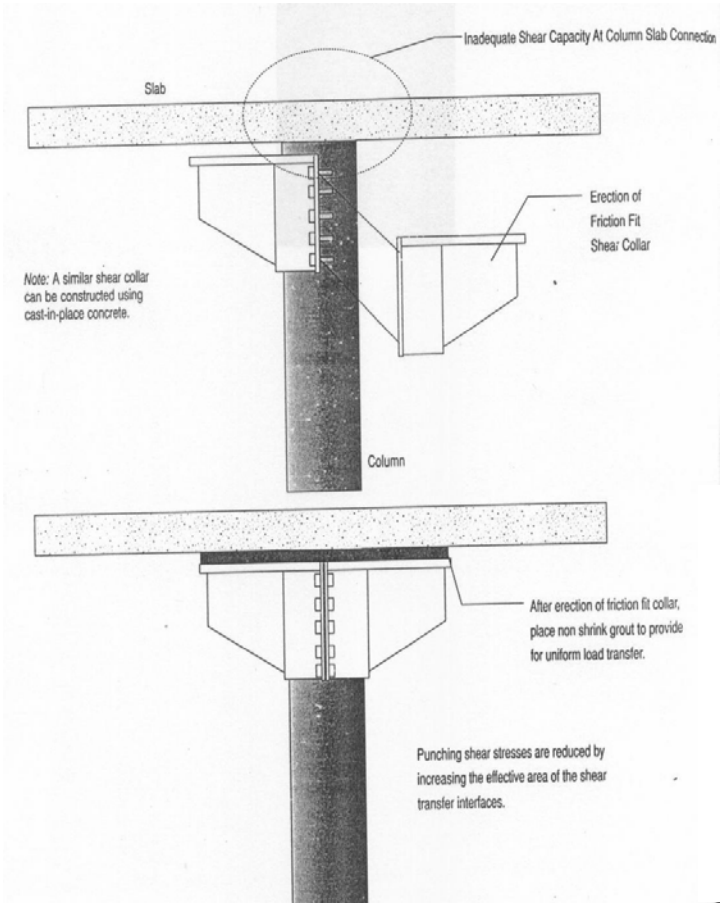


***รูปที่ 5-1** การเสริมกำลังรับแรงอัดให้แก่เสาโดยวิธีขยายขนาด*

วิธีการแบบ A (Method A) จะช่วยให้การถ่ายเทน้ำหนักเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าส่วนที่เพิ่มเข้ามาใหม่นี้ถูกหล่อโดยมีการใช้ Bond Breaker ระหว่างผิวของคอนกรีตใหม่และคอนกรีตเดิม หลังจากที่การเกิด Drying Shrinkage ส่วนใหญ่ได้หยุดลงแล้วก็สามารถติดตั้งตัวยึด (Tie) ที่ใช้เชื่อมต่อคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่เข้าไปได้ สำหรับช่องว่างส่วนใหม่และส่วนเก่าของเสานี้ อาจเติมด้วยวัสดุ Dry Packing ซึ่งเป็นการช่วยให้วัสดุใหม่ช่วยรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ ในขณะที่นำวิธีการแบบ B และแบบ C มาใช้ ควรจะต้องมีความระมัดระวังในการเลือกส่วนผสมของคอนกรีตโดยต้องให้มีอัตราการหดตัวต่ำ (Low Shrinkage Rates) โดยทั่วๆ ไปแล้ว คอนกรีตที่เตรียมเสร็จล่วงหน้า (Prepacked Aggregate Concrete) จะมีการหดตัวน้อยที่สุด ฉะนั้นจึงเป็นวัสดุที่ดีมากในการที่จะนำมาใช้เพื่อการขยายขนาดของเสา

5.2 การเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยใช้ปลอกรับแรงเฉือน

ความเค้นเฉือน (Shear Stress) จะเกิดขึ้นที่จุดต่อของระบบพื้นและเสา เมื่อมีความต้องการที่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนทะลุ (Punching Shear) ก็ทำได้โดยการเพิ่มขนาดของเสาหรือการใช้ปลอกเหล็กรับแรงเฉือน (Shear Collar) โดยปลอกเหล็กจะถูกติดตั้งประกบกับตัวเสาโดยรอบแล้วเติม Non-Shrink Grout ที่ช่องว่างระหว่างปลอกเหล็กและพื้นเพื่อให้การถ่ายเทน้ำหนักเป็นไปอย่างคงที่ (Uniform) โดยปลอกรับแรงเฉือนนี้อาจทำมาจากการหล่อคอนกรีตในที่ (Cast-in-Place Concrete) ก็ได้

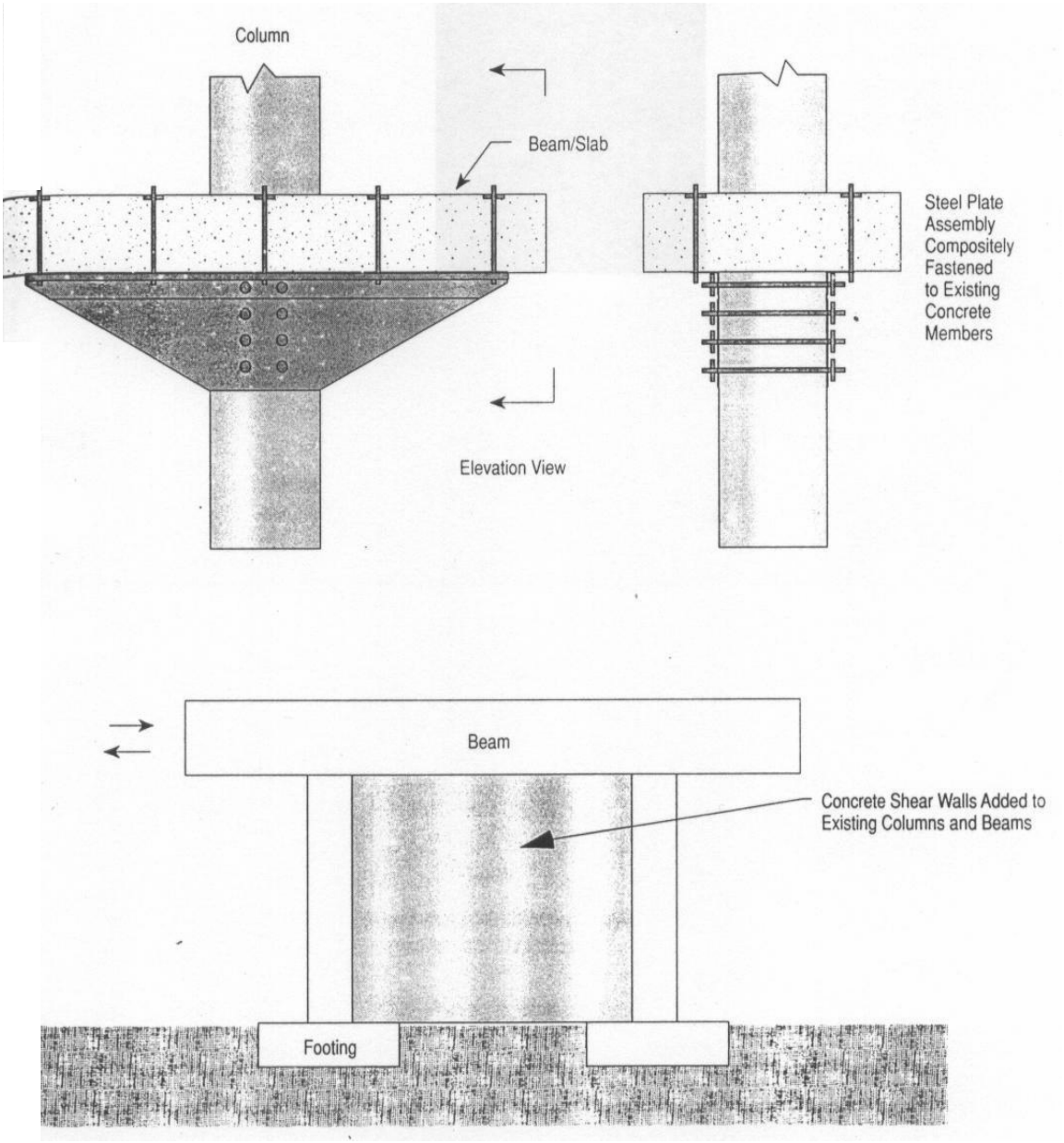


***รูปที่ 5-2** การเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยใช้ปลอกรับแรงเฉือน*

5.3 การเสริมกำลังรับโมเมนต์ระหว่างคานและเสา

การเสริมกำลังให้จุดต่อระหว่างคานและเสาสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้

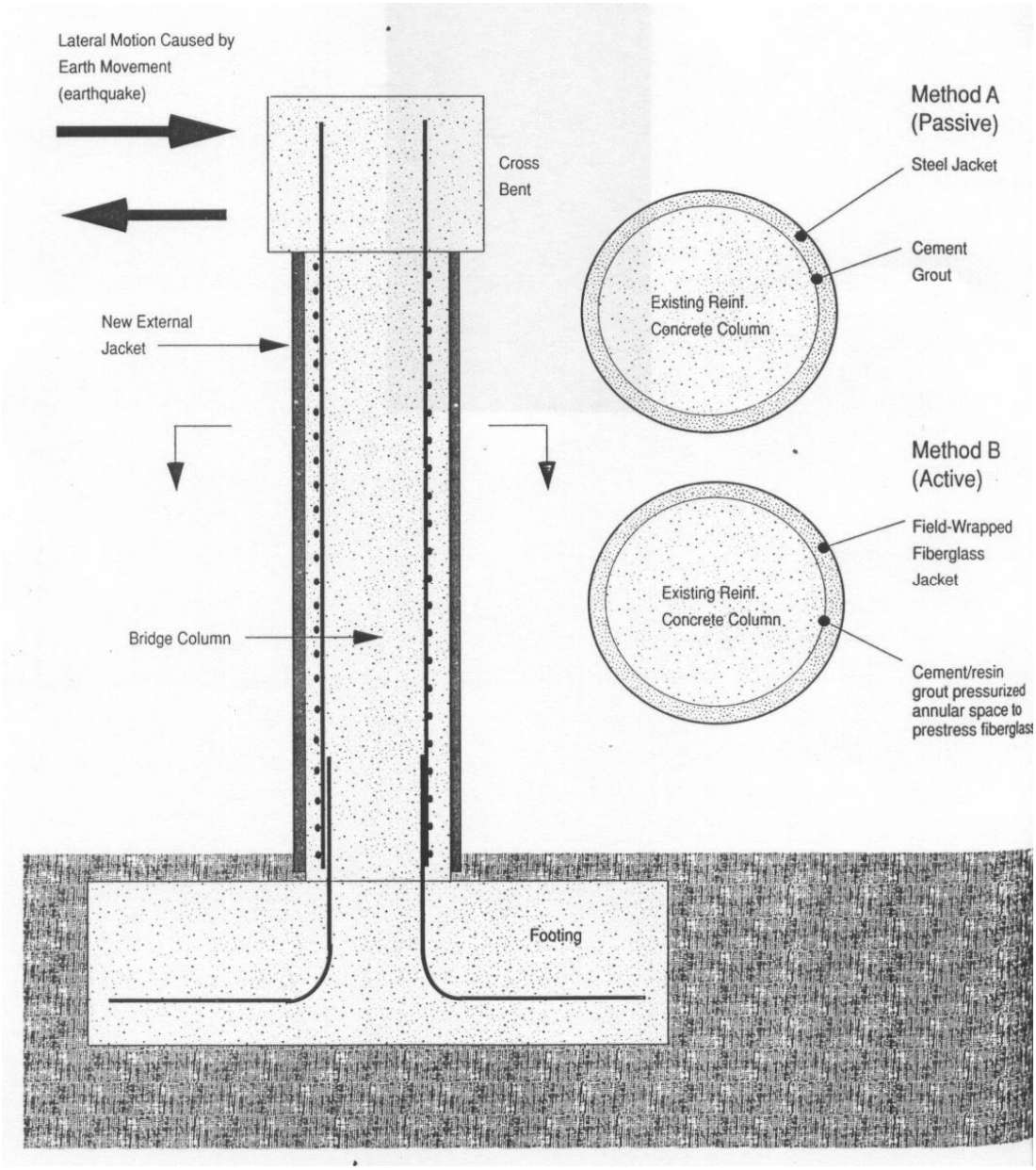
- การใช้ Bonded Steel Members
- การใช้ Concrete Overlay
- การใช้ Continuous External Column Confinement
- การก่อสร้าง Shear Wall



รูปที่ 5-3 *การเสริมกำลังรับโมเมนต์ระหว่างคานและเสา*

5.4 การเสริมกำลังโดยการหุ้ม

จะมีอยู่ 2 แบบคือ แบบ A และแบบ B โดยแบบ A จะใช้ปลอกเหล็ก (Steel Jack) แล้วใช้ Cement Grout เติมเข้าไปในช่องว่างระหว่างปลอกเหล็กและเสา โดยแบบ A นี้จะเป็นวิธีชนิดที่เป็น “Passive” ส่วนแบบ B จะเป็นแบบ “Active” ซึ่งวิธีการแบบ B จะให้ Cement / Resin Grout อัดฉีดโดยแรงดันไปเติมช่องว่างรอบๆ ตัวเสา (Annular) กับปลอก Fiberglass ที่ติดตั้งในภาคสนาม (Field-wrapped) ซึ่งการอัดฉีดโดยใช้แรงดันนี้จะเป็นการช่วยให้แรง Prestress แก่ Fiberglass ตามหลักการแบบ “Active”



รูปที่ 5- 4 *การเสริมกำลังโดยการหุ้ม*

บทที่ 6

การเสริมกำลังจุดต่อ

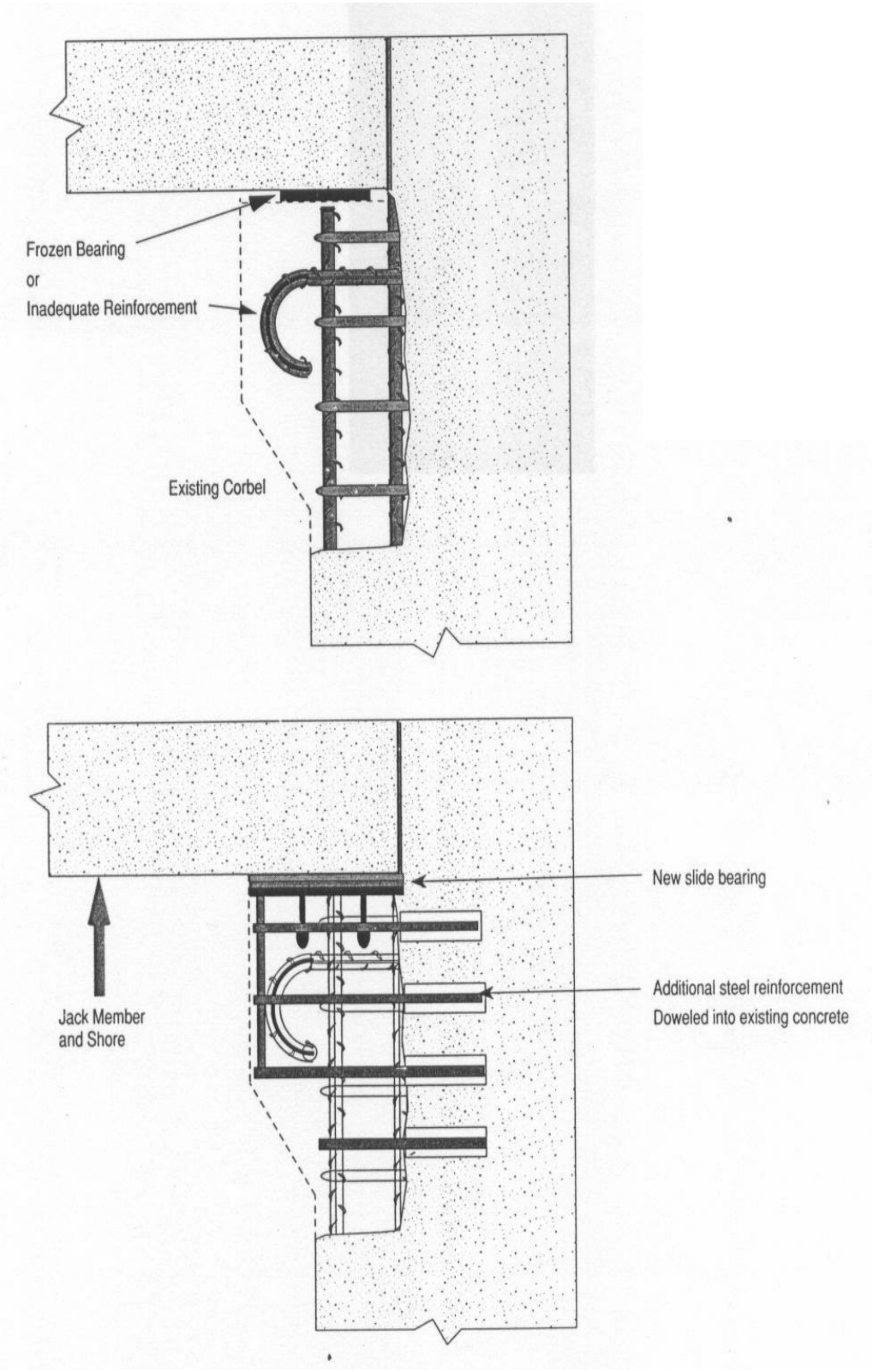
6.1 การสร้าง Corbel Bearing ขึ้นมาใหม่

จะเป็นสร้าง Corbel ขึ้นมาทดแทน Corbel ของเดิม ซึ่งออกแบบมาไม่แข็งแรงเพียงพอ (Underdesigned) หรือไม่ทำงาน (Non-functioning) ซึ่งรอยต่อภายในโครงสร้างหลายๆ ตำแหน่งนั้นจะเป็นจุดต่อระหว่างคานและเสา (Beam-Column Connections) โดยที่จุดต่อเหล่านี้จะต้องหมุนได้อย่างอิสระ และสามารถขยายหรือหดตัวได้อย่างอิสระ ถ้าจุดต่อเหล่านี้ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวนี้ได้ หรือหากว่าชิ้นส่วนโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักอยู่ (Support) อยู่ในภาวะ Overstressed แล้วก็จำเป็นจะต้องมีการสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะมีเทคนิคหลายๆ อย่างเช่น

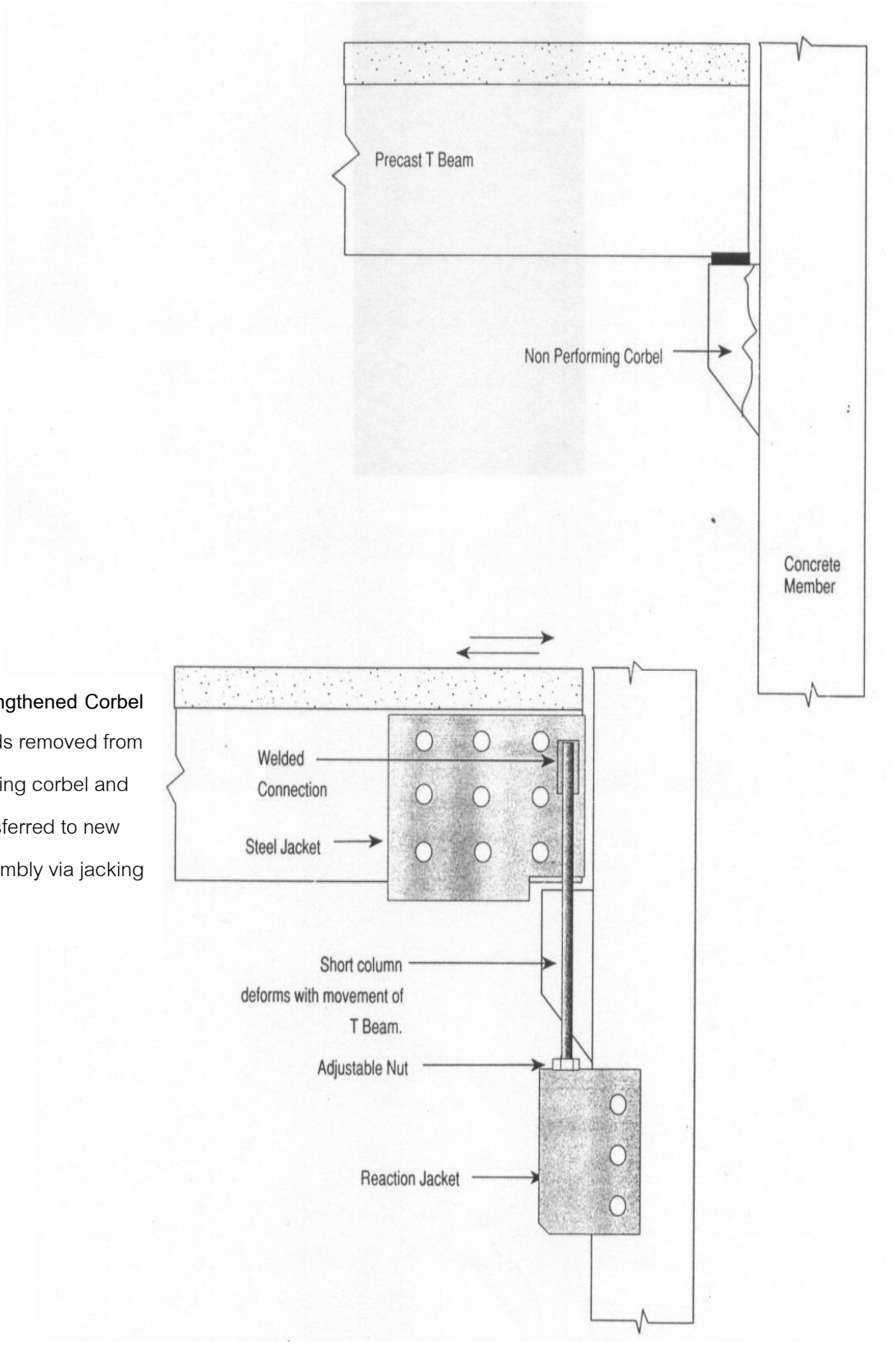
- การสร้าง Corbel ใหม่
- การทำ Short Compression Column (Pedestal)
- การทำ Tension Strut Manger
- การทำ Shear Shelf

6.2 การติดตั้ง Compression Strut ภายนอก

ทำได้โดยการติดตั้งแท่งรับน้ำหนัก (Strut) ที่ภายนอกขององค์อาคารคอนกรีต เพื่อเป็นการเสริมกำลังให้แก่ Corbel ที่มีการชำรุดหรือทำงานบกพร่อง โดยต้องเริ่มจากการเคลื่อนย้ายน้ำหนักบรรทุกออกจากบริเวณ Corbel ก่อนที่จะติดตั้ง Strut ซึ่งติดตั้งโดยการเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ประกบองค์อาคารคอนกรีตอยู่ เมื่อมีการปรับตั้งตำแหน่งเสร็จเรียบร้อยแล้วก็มีการถ่ายเทน้ำหนักเข้าสู่ Strut โดยใช้แม่แรง (Jacking) รายละเอียดดังรูปที่ 6- 1



รูปที่ 6- 1 *การสร้าง Corbel Bearing*



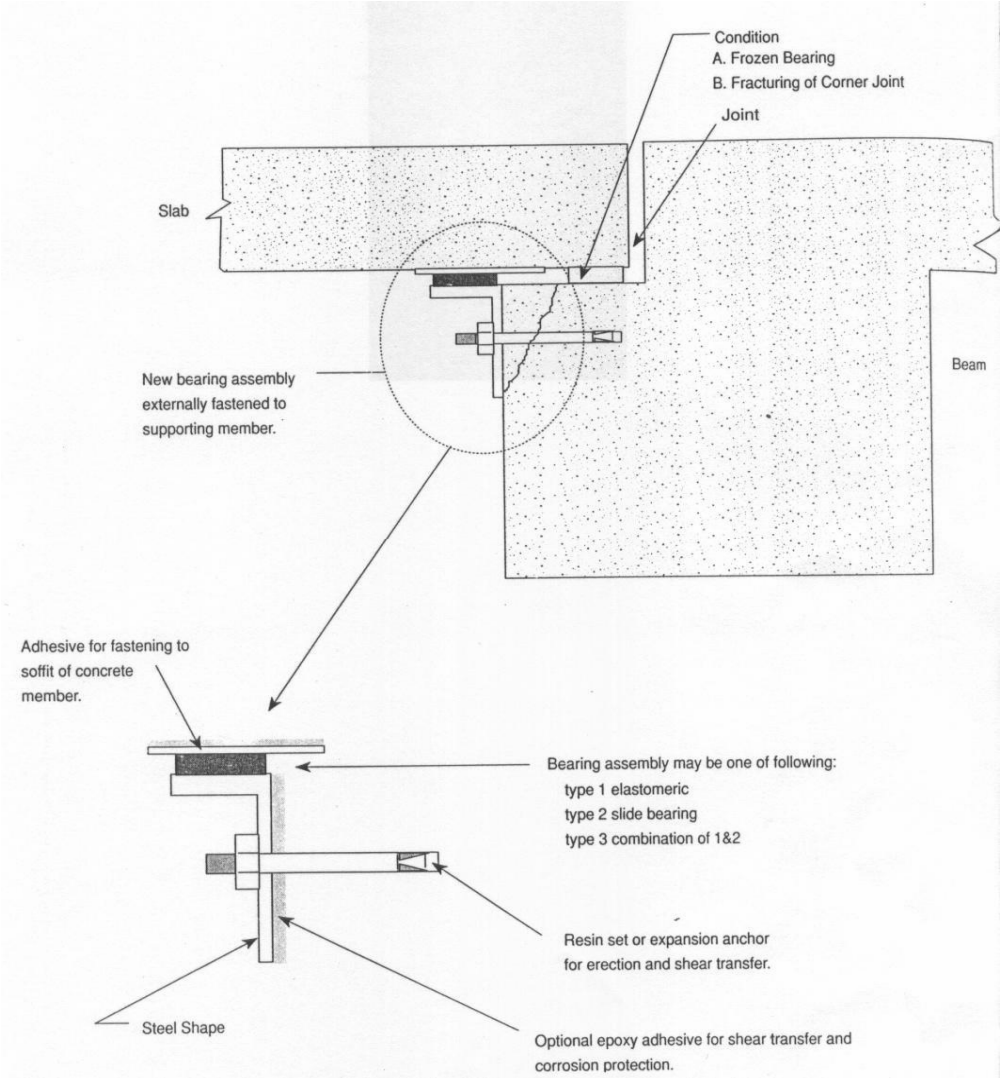
รูปที่ 6- 2 การติดตั้ง *Compression Strut ภายนอก*

6.3 การติดตั้ง Bearing Assemble ภายนอก

ทำได้โดยการติดตั้ง Bearing Assembly ตัวใหม่เข้าไปเพื่อช่วยแบ่งเบาการรับน้ำหนักจากแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต โดยจะทำการยึด Bearing Assembly เข้ากับองค์อาคารคอนกรีตโดยสลักยึด (Bolt) โดยจะมีการใช้ Epoxy Adhesive หรือ Epoxy Resin ประกอบด้วยการติดตั้งด้วย โดยจะใช้ Epoxy Adhesive ในบริเวณที่ติดกับพื้นสะพานและบริเวณด้านข้างขององค์อาคารที่ยึด Bearing Assembly ไว้อยู่เพื่อช่วยในการถ่ายเทแรงเฉือนและยังช่วยในการป้องกันการเกิดสนิมด้วย Bearing Assembly ที่นำมาใช้อาจเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งใน 3 แบบคือ

1. Elastomeric
2. Slide Bearing
3. ใช้แบบที่ 1 และ 2 ร่วมกัน

รายละเอียดของการติดตั้ง Bearing Assembly ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 6-



รูปที่ 6- 3 *การติดตั้ง Bearing Assemble ภายนอก*

บทที่ 7

การลดความเค้นในโครงสร้าง

7.1 การติดตั้งรอยต่อเพื่อการขยายตัว

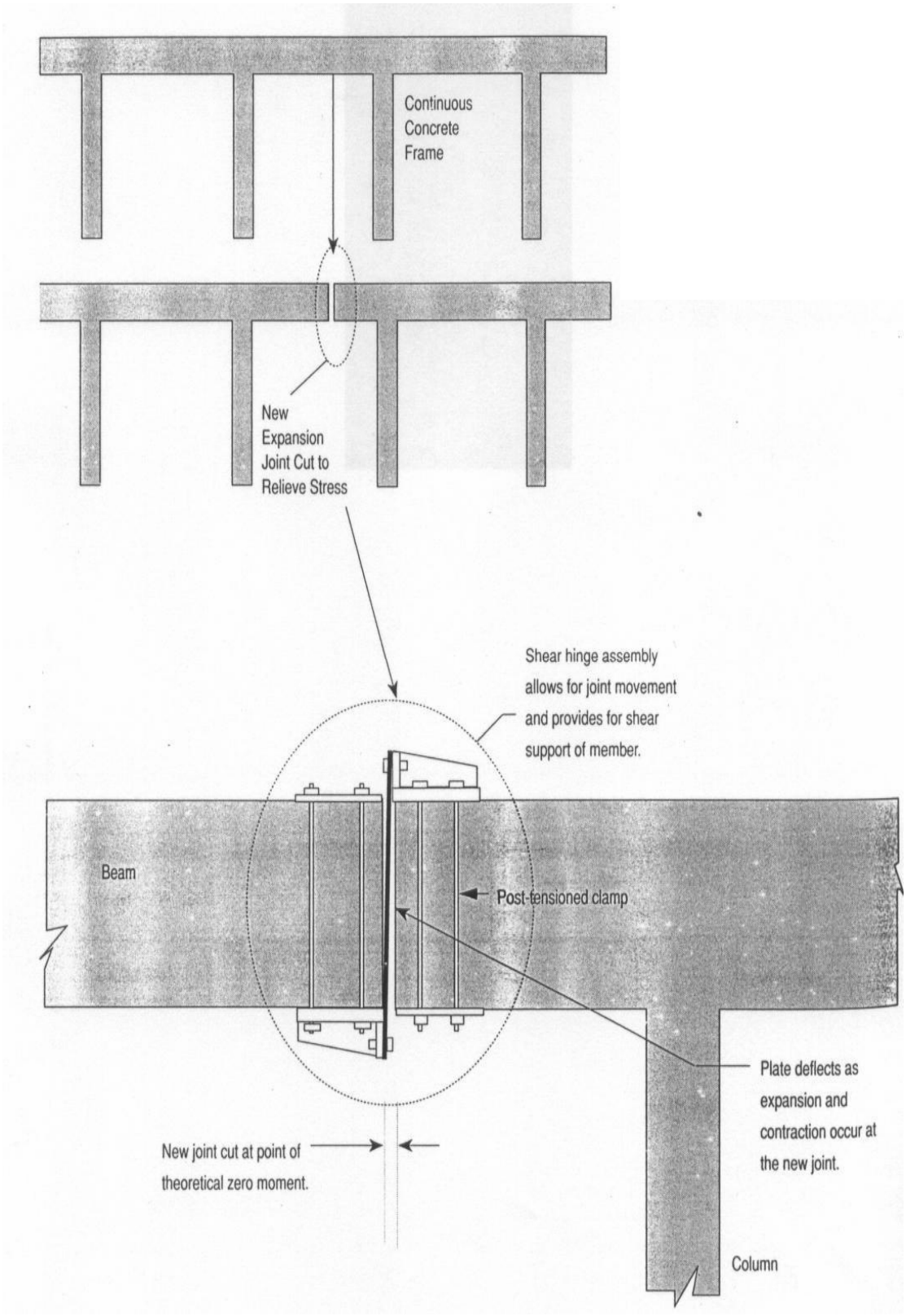
วิธีการลด Stress จะเป็นการลดน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง หรือดัดแปลงพฤติกรรมของโครงสร้าง ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่7-1 ซึ่ง Stress จะถูกลดลงไปได้โดยการติดตั้ง Expansion Joint เข้าไปให้โครงสร้าง

Shear Hinge ที่ติดตั้งเข้าไปที่รอยต่อนี้นอกจากจะทำให้โครงสร้างเคลื่อนที่ได้แล้วยังช่วยรองรับ (Support) โครงสร้างไปพร้อมกันด้วย ผลที่เกิดก็คือ แทนที่จะเกิดการแอ่นตัวที่พื้นของโครงสร้างแผ่นเหล็กที่เสริมเข้าไปในรอยต่อก็จะรับแรงแทน แล้วโก่งตัวจากแรงที่รับมานั้น

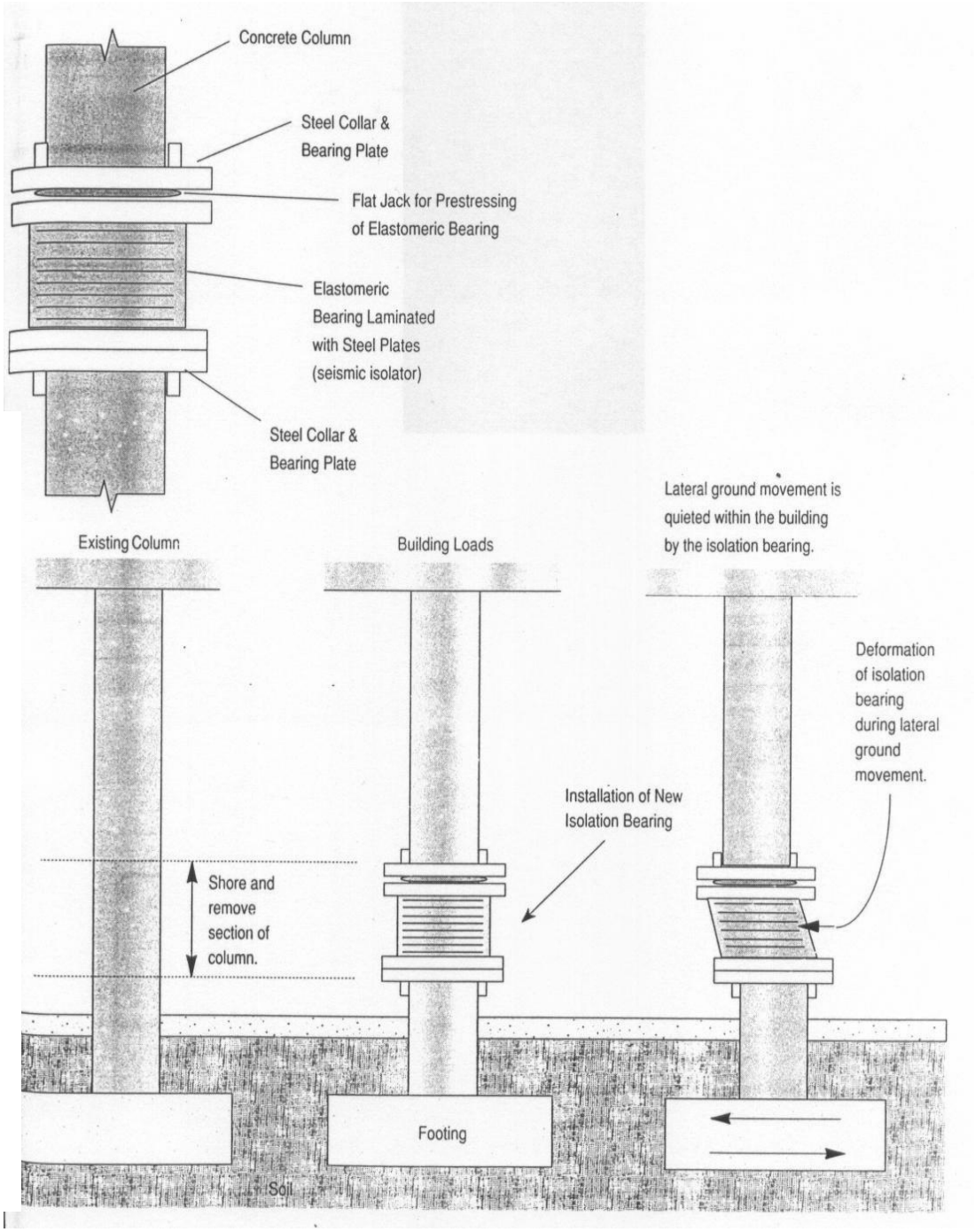
การตัดรอยต่อนี้มีหลักการสำคัญคือ จะต้องตัดรอยต่อที่มีค่าโมเมนต์เป็นศูนย์ (ทางทฤษฎี) เท่านั้น

7.2 การหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเคลื่อนที่ด้านข้าง

วิธีนี้ทำได้โดยการตัดส่วนหนึ่งของเสาออกแล้วติดตั้ง Isolation Bearing เข้าไปซึ่งจะเป็น Elastomeric Bearing ที่เสริมด้วยแผ่นเหล็ก (Laminated with Steel Plates) เมื่อมีการเคลื่อนที่ของพื้น ตัวอาคารก็จะไม่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนที่นั้น



รูปที่ 7-1 *Expansion Joint in Continuous Concrete Frame*



รูปที่ 7-2 *การทำ Lateral Ground Movement Isolation*

บทที่ 8

วัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยไฟเบอร์
(Fiber Reinforced Polymer, FRP)

8.1 บทนำ

การเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมกำลังให้โครงสร้างเดิมสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น หรือเพื่อเสริมกำลังให้โครงสร้างที่เสื่อมกำลังสามารถรับแรงได้ดังเดิม ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเสริมกำลังจะใช้แผ่นเหล็ก (Steel plate) มาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุแบบใหม่ที่ได้มาจากการนำไฟเบอร์มาผสมกับสารโพลิเมอร์เรซินมาใช้ วัสดุชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อของวัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยไฟเบอร์ (Fiber Reinforced Polymer, FRP) โดยที่สารโพลิเมอร์เรซินจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานและยึดไฟเบอร์เข้าไว้ด้วยกัน ในปัจจุบันวัสดุ FRP จึงได้กลายเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้เสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีข้อดีตรงที่วัสดุ FRP มีน้ำหนักเบา มีกำลังรับแรงดึงสูงและไม่มีปัญหาเรื่องสนิม ในปัจจุบันได้มีการผลิตวัสดุ FRP ออกมาในหลายรูปแบบ สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าไฟเบอร์และเรซินจะมีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ใช้เสริมกำลังอื่นๆ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในเรื่องของแรงงานและอุปกรณ์ในการติดตั้งมีราคาถูกกว่า ในปัจจุบันจึงมีผู้ให้ความสนใจในการใช้ระบบ FRP เพิ่มมากขึ้น



ก. การเตรียมพื้นผิวงาน



ข. การติดตั้งแผ่นเหล็กที่เสร็จสมบูรณ์

***รูปที่ 8-1** การเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็ก*

ข้อมูลที่ใช้ในเอกสารนี้ได้มาจากผลงานวิจัยของการใช้ FRP ในการเสริมกำลังจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีทั้งที่เป็นผลงานวิจัยจากการทดสอบ การวิเคราะห์ และงานภาคสนาม แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากผลงานวิจัยที่มีอยู่ยังไม่เพียงพอ ข้อแนะนำต่างๆ สำหรับวิธีการออกแบบในเอกสารนี้จึงเน้นให้มีความปลอดภัยสูง โดยการใช้ค่าตัวคูณความปลอดภัย (Safety Factor) ที่มีค่าค่อนข้างสูงสำหรับการออกแบบระบบ FRP

8.1.1 ขอบเขตและข้อจำกัด

เอกสารนี้ได้ให้แนวทางในการเลือก การออกแบบ และการติดตั้งระบบ FRP เพื่อการเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้ยังได้มีการกล่าวถึงข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ การควบคุมคุณภาพ และการดูแลรักษาระบบ FRP ไว้ด้วย ดังนั้นข้อมูลที่มีอยู่ในเอกสารนี้จึงสามารถนำไปใช้ประกอบในการเลือกใช้ระบบ FRP ที่เหมาะสมในการเสริมกำลังและความแข็งแรงของโครงสร้างได้

ถึงแม้ว่าการออกแบบที่กล่าวถึงในเอกสารนี้จะได้มาจากข้อมูลที่ได้มาจากผลการวิจัยที่ได้ดำเนินมาเป็นเวลากว่า 20 ปี แต่ก็ยังมีข้อมูลจากงานวิจัยไม่มากพอ แต่เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบจึงยังไม่ได้มีการพัฒนาและได้รับการพิสูจน์อย่างถูกต้องสมบูรณ์ ขั้นตอนในการออกแบบที่กล่าวถึงในเอกสารนี้จึงค่อนข้างที่จะเน้นให้การออกแบบมีความปลอดภัยสูงโดยการใช้ค่าตัวคูณความปลอดภัยที่สูง ในอนาคตเมื่อมีข้อมูลจากงานวิจัยที่ถูกต้องสมบูรณ์ขึ้นวิจัยในอนาคตมาใช้ประกอบ วิธีการออกแบบรวมทั้งการใช้ค่าตัวคูณความปลอดภัยอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปได้จากที่ระบุในเอกสารนี้

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับความทนทานและประสิทธิภาพในการทำงานของวัสดุ FRP ที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาที่ยาวนานหลายๆปีนั้น ยังอยู่ระหว่างการทำวิจัยเก็บข้อมูลจากภาคสนาม เนื่องจากที่ผ่านมาการใช้งานวัสดุ FRP เป็นระยะเวลาที่ยาวนานมากนั้นยังไม่มี ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะพยากรณ์อายุการใช้งานของระบบการเสริมกำลังด้วย FRP ได้อย่างถูกต้อง แนวทางในการออกแบบของระบบ FRP ในเอกสารนี้จึงได้มีการพิจารณาถึงการสูญเสียกำลังของวัสดุ FRP เนื่องจากการนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ดี หรือเนื่องจากปัญหาของการคืบและความล้าที่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากผ่านการใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยการแนะนำให้ใช้ตัวคูณลดกำลังสำหรับสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน และให้มีการควบคุมค่าของหน่วยแรงที่ใช้งาน ซึ่งในอนาคตตัวคูณเหล่านี้อาจจะเปลี่ยนไปเมื่อมีงานวิจัยเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลกระทบร่วมกันเนื่องจากสภาวะการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ดีและมีแรงกระทำที่มีค่าสูงมากๆ ยังมีข้อมูลจากงานวิจัยไม่เพียงพอและยังต้องการข้อมูลเพิ่มเติมอีกมาก ดังนั้นการออกแบบเพื่อใช้งานระบบ FRP ในสภาวะดังกล่าวจะต้องเพิ่มการระมัดระวังให้มากๆ

ตัวคูณที่เกี่ยวข้องกับความทนทานในระยะยาวของระบบ FRP จะไม่นำไปใช้กับค่าโมดูลัสในการรับแรงดึงของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในการออกแบบ ค่าโมดูลัสในการรับแรงดึงของวัสดุ FRP ถือว่าไม่ได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม แต่ก็อาจจะมีไฟเบอร์หรือเรซินบางชนิดที่สภาวะแวดล้อมมีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัส ซึ่งในเอกสารนี้จะไม่พิจารณาถึงไฟเบอร์หรือเรซินชนิดดังกล่าว

ปัญหาการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างระบบ FRP กับคอนกรีตเป็นอีกปัญหาที่สำคัญ เพราะแรงยึดเหนี่ยวเป็นปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดกำลังของโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังมีข้อมูลจากการวิจัยที่ยังไม่เพียงพอเกี่ยวกับวิธีคำนวณหาแรงยึดเหนี่ยวและวิธีป้องกันการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างระบบ FRP กับคอนกรีต ดังนั้นในเอกสารนี้จึงแนะนำให้มีการจำกัดค่าของหน่วยการยืดตัวสำหรับวัสดุ FRP เพื่อที่จะป้องกันปัญหาการวิบัติอันเนื่องมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ FRP กับคอนกรีต ซึ่งในอนาคตตัวคูณเหล่านี้อาจจะเปลี่ยนไปเมื่อมีวิธีและขั้นตอนการออกแบบที่ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้นกว่าที่

เอกสารฉบับนี้ได้ให้แนวทางเกี่ยวกับเทคนิคในการให้รายละเอียดและเทคนิคในการติดตั้งระบบ FRP เพื่อที่จะป้องกันปัญหาการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว ขั้นตอนเกี่ยวกับการเตรียมพื้นผิวงานและการเก็บงานของระบบ FRP มีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะทำให้โครงสร้างมีกำลังตามที่ได้ออกแบบ มีงานวิจัยบางชิ้นที่ได้พยายามศึกษาหาวิธีที่จะลดปัญหาการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวโดยการใช้สมอยึด แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ทำให้เกิดปัญหาอย่างอื่นตามมา เนื่องจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุที่มีความเปราะ และไม่สมมาตร ดังนั้นวิธีการยึดวัสดุ FRP โดยการใช้สมอควรจะมีการพิจารณาให้ละเอียดรอบคอบก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงๆ

สมการที่ใช้ในการออกแบบในเอกสารนี้เป็นผลมาจากงานวิจัยซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่างที่มีขนาดใช้งานทั่วๆไป และถูกย่อส่วนลงมา ถึงแม้ว่าระบบ FRP จะสามารถใช้ได้กับโครงสร้างอื่นๆ เช่น คานที่มีความลึกมาก แต่ก็ไม่มีการยืนยันผลจากการทดสอบจริงๆ ดังนั้นจึงควรเพิ่มความระมัดระวัง ถ้าทำการเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนในโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่มากๆ หรือเสริมกำลังในโครงสร้างบริเวณที่ถูกรบกวน (D-region) ในเอกสารนี้จึงมีการระบุถึงขนาดของโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของระบบ FRP ในการเสริมกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อแนะนำในเอกสารนี้ใช้เฉพาะระบบเสริมกำลัง FRP ที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังรับแรงดึง ดังนั้นจึงไม่แนะนำที่จะให้ใช้ระบบนี้เพื่อเสริมกำลังรับแรงอัด ถึงแม้ว่าวัสดุ FRP สามารถที่จะรับแรงกดได้ แต่ก็ยังมีปัญหาอื่นๆ เกี่ยวกับการใช้ FRP ในการรับแรงอัด ตัวอย่างเช่น ปัญหาการโก่งตัวเฉพาะที่ (Local buckling) ของไฟเบอร์ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ถ้าเกิดมีช่องว่างของเรซิน หรือการโก่งตัวเฉพาะที่ของเรซินกับไฟเบอร์ที่ผสานตัวกันเรียบร้อยแล้วในบริเวณที่มีการยึดติดกับคอนกรีตไม่ค่อยดีซึ่งมีผลทำให้การวางตัวของไฟเบอร์ไม่อยู่ในแนวเดียวกันและทำให้กำลังรับแรงอัดไม่แน่นอน เอกสารฉบับนี้ไม่ได้กล่าวถึงการก่อสร้าง การติดตั้ง การควบคุมคุณภาพ และการดูแลรักษา สำหรับการใช้วัสดุ FRP ในการรับแรงอัด รวมทั้งไม่ได้มีการกล่าวถึงการออกแบบเพื่อให้รับแรงอัด

มีงานวิจัยในปัจจุบันที่แสดงให้เห็นว่า การเสริมกำลังของกำแพงอิฐโดยระบบ FRP มีความเป็นไปได้ แต่ในเอกสารนี้จะไม่มีการกล่าวถึงการการเสริมกำลังของกำแพงอิฐดังกล่าว

8.1.2 การใช้งานของระบบ FRP

ระบบ FRP สามารถใช้เสริมกำลังให้กับโครงสร้างที่กำลังมีการสูญเสียกำลังเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง หรือโครงสร้างที่จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง หรือโครงสร้างที่มีการการออกแบบหรือการก่อสร้างที่ผิดพลาดไปจากที่ออกแบบไว้ วิศวกรผู้รับผิดชอบในเรื่องการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างดังกล่าว ควรพิจารณาถึงความเหมาะสมของระบบ FRP ที่จะใช้เสริมกำลังในการแก้ปัญหาดังกล่าว ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกประเภทของระบบ FRP

เพื่อที่จะประเมินถึงความเหมาะสมของระบบ FRP กับโครงสร้างที่จะมีการเสริมกำลัง วิศวกรควรที่จะดำเนินการตรวจสอบสภาพทั่วไปของโครงสร้างที่มีอยู่ ซึ่งรวมทั้งการทดสอบความสามารถในการรับแรง พิจารณาถึงจุดอ่อนหรือจุดด้อย ความเสียหาย และต้นเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง และพิจารณาถึงสภาพของคอนกรีตที่จะมีการติดตั้งวัสดุ FRP การตรวจสอบโดยรวมควรจะต้องมีการดำเนินการตรวจสอบภาคสนาม พิจารณาตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างเดิมที่มีอยู่หรือเอกสารใดๆ ที่เกี่ยวกับลักษณะการก่อสร้างจริงที่เกิดขึ้น รวมทั้งทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI เอกสารที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาตรวจสอบเหล่านี้ ได้รวมถึงเอกสารที่บรรยายถึงข้อกำหนดต่างๆ ที่มีการบังคับใช้ในการก่อสร้างที่ผ่านมา รายงานเกี่ยวกับการทดสอบภาคสนาม รวมทั้งประวัติการซ่อมแซมและดูแลรักษาของโครงสร้างที่ผ่านมา วิศวกรควร

ดำเนินการตรวจสอบภาคสนามอย่างละเอียด ตามมาตรฐาน ACI หรือเอกสารอื่นที่สามารถใช้อ้างอิงได้ กำลังรับแรงดึงของผิวคอนกรีตที่จะมีการติดตั้งวัสดุ FRP จะต้องมีการตรวจสอบโดยทำการทดสอบการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต (Pull-off adhesion test) ตามมาตรฐาน ACI นอกจากนี้การตรวจสอบภาคสนามควรจะกระทำเพื่อที่จะหา

- **ขนาดจริงของโครงสร้างที่มีอยู่**
- **ตำแหน่ง ขนาด และสาเหตุของการเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต รวมทั้งสาเหตุการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต**
- **ตำแหน่งและปริมาณการเกิดสนิมในเหล็กเสริม**
- **ตำแหน่งและปริมาณของเหล็กเสริม**
- **กำลังอัดของคอนกรีต**
- **ความแข็งแรงของคอนกรีตในบริเวณที่ระบบ FRP จะได้รับการติดตั้ง**

ในกี่ประเมินกำลังในการรับแรงของโครงสร้างที่มีอยู่ ควรใช้ข้อมูลที่ได้มาจากการตรวจสอบภาคสนาม ข้อมูลของการออกแบบมีอยู่ข้อมูลจากการวิเคราะห์รวมทั้งข้อมูลจากการทดสอบการรับแรง (Load test) หรือจากวิธีการอื่นที่เหมาะสม

ในการเลือกระบบ FRT ไปใช้งานวิศวกรควรทำการสำรวจถึงข้อมูลต่างๆจากเอกสารเกี่ยวกับระบบระบบ FRT ที่มีอยู่และปรึกษากับบริษัทผู้ผลิตระบบ FRP เพื่อที่จะตรวจสอบว่าระบบ FRP ที่เลือกมา มีความเหมาะสมกับสภาวะที่จะนำไปใช้งานจริงๆ

8.1.2.1 ข้อจำกัดในการเสริมกำลัง

ในการออกแบบการเสริมกำลังระบบ FRT ควรมีการจำกัดความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างเมื่อเกิดการวิบัติในระบบ FRP จะต้องไม่ทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตามไปด้วย

ระบบ FRP ที่จะใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างควรได้รับการออกแบบตามรายละเอียดที่กล่าวถึงในส่วนที่ 4 ซึ่งมีการพูดถึงเรื่องของการจำกัดแรงที่ใช้งานลักษณะต่างๆ ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิและสภาวะแวดล้อม การพิจารณาถึงลักษณะแรงกระทำแบบต่างๆ และผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อระบบ FRP

8.1.2.2 ไฟไหม้และความปลอดภัยของชีวิต

โครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP ควรที่จะสามารถต้านทานไฟไหม้ได้ตามมาตรฐานอาคารทั่วไป การเคลือบผิวของระบบ FRP สามารถที่จะช่วยลดการกระจายของควันและเปลวไฟได้เนื่องจากวัสดุ FRP มีความต้านทานต่ำ ณ อุณหภูมิที่สูง ดังนั้นในการออกแบบจึงสมมติให้ระบบFRP สูญเสียกำลังจนหมดในขณะเกิดเพลิงไหม้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวโครงสร้างหลังจากที่ระบบ FRP สูญเสียไปควรจะมีกำลังพอเพียงที่จะรับแรงที่มีอยู่ช่วงไปไหม้ แนวทางในการคำนวณของการสามารถทนไฟได้ของโครงสร้าง

การเพิ่มความทนไฟของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP อาจจะทำได้โดยการใส่เรซินหรือการเคลือบผิวหรือวิธีใดๆที่จะป้องกันไฟ แต่ว่าการกระทำดังกล่าวอาจจะไม่สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระบบ FRP ระหว่างไฟไหม้

8.1.2.3 อุณหภูมิสูงสุดของช่วงใช้งาน

คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของเรซินที่ใช้กับระบบFRPมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและมีคุณสมบัติลดลงที่อุณหภูมิ T_g (Glass-transition temperature) ค่าอุณหภูมิ T_g คือค่าตรงกลางของช่วงอุณหภูมิที่ทำ

ให้เรซินเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเปราะไปเป็นสภาพแบบพลาสติก การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลทำให้คุณสมบัติของไฟเบอร์กับเรซินที่แข็งตัวแล้วลดลง ค่าอุณหภูมิ T_g จะแตกต่างกันไปแล้วแต่ระบบFRPซึ่งมีช่วงได้จาก 60-82 องศาเซลเซียส สำหรับเรซินที่มีขายกันอยู่ทั่วไปในท้องตลาดดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานของระบบFRPจึงไม่ควรเกินค่าอุณหภูมิ T_g โดยปกติแล้วผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนดรายละเอียดของค่า T_g สำหรับระบบ FRP ที่ผลิตขึ้นมา

8.1.2.4 กำลังอัดต่ำสุดของคอนกรีตที่ผิวงาน

ประสิทธิภาพของระบบ FRP ขึ้นอยู่กับความมั่นคนแข็งแรงของบนพื้นผิวคอนกรีตที่จะทำการติดตั้งระบบ FRP ดังนั้นไม่ควรใช้ระบบ FRP กับโครงสร้างที่ปัญหาสนิมในเหล็กเสริมหรือคอนกรีตที่เสื่อมสภาพ เว้นแต่ว่าจะได้รับการซ่อมแซมให้เรียบร้อย ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและปัญหาสนิมในเหล็กเสริมควรจะได้รับการประเมินและแก้ไขก่อนการใช้ระบบ FRP การเสื่อมสภาพของคอนกรีตนี้ได้แก่ ปัญหาการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา การก่อตัวของ Ettringite คาร์บอเนชั่น การเกิดรอยแตกตามยาวรอบๆเหล็กเสริมที่เป็นสนิม

คอนกรีตในบริเวณที่จะติดตั้งระบบ FRP ควรได้รับการประเมินถึงกำลังในการรับแรงของชิ้นส่วนเมื่อมีการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมและตัวคอนกรีตควรที่จะเป็นไปตามข้อแนะนำของACI.

กำลังของคอนกรีตมีความสำคัญต่อการใช้งานที่แรงยึดเหนี่ยวเข้ามาเกี่ยวข้อง งานประเภทนี้ได้แก่การเสริมกำลังรับแรงดัดและรับแรงเฉือน ระบบ FRP แรงยึดเหนี่ยวมีความสำคัญเพราะจะทำให้หน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบสามารถมีค่าตามที่ออกแบบไปได้ คอนกรีตในส่วนนี้ (รวมทั้งพื้นที่ที่จะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวที่ต้องซ่อมแซมและตัวคอนกรีตเดิม) ควรที่จะต้องมีกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนพอเพียงในการถ่ายแรงจากคอนกรีตสู่ระบบ FRP กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตควรที่จะมีค่าไม่ต่ำกว่า 1.4 MPa ซึ่งกำลังแรงดึงนี้สามารถที่จะได้มาจากการทดสอบแบบ pull-off adhesion test ไม่ควรใช้ระบบ FRP ในกรณีที่คอนกรีตมีกำลังอัดน้อยกว่า 17 MPa ในการใช้งานที่แรงยึดเหนี่ยวมีความสำคัญน้อย เช่น การพันรอบเสาเพื่อเพิ่มการจำกัดเขต(confinement)ซึ่งต้องการแค่การสัมผัสระหว่างระบบ FRP กับคอนกรีตไม่จำเป็นจะต้องใช้ค่ากำลังดึงต่ำสุดดังกล่าว
การใช้ระบบ FRP จะไม่สามารถที่จะหยุดสนิมในเหล็กเสริมได้ ในกรณีทีมีสนิมในเหล็กเสริมมากๆจนทำให้คอนกรีตแตกตัวและมีกำลังลดลง ไม่แนะนำให้ใช้ระบบ FRP ในการเสริมกำลังเว้นแต่ว่าปัญหาดังกล่าวได้รับการแก้ไขให้หมดไป

8.2 ข้อมูลต่าง ๆ ของระบบ FRP

ระบบ FRP ได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเพื่อที่จะเสริมกำลังสำหรับโครงสร้างคอนกรีตตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 โปรเจคต่างๆที่ใช้ระบบ FRP ได้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากมายจากไม่กี่โปรเจคเมื่อสิบปีที่แล้วเป็นหลายพันโปรเจคในปัจจุบัน โครงสร้างที่ได้รับการเสริมด้วยระบบ FRP ได้แก่ คาน พื้น เสา กำแพง จุดต่อ ปล่องควัน หลังคาโค้ง อุโมงค์ ไซโล โครงถัก และท่อ นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบ FRP ในการเสริมกำลังกำแพงอิฐ โครงสร่างไม้และโครงสร้างเหล็ก ความคิดของการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตโดยใช้ระบบ FRP ไม่ใช่เรื่องใหม่เนื่องจากระบบ FRP ได้ถูกใช้ในการเสริมกำลังแทนที่แผ่นเหล็กเป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จุดเริ่มต้นของการพัฒนาระบบ FRP เกิดขึ้นในศตวรรษที่ 1980 ในยุโรปและญี่ปุ่น

8.2.1 ประวัติการพัฒนาระบบ FRP

ในยุโรประบบ FRP ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้เป็นทางเลือกแทนการใช้แผ่นเหล็กเสริมกำลังเนื่องจากแผ่นเหล็กมีปัญหาการเกิดสนิม ซึ่งนำไปสู่ปัญหาการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีตนอกจากนี้ยังมีความยากในการติดตั้งแผ่นเหล็กรวมทั้งต้องใช้เครื่องมือหนัก จึงทำให้เกิดการพัฒนาระบบ FRP ขึ้นมีการรายงานเกี่ยวกับการทดสอบการใช้วัสดุ FRP ในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตตั้งแต่ปีค.ศ.1978 ในประเทศเยอรมัน งานวิจัยในประเทศสวิสเซอร์แลนด์นำไปสู่การใช้งานครั้งแรกของระบบ FRP เพื่อที่จะเสริมกำลังรับแรงดัดให้สะพานคอนกรีต ระบบ FRP ถูกนำไปใช้งานกับเสาคอนกรีตครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในศตวรรษที่ 1980 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจำกัดเจตของคอนกรีตหลังจากเกิดแผ่นดินไหวในปี ค.ศ.1995 การใช้ระบบ FRP ในประเทศญี่ปุ่นได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

ในประเทศสหรัฐอเมริกา การใช้ไฟเบอร์ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตได้รับความสนใจมากตั้งแต่ช่วงศตวรรษที่ 1930 การพัฒนาและการทำวิจัยอย่างจริงจังในเรื่องการใช้ระบบ FRP ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตในสหรัฐอเมริกาเริ่มขึ้นในศตวรรษ 1980 โดยการเริ่มต้นของNSF และ FSWA ผลจากงานวิจัยและนำไปสู่การก่อสร้างในโปรเจคจริงๆที่มีสภาวะแวดล้อมแตกต่างกันไป

การพัฒนาของมาตรฐานการออกแบบสำหรับระบบ FRP กำลังดำเนินอยู่ในยุโรป ญี่ปุ่น แคนาดา และสหรัฐอเมริกา ในช่วงสิบปีที่ผ่านมา JSCE JCI และ RTRI ได้ตีพิมพ์เอกสารหลายชิ้นที่เกี่ยวกับการใช้วัสดุFRPในโครงสร้างคอนกรีต

ในยุโรป FIB ได้ตีพิมพ์เอกสารสำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบ FRP ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต (FIB 2001)

ในแคนาดา CSA และ ISIS มีความพยายามที่จะพัฒนาคู่มือสำหรับระบบ FRP CSA พึ่งจะออกมาตรฐานสำหรับการออกแบบและการก่อสร้างอาคารโดยการใช้วัสดุFRP (CSA S806)
ในสหรัฐอเมริกาข้อกำหนดสำหรับระบบ FRP ก็กำลังจะมีขึ้นสำหรับงานก่อสร้าง

8.2.2 ระบบ FRP ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

ระบบ FRP ได้รับการผลิตมาในหลายๆรูปแบบรวมทั้งระบบแข็งตัวในที่และระบบแผ่นสำเร็จ ระบบ FRP สามารถที่จะแบ่งเป็นประเภทต่างๆได้ตามวิธีการขนส่งไปยังสถานที่ก่อสร้างและการติดตั้ง การเลือกระบบ FRP สำหรับงานก่อสร้างควรพิจารณาถึงการถ่ายแรงและลักษณะของและโครงสร้าง รวมทั้งความง่ายของการทำงาน ประเภทของระบบ FRP โดยทั่วไปที่มีดังต่อไปนี้

8.2.2.1ระบบแข็งตัวในที่

ประกอบไปด้วยแผ่น Fiber sheet ซึ่งจะต้องนำไปใช้กับเรซิน ณ สถานที่ก่อสร้าง เรซินจะใช้ในการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นไฟเบอร์ กับผิวคอนกรีต ระบบนี้จะเป็นระบบที่เรซินแข็งตัว ณ สถานที่ก่อสร้างซึ่งเปรียบเทียบได้กับ คอนกรีตหล่อในที่ ระบบเปียกยังแบ่งเป็น

1. แผ่นไฟเบอร์ที่มีการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน
2. แผ่นไฟเบอร์ที่มีการเรียงตัวมากกว่าหนึ่งทิศทาง

8.2.2.2 ระบบแผ่นสำเร็จ

ระบบแผ่น FRP ได้รับการผลิตมาจากโรงงาน ปกติจะใช้กาวในการติดแผ่นสำเร็จกับพื้นผิวคอนกรีต ระบบนี้เปรียบเทียบได้กับ คอนกรีตสำเร็จรูป แบ่งเป็น 2 แบบ

1. ระบบสำเร็จรูปที่แผ่นลามิเนทมีไฟเบอร์เรียงตัวไปในทิศทางเดียว
2. ระบบสำเร็จรูปที่มีไฟเบอร์วางตัวมากกว่าหนึ่งทิศทาง

8.3 วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุ

8.3.1 วัสดุที่ประกอบกันขึ้นในระบบ FRP

8.3.1.1 เรซิน

เรซินที่ใช้งานร่วมกับวัสดุ FRP มีอยู่หลายตัวรวมทั้ง Primers Putty Fillers และสารยึดเหนี่ยว (Adhesives) สารเรซินที่มีใช้กันอยู่ทั่วๆไปได้แก่ Epoxies vinyl esters และ polyesters ผู้ผลิตระบบ FRP จะใช้เรซินที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีความสามารถในการยึดติดกับคอนกรีต
- มีความสามารถในการยึดติดกับระบบ FRP
- มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น ความเค็ม ความร้อนและสารเคมี
- ความสามารถในการไหล (filling ability และ workability)
- ช่วงอายุของส่วนผสมมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
- มีความสามารถในการประสานยึดไฟเบอร์ที่นำมาใช้เสริมกำลังเข้าด้วยกัน
- สามารถพัฒนาคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับระบบ FRP

8.3.1.2Primer

Primer เป็นเรซินที่ใช้รองพื้นเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงของพื้นผิวคอนกรีต โดยจะเข้าไปอุดตามช่องว่างต่าง ๆ ของพื้นผิวคอนกรีตและจะเป็นตัวช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเรซินตัวอื่นกับคอนกรีต

8.3.1.3 Putty fillers

Putty filler เป็นเรซินที่ใช้ในการอุดช่องว่างในพื้นผิวคอนกรีตโดยจะทำให้พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้นและช่วยป้องกันการเกิดฟองอากาศในระหว่างที่เรซินกำลังแข็งตัว Putty filler ยังทำหน้าที่สำคัญมากอีกอย่างหนึ่งคือทำหน้าที่ในการยึดไฟเบอร์ให้เข้าที่และช่วยส่งผ่านแรงเฉือนระหว่างไฟเบอร์และเป็นตัวส่งผ่านแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตที่มีการเตรียมพื้นผิวด้วย Primer กับระบบ FRP ชนิดที่มีการแข็งตัว ในที่

8.3.1.4สารยึดเหนี่ยว(Adhesives)

สารยึดเหนี่ยวทำหน้าที่เหมือนกาวที่จะยึดตัวพื้นผิวคอนกรีตกับแผ่น FRP ที่แข็งตัวแล้วโดยทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านแรงเฉือนระหว่างพื้นผิวคอนกรีตกับแผ่น FRP นอกจากนี้ยังใช้สารยึดเหนี่ยวเป็นกาวเพื่อที่จะยึดแผ่น FRP หลายๆ แผ่นเข้าด้วยกัน

8.3.1.5 สารเคลือบผิว (Coating)

สารเคลือบผิวหน้าจะถูกใช้เพื่อที่จะเสริมความทนทานให้กับระบบ FRP จากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง โดยปกติจะใส่ไว้เป็นพื้นผิวชั้นนอกสุดหลังจากที่เรซินแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว

8.3.1.6 Fibers

Fibers ที่ใช้อยู่มีทั้งที่เป็นใยแก้ว (Glass Fiber) Aramid Fibers และ Carbon Fibers ไฟเบอร์จะทำหน้าที่ช่วยให้ระบบ FRP มีทั้งกำลังและความแข็งแรงสูงขึ้น

8.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

8.3.2.1ความหนาแน่น)Density)

วัสดุ FRP จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.2– 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของเหล็กอยู่ 4– 6 เท่าดังนั้นการใช้วัสดุ FRP จะช่วยลดค่าขนส่งและลดค่าน้ำหนักเสริมกำลังแทนแผ่นเหล็กคงบรรทุกที่ ที่จะถูกเพิ่มเข้าไปบนโครงสร้างได้มาก

8.3.2.2 สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ)Coefficient of Thermal Expansion)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุ FRP ที่มีการเรียงตัวของไฟเบอร์ในทิศทางเดียวจะมีความแตกต่างกันในทิศทางตามยาวและตามขวางของไฟเบอร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไฟเบอร์ เรซิน และปริมาณของไฟเบอร์ที่ใช้

8.3.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิสูง (Effects of high temperatures)

ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของโพลิเมอร์จะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าอุณหภูมิ T_g เนื่องจากโพลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล ค่าของอุณหภูมิ T_g ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน ปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 60 – 82 C ไฟเบอร์จะทนอุณหภูมิได้สูงกว่าเรซิน ดังนั้นเมื่อประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ FRP จะมีความสามารถที่จะรับแรงได้ต่อไประยะหนึ่งจนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิ 1000 C 175 C และ 275 Cสำหรับ ใยแก้ว Aramid fibers และ Carbon fibers ตามลำดับอย่างไรก็ตามในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ความสามารถในการส่งถ่ายแรงระหว่างไฟเบอร์จะลดลงอันเป็นผลมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวในเรซิน ค่าของกำลังรับแรงดึงของระบบ FRP จึงลดลงไปด้วย ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 250 C (สูงกว่าค่าอุณหภูมิ T_g ของเรซิน) ค่ากำลังรับแรงดึงของวัสดุ FRP ที่ทำจากใยแก้วและที่ทำจาก carbon fibers จะมีค่าลดลงมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ คุณสมบัติอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในมาจากการส่งถ่ายแรงในเรซิน เช่น กำลังรับแรงดัด ก็จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่ได้กล่าวมา

8.3.3 คุณสมบัติทางกลและพฤติกรรม

8.3.3.1 พฤติกรรมในการรับแรงดึง

วัสดุ FRP จะไม่มีพฤติกรรมแบบพลาสติก ลักษณะของความสัมพันธ์ของหน่วยแรง (stress) และหน่วยการยืดหดตัว (strain) ของวัสดุ FRP ที่มีการรายงานไว้โดยบริษัทผู้ผลิตจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ ดังนั้นการวิบัติจะเป็นแบบทันทีทันใด

คุณสมบัติของวัสดุ FRP ถ้าเป็น Fiber sheet จะรายงานโดยอ้างอิงกับพื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์ ถ้าเป็นแผ่น FRP ก็จะรายงานโดยอ้างอิงกันพื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP ซึ่งรวมหน้าตัดของเรซินกับไฟเบอร์เข้าด้วยกันพื้นที่หน้าตัดสุทธิของไฟเบอร์จะใช้ในการรายงานคุณสมบัติของระบบที่แข็งตัวในที่ซึ่งคำนวณมาจากพื้นที่ของไฟเบอร์ทั้งหมดโดยไม่พิจารณาถึงความกว้างและความหนาของ Fiber sheet ที่ใช้ในระบบที่แข็งตัว นั่นก็คือจะไม่รวมพื้นที่ของเรซินเข้าไปด้วย

การรายงานคุณสมบัติโดยใช้หน้าตัดทั้งหมดของแผ่น FRP จะมีค่าความหนามากกว่าและค่าของกำลังและค่ามอดูลัสต่ำกว่าการรายงานโดยใช้พื้นที่หน้าตัดสุทธิของไฟเบอร์ คุณสมบัติของระบบ FRP จะเป็นคุณสมบัติประกอบร่วมกับของไฟเบอร์กับเรซิน การวางตัวของไฟเบอร์ และวิธีการสร้างระบบ FRP คุณสมบัติทางกลของระบบ FRP ไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบใดๆ ควรที่จะมีการทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างที่มีการแข็งตัวแล้วซึ่งรู้ปริมาณไฟเบอร์ที่แน่นอน กำลังรับแรงดึงของระบบ FRP ที่ใช้ในการออกมาควรได้มาจากบริษัทผู้ผลิต โดยที่บริษัทผู้ผลิตควรจะรายงานค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้มาจากค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงของตัวอย่าง ลบด้วย 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\left(\overline{X} - 3 \cdot S.D.\right)$ นอกจากการรายงานกำลังรับแรงดึงแล้วบริษัทผู้ผลิตควรจะรายงานค่าหน่วยการยืดหดตัวสูงสุด ณ จุดที่เกิดการวิบัติของไฟเบอร์ (ไฟเบอร์เกิดการฉีดขาด) และค่าโมดูลัสของระบบ FRP โดยที่ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของระบบ FRP ค่ายังโมดูลัส(Young's modulus)ควรจะคำนวณมาจากค่าคอร์ด(Chord modulus) โมดูลัสระหว่างค่าหน่วยการยืดหดตัว 0.003 – 0.006 ตามมาตรฐาน AFTM D 3039 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ควรมีไม่ต่ำกว่า 20 ตัวอย่าง บริษัทผู้ผลิตควรจะต้องอธิบายถึงวิธีการทดสอบ จำนวนของตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดสอบ

8.3.3.2 พฤติกรรมการรับแรงอัด

ปัจจุบันระบบ FRP ไม่เหมาะสมที่จะไปใช้เสริมกำลังรับแรงอัด เนื่องจากยังขาดข้อมูลจากการทดสอบที่พอเพียง ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของแผ่น FRP ที่มีอยู่บ้างได้แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงดึง แผ่น FRP ที่รับแรงกดตามแนวแกนอาจจะเกิดการวิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะของไฟเบอร์ หรือเนื่องจากแรงเฉือน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไฟเบอร์ ปริมาณไฟเบอร์ และชนิดของเรซิน จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุ FRP พบว่าวัสดุ FRP มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 55% 78% และ20% ของกำลังรับแรงดึง สำหรับวัสดุ FRP ชนิดใยแก้ว carbon fibers และ aramid fibers ตามลำดับ

ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะมีค่าต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึง ผลการทดสอบจากตัวอย่างที่มีใยแก้ว 55% – 60% โดยปริมาตรพบว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 34000 – 48000 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุ FRP ชนิดใยแก้ว carbon fibers และ aramid fibers จะมีค่าประมาณ 82% 85% และ 100% ตามลำดับของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึง

8.3.4 พฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลา

8.3.4.1 การคืบ (Creep – Rupture)

วัสดุ FRP ที่รับแรงคงที่เป็นช่วงเวลานาน ๆ อาจจะเกิดการพังแบบทันทีทันใดก็ได้ ถ้าช่วงเวลาที่รับแรงนั้นเกินกว่าช่วง Endurance time เมื่ออัตราส่วนของหน่วยแรงดึงต่อค่ากำลังของวัสดุ FRP มีค่าเพิ่ม ค่าของ Endurance time จะลดลง นอกจากนี้ค่า Endurance time ยังอาจลดลงถ้านำวัสดุ FRP ไปใช้งานในสภาวะที่ไม่ค่อยดี เช่น อยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงตลอดเวลา อยู่ในสภาวะที่ได้รับรังสีอุลตร้าไวโอเลตเป็นเวลานาน อยู่ในบริเวณที่มีความเป็นด่างสูง หรืออยู่ในสภาวะเปียกและแห้งสลับกัน

โดยปกติแล้ว Carbon fibers จะมีปัญหา การคืบ (Creep – Rupture) น้อยที่สุด ในขณะที่ใยแก้วจะมีปัญหามากที่สุด จากการทดสอบการคืบ (Creep – Rupture) ของวัสดุ FRP ที่ผ่านมาโดยใช้วัสดุ FRP ที่มีหน้าตัดเป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าของหน่วยแรงที่เกิดการคืบ (Creep – Rupture) ของวัสดุ FRP หลังจากการใช้งานเป็นเวลา 500,000 ชั่วโมง (ประมาณ 50 ปี) ต่อกำลังรับแรงดึงของวัสดุ FRP มีค่าเท่ากับ 0.30 0.47 และ 0.91 สำหรับวัสดุ FRP ชนิดใยแก้ว Carbon fibers และ Aramid fibers ตามลำดับ

8.3.4.2ความล้า (Fatigue)

เมื่อเปรียบเทียบวัสดุ FRP ชนิดต่างๆที่มีการนำไปใช้งานในการเสริมกำลังโครงสร้างพบว่า วัสดุ FRP ชนิด Carbon fibers จะมีปัญหาในเรื่องของ Fatigue น้อยที่สุด ผลการทดสอบที่ได้นำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงกับลอกการึทึมของจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติของวัสดุหรือ S – N curve (Stress vs. logarithm of the number of cycles at failure) แสดงให้เห็นว่าที่จำนวน 1,000,000 รอบค่า ของกำลังความล้าของวัสดุ FRP (Fatigue strength) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 60 – 70 % ของกำลังรับแรงดึง โดยที่อุณหภูมิและความชื้นของโครงสร้างคอนกรีตไม่มีผลกระทบต่อกำลังของวัสดุ FRP ในเรื่องของความล้า

8.3.5 ความทนทาน

ระบบ FRP ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติทางกลลดลง เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ดี เช่น สภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความร้อนสูง หรืออยู่ใกล้จากสารเคมี ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ช่วงเวลาที่ได้รับผลกระทบ ชนิดของเรซิน ชนิดของไฟเบอร์ และวิธีการบ่มเรซิน ล้วนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของระบบ FRP

8.3.6 คุณภาพของระบบ FRP

การเลือกใช้ระบบ FRP ในแต่ละงานควรจะมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานและใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบการพิจารณา ผลของการทดสอบควรรายงานถึงค่าต่างๆที่วิศวกรผู้ออกแบบต้องนำไปใช้ในการออกแบบค่า ได้แก่ กำลังรับแรงดึง ความทนทาน ความต้านทานต่อการล้า แรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต และค่าอุณหภูมิ T_g

8.4 การขนส่ง การเก็บรักษา และการนำไปใช้

8.4.1 การเก็บรักษา

8.4.1.1วิธีการเก็บรักษา

ให้ทำการเก็บรักษาสารต่างๆที่ใช้ในระบบ FRP ตามที่ผู้ผลิตแนะนำ สารบางตัวสามารถเก็บร่วมกันได้แต่สารบางตัวอาจจะต้องเก็บแยกต่างหากเนื่องจากเป็นสารที่มีความไวไฟ หรืออาจจะเป็นสารที่มีพิษรุนแรง

8.4.1.2 อายุของสารเรซินที่ผสมแล้ว

คุณสมบัติของเรซินที่ยังไม่ได้แข็งตัวสามารถที่จะเปลี่ยนไปได้ตามเวลา อุณหภูมิ และความชื้น บริษัทผู้ผลิตจะบอกถึงอายุของสารประเภทเรซินว่าจะหมดอายุเมื่อใด ถ้าเกิดสารใดที่หมดอายุแล้วหรือเริ่มเสื่อมสภาพ หรือแม้แต่ปนเปื้อนก็ไม่ควรที่จะนำมาใช้ ถ้าจะต้องมีการกำจัดสารที่หมดอายุเหล่านี้ก็ควรทำตามขั้นตอนที่กฎหมายระบุเพื่อป้องกันจะปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ตามมา

8.4.2 การนำไปใช้

8.4.2.1 อันตรายจากสารพิษ

สารประเภทเรซินซึ่งรวมไปถึงสารโพลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว สารไวนิลเอสเตอร์ อีพอกซี และโพลียูริเทรนเรซิน อาจจะมีอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงาน อันตรายต่างๆเหล่านี้อาจรวมไปถึง

- การระคายเคืองของผิว เช่น เป็นผื่นคัน
- ภูมิแพ้
- ภัยจากสารระเหยต่อระบบทางเดินหายใจเมื่อหายใจเข้าไป
- ภัยจากการระเบิด ถ้าสารเหล่านี้มีความหนาแน่นในอากาศเป็นปริมาณมาก
- ฝุ่น อันเนื่องมาจากการขัดหรือปรับแต่งผิวงาน

8.4.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันอันตรายจากสารเคมี

เพื่อเป็นการป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสกับสารเคมี ผู้ปฏิบัติงานควรใช้ชุดและถุงมือประเภทที่ใช้แล้วทิ้งได้ โดยเฉพาะถุงมือที่เป็นยางหรือพลาสติกจะดีกว่าถุงมือที่เป็นผ้า นอกจากนี้ผู้ปฏิบัติงานควรใส่แว่นตาป้องกันภัย รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันฝุ่นที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจในขณะที่ปฏิบัติงาน (Safety glasses หรือ goggles) สถานที่ปฏิบัติงานควรมีอากาศถ่ายเทโดยสะดวก สารเรซินบางตัวเป็นอันตรายระหว่างที่ทำการผสม ดังนั้นควรทำตามข้อแนะนำของผู้ผลิตเกี่ยวกับวิธีและขั้นตอนการผสมที่ถูกต้อง เรซินที่ผ่านการผสมแล้วบางครั้งอาจจะคายความร้อนระหว่างที่กำลังแข็งตัว ดังนั้นต้องคอยตรวจสอบอุณหภูมิของเรซินและ ภาชนะที่บรรจุว่าอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย

8.4.2.3 การทำความสะอาด

การทำความสะอาดอาจจะต้องใช้สารละลายบางตัวช่วย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารที่มีความไวไฟ การกำจัดสารที่เหลือใช้จะต้องไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

8.5 การติดตั้งระบบ FRP

วิธีการติดตั้งระบบ FRP อาจแตกต่างกันไปตามบริษัทผู้ผลิต และแตกต่างกันไปตามระบบที่ใช้ ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของโครงสร้างในการติดตั้งระบบ FRP ควรดำเนินการโดยบริษัทผู้รับเหมาซึ่งได้รับการฝึกงานมาอย่างดีและมีประสบการณ์ในการทำงานพอสมควร การดำเนินการใดๆในการติดตั้งที่นอกเหนือไปจากสิ่งที่ผู้ผลิตระบุควรจะปรึกษากับบริษัทผู้ผลิตระบบนั้นๆก่อน

8.5.1 ผู้ดำเนินการติดตั้ง

บริษัทผู้รับเหมาควรที่จะมีเอกสารรายงานถึงประสบการณ์การทำงาน รวมทั้งการผ่านการฝึกงานของทีมงานเป็นอย่างดี บริษัทผู้ผลิตระบบ FRP หรือตัวแทนจำหน่ายควรที่จะมีการฝึกบริษัทผู้รับเหมาถึงวิธีการติดตั้งจนกระทั่งบริษัทผู้รับเหมามีความสามารถในการออกไปทำงานได้เป็นอย่างดี

8.5.2 ข้อพิจารณาเกี่ยวกับ อุณหภูมิ และความชื้น

อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของผิวงานที่จะมีการติดตั้งระบบ FRP จะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ FRP ดังนั้นควรจะมีการสังเกตและจดบันทึกสภาวะแวดล้อมก่อนและระหว่างการติดตั้งระบบ FRP สภาวะแวดล้อมที่ควรจดบันทึกเหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิของผิวคอนกรีต อุณหภูมิของอากาศ รวมทั้งความชื้นสัมพัทธ์

ไม่ควรนำ Primer เรซินอิ่มตัวและสารยึดเหนี่ยว (Adhesive) ไปใช้กับพื้นผิวที่เย็นมากๆ เนื่องจากจะมีผลต่อการแข็งตัวของเรซิน ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของระบบ FRP ดังนั้นถ้าจำเป็นอาจจะต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับพื้นผิวก่อนจะทำการติดตั้งระบบ FRP นอกจากนี้ไม่ควรนำเรซินและสารยึดเหนี่ยว

ไม่ควรนำไปใช้กับผิวที่เปียกหรือชื้น ยกเว้นเรซินและสารยึดเหนี่ยวที่ถูกผลิตขึ้นมาสำหรับสภาวะดังกล่าว ระบบ FRP ไปใช้กับพื้นผิวของคอนกรีตที่เป็นทางผ่านของไอน้ำที่ระเหยขึ้นมาจากคอนกรีต เพราะว่าไอน้ำเหล่านี้เมื่อระเหยผ่านพื้นผิวคอนกรีตไปสู่เรซินที่ยังไม่แข็งตัวจะทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในระบบ FRP และทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างระบบ FRP กับพื้นผิวคอนกรีตลดลง

8.5.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ FRP

ระบบ FRP ที่ต่างกันอาจจะมีการออกแบบอุปกรณ์หรือการใช้อุปกรณ์ในการติดตั้งแตกต่างกัน อุปกรณ์เหล่านี้จะต้องมีความพร้อมอยู่ในสภาพที่สะอาดโดยปราศจากข้อบกพร่องหรือตำหนิใดๆในการที่จะนำไปใช้งาน อุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้ควรที่จะมีจำนวนมากที่จะไม่ทำให้เกิดการขาดตอนหรือขาดช่วงของการทำงาน ซึ่งอาจจะส่งผลเสียต่อกระบวนการติดตั้งระบบ FRP ทำให้ระบบ FRP มีคุณภาพลดลง

8.5.4 การซ่อมแซมและเตรียมพื้นผิวคอนกรีต

พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคอนกรีตในบริเวณที่ติดตั้ง ดังนั้นถ้าคอนกรีตบริเวณดังกล่าวมีปัญหาอาจจะมีผลทำให้เกิดการหลุดร่อนของระบบ FRP จากพื้นผิวคอนกรีต ข้อแนะนำในหัวข้อนี้จะใช้ได้กับระบบ FRP ทั่วๆไป ดังนั้นถ้าเป็นระบบ FRP ที่ผลิตหรือออกแบบมาเป็นพิเศษ วิศวกรผู้ออกแบบและควบคุมงานควรจะต้องปรึกษาบริษัทผู้ผลิตระบบดังกล่าวถึงการเตรียม

พื้นผิวคอนกรีตในบริเวณที่จะติดตั้งระบบ FRP การเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตนี้อาจจะส่งทำให้เกิดเสียงดังและมีฝุ่นละอองที่จะรบกวนอาคารข้างเคียง จึงควรเตรียมการป้องกันไว้ด้วย

8.5.4.1 การซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต

8.5.4.1.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตอันเนื่องมาจากสนิมในเหล็กเสริม

ระบบ FRP ไม่ควรที่จะนำไปใช้กับคอนกรีตที่มีปัญหาเกี่ยวกับสนิมในเหล็กเสริม เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของคอนกรีตในขณะที่เกิดสนิมไม่สามารถที่จะคำนวณออกมาได้ ดังนั้นควรจะต้องมีการแก้ไขปัญหาของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตอันเนื่องมาจากเหล็กเสริมในสนิมก่อน จึงจะทำการลงมือติดตั้งระบบ FRP ได้

8.5.4.1.2 ปัญหารอยแตกร้าวในคอนกรีต

บริษัทผู้ผลิต FRP บางบริษัทได้มีการพูดถึงปัญหาในรอยแตกร้าวของคอนกรีตว่า ถ้ามีรอยแตกขนาดใหญ่กว่า 0.3 mm. ประสิทธิภาพของระบบ FRP จะลดลงได้เพราะรอยแตกร้าวอาจจะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างพื้นผิวคอนกรีตกับระบบ FRP หรืออาจจะทำให้เกิดการวิบัติในไฟเบอร์ (ไฟเบอร์ฉีกขาด) ดังนั้นถ้าเกิดมีการพบรอยแตกร้าวในคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่เกิดกว่า 0.3 mm. ควรจะต้องมีการฉีด epoxy เข้าไปอุดรอยแตกร้าวดังกล่าว ถ้าเกิดเป็นรอยแตกร้าวที่มีขาดเล็กกว่า 0.3 mm. แต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ค่อยดี อาจจะต้องใช้การฉีดเรซินแทนเพื่อที่จะป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

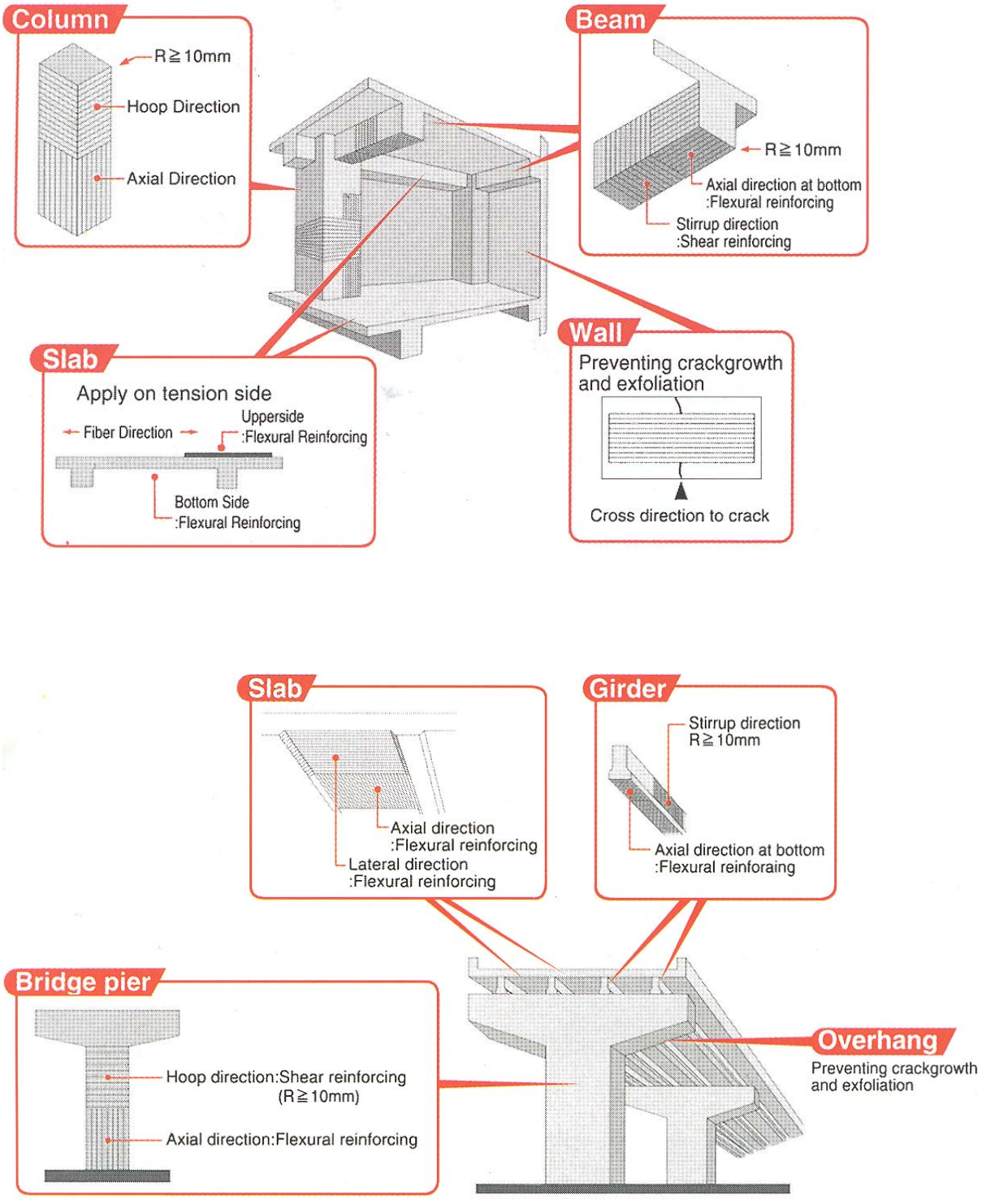
8.5.4.2 การเตรียมพื้นผิวงาน

ข้อกำหนดในการเตรียมพื้นผิวงานจะมีความแตกต่างไปตามการใช้งานของระบบ FRP ซึ่งแบ่งได้เป็นการใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญมากกับการใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญน้อย
การใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญมากได้แก่ การเสริมกำลังของโครงสร้างในการรับแรงดัดและแรงเฉือน ส่วนการใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญน้อย ได้แก่ การใช้วัสดุ FRP พันรอบเสาเพื่อเพิ่มการจำกัดเขต (Confinement) ของเสา

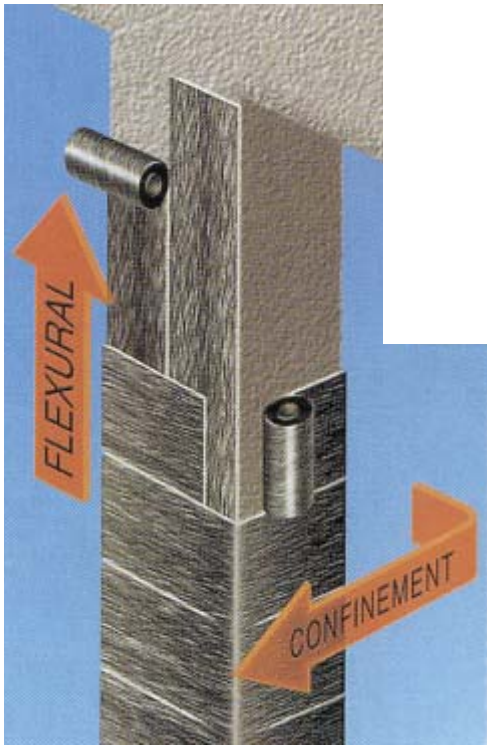
8.5.4.2.1 การใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญมาก (Bond – critical Application)

พื้นผิวของคอนกรีตที่จะมีการติดตั้งระบบ FRP จะต้องมีความสะอาดปราศจากซึ่งคอนกรีตที่มีการหลุดร่อน ถ้ามีวัตถุใดๆบนพื้นผิวคอนกรีต หรือมีส่วนของพื้นคอนกรีตที่เป็นส่วนเว้า จะต้องมีการกำจัดสิ่งต่างๆเหล่านี้ออกไป ในส่วนพื้นผิวที่เป็นส่วนเว้าหรือที่เป็นร่องอาจจะต้องมีการดูแลเป็นพิเศษกว่าพื้นผิวทั่วๆไปเพื่อจะได้มั่นใจได้ว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างระบบ FRP กับบริเวณดังกล่าวมีมากพอๆกันกับบริเวณอื่นๆ การเตรียมพื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธีเพื่อที่จะกำจัดฝุ่น คราบน้ำมัน และสิ่งสกปรกอื่นๆออกไปจากพื้นผิว ร่องหรือรูต่างๆบนพื้นผิวคอนกรีตต้องมีการซ่อมแซมให้เรียบร้อยก่อนการติดตั้งระบบ FRP ซึ่งอาจจะใช้ epoxy putty ในการอุดรอยร่องต่างๆ ที่สำคัญมากๆ คือพื้นผิวงานจะต้องแห้งสนิทก่อนการติดตั้งระบบ FRP

8.5.4.2.2การใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญน้อย (Contact – critical Application)
สิ่งสำคัญสำหรับการใช้งานแบบนี้ก็คือจะต้องมีความต่อเนื่องของพื้นผิวระหว่างพื้นผิวคอนกรีตกับระบบ FRP พื้นผิวที่จะมีการพันรอบด้วยวัสดุ FRP ควรที่จะเป็นพื้นราบหรือมีการโค้งนูน ถ้าเกิดมีรูหรือช่องว่างใหญ่ๆในพื้นผิวงานก็ควรที่จะมีการซ่อมแซมก่อนที่จะมีการติดตั้งระบบ FRP



รูปที่ 8-2 *ลักษณะการติดตั้งระบบ FRP เพื่อเสริมกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนในโครงสร้างต่างๆ*



ก (ลักษณะการติดตั้ง Carbon fiber sheet เพื่อการเสริมกำลังรับแรงดัด (Flexural strengthening) และเพิ่มการจำกัดเขต (Confinement) ให้กับเสา



ข (การพัน Carbon fiber sheet โดยใช้คน



ค (การพัน Carbon fiber sheet โดยใช้เครื่องจักร

รูปที่ 8-2 การเพิ่มการจำกัดเขต (Confinement) ให้กับเสาโดยการใช้ Carbon fiber sheet

8.5.5 การเตรียมน้ำยาเรซิน

การผสมเรซินควรทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต สารเรซินต่างๆ ที่นำมาใช้ควรมีการผสมที่อุณหภูมิและสัดส่วนที่ถูกต้อง จนกระทั่งได้ส่วนผสมที่มีความสม่ำเสมอสมบูรณ์ สารเรซินปกติแล้วจะมีสีที่แตกต่างกัน ดังนั้นการผสมที่สมบูรณ์จะสังเกตได้จากการที่ความแตกต่างของสีดังกล่าวหายไปกลายเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการผสม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมอาจจะใช้เครื่องผสมที่ทำงานด้วยไฟฟ้า หรือผสมด้วยมือ การผสมเรซินไม่ควรที่จะผสมมากเกินไปจนกระทั่งใช้ไม่หมดในช่วงอายุของส่วนผสมที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด เรซินที่ผสมแล้วซึ่งมีอายุเกินกว่าที่กำหนดไม่ควรนำมาใช้ เนื่องจากจะมีความหนืดมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถของ เรซินในการที่จะเข้าไปผสมกับไฟเบอร์ได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจะส่งผลให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์ที่ไม่ดี ทำให้ระบบ FRP มีประสิทธิภาพลดลง





ก. การผสมเรซิน 2ชนิดเข้าด้วยกัน



ข ความแตกต่างของสีเรซินที่นำมาผสม



ค การคนให้เรซินเป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 8-3 *การเตรียมน้ำยาเรซิน*

8.5.6 การใช้วัสดุ

8.5.6.1 Primer และ Putty

Primer จะเป็นน้ำยาที่ใช้ทาไปบนพื้นผิวคอนกรีตซึ่งระบบ FRP จะถูกติดตั้ง หลังจากที่ทา Primer แล้วจะต้องมีการป้องกันพื้นผิวของ Primer จากฝุ่น ความชื้นและความสกปรกซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ระหว่างรอการติดตั้งระบบ FRP Putty ควรที่จะมีการใช้ที่ความหนาที่เหมาะสม หลังจากที่มีการทา Primer แล้ว Putty จะใช้เพื่อที่จะอุดร่องหรือรูต่างๆ ทำให้พื้นผิวคอนกรีตมีความเรียบและต่อเนื่องหลังจากมีการทาพื้นผิวคอนกรีตด้วย Putty และ Primer ควรจะได้รับการทิ้งไว้ชักระยะหนึ่งตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดก่อนที่มีการติดตั้งระบบ FRP ต่อไป



)ก (Carbon fiber sheet



)ข (แผ่น FRP

รูปที่ 8-4 *ลักษณะของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการเสริมกำลัง*

8.5.6.2 ระบบแข็งตัวในที่

ปกติแล้วระบบแข็งตัวในที่จะได้รับการติดตั้งโดยใช้ Fiber sheet ผสมกับเรซินแล้วทิ้งไว้จน เรซินแข็งตัวที่หน้างาน เรซินจะถูกทาไปบนพื้นผิวที่จะมีการติดตั้งระบบ FRP หลังจากนั้นจึงจะนำ Fiber sheet มาติดตั้งลงไปบนเรซิน โดยให้ Fiber sheet จมตัวลงไปในเรซินทั้งหมด ซึ่งอาจจะใช้เครื่องมือช่วยในการวาง Fiber sheet ลงไปในเรซินเพื่อความสม่ำเสมอของการติดตั้ง ฟองอากาศที่มีอยู่หรือที่เกิดขึ้นระหว่างการติดตั้งจะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่เรซินจะแข็งตัว ปริมาณเรซินที่ใช้ควรมีจำนวนมากพอและเหมาะสมกับปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้

ถ้ามีการติดตั้ง Fiber sheet มากกว่าหนึ่งชั้นควรทำการทาเรซินและติดตั้ง Fiber sheet ชั้นถัดไปก่อนที่ชั้นที่อยู่ด้านในจะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการเสริมกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น ถ้าเกิดชั้นที่อยู่ด้านในเกิดการแข็งตัวไปแล้วอาจจะต้องหาวิธีการอื่นในการเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น เช่น ใช้สารละลายบางตัวที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำทาลงไประหว่างพื้นผิวเดิมที่แข็งตัวแล้ว กับพื้นผิวที่จะติดตั้ง Fiber sheet เพิ่ม

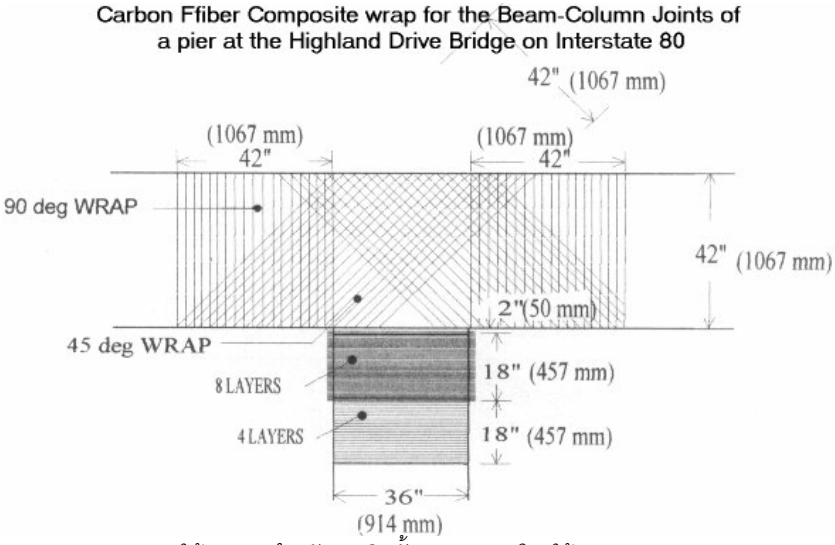


ก. การเตรียม Fiber sheet ให้มีขนาดตามที่ต้องการ

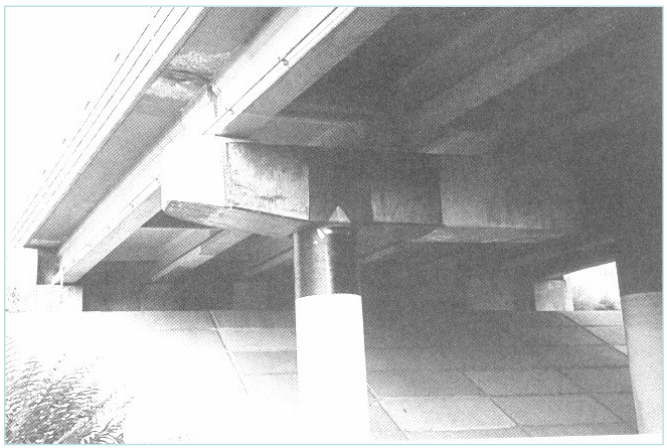


ข. การทา Primer ลงบนพื้นผิวงาน

รูปที่ 8-5 ขั้นตอนการติดตั้งระบบ FRP โดยใช้ Fiber sheet สำหรับระบบแข็งตัวในที่



ก. การให้ Detail สำหรับการติดตั้งระบบ FRP โดยใช้ Carbon fiber sheet



ข. ระบบ FRP ที่ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์

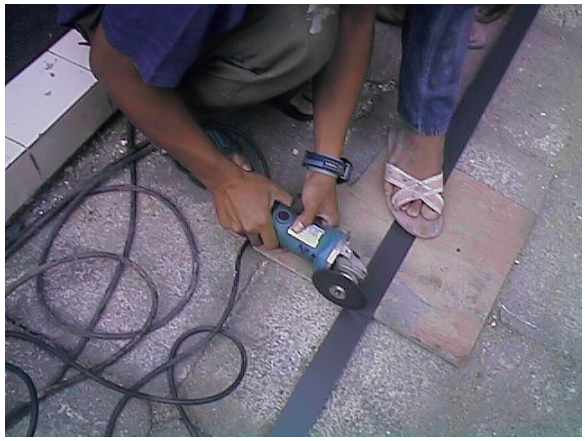
รูปที่ 8-6 ตัวอย่างการติดตั้งระบบ FRP โดยใช้ Carbon fiber sheet

8.5.6.3ระบบแผ่นสำเร็จ

ในระบบนี้ไฟเบอร์และเรซินจะได้รับการผสมกันมาและแข็งตัวในโรงงานผู้ผลิตจนได้เป็นแผ่น FRP ที่ออกมาในรูปต่างๆ การติดตั้งระบบนี้ จะใช้สารยึดเหนี่ยวทาไปบนพื้นผิวของคอนกรีตและบนแผ่น FRP จากนั้นจึงทำการวางแผ่น FRP ลงไปบนสารยึดเหนี่ยว และทำการไล่ฟองอากาศออกให้หมด ความสะดวกของระบบนี้คือไม่ต้องทำการผสมเรซินที่หน้างาน



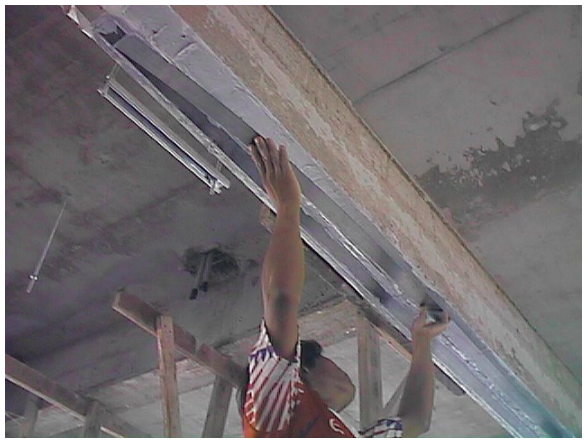

ก. การเตรียมพื้นผิวงาน

ข. การเตรียมแผ่น FRP ให้มีขนาดความยาวตามที่ต้องการ




ค. การทากาวหรือสารยึดเหนี่ยวบนแผ่น FRP

ง. การติดตั้งแผ่น FRP




จ. การรีดไล่ฟองอากาศออกหลังจากการติดตั้งแผ่น FRP





ฉ. การทำความสะอาดผิวงานหลังจากการติดตั้งแผ่น FRP

รูปที่ 8-7 ขั้นตอนการติดตั้งระบบ FRP โดยใช้แผ่น FRP

8.5.7 การใช้งานวัสดุ FRP แบบหลายชั้น (Multiple Plie) และ การทับซ้อนของวัสดุ FRP

สำหรับโครงสร้างที่มีช่วงยาวมากๆการ อาจจะต้องมีการต่อ Fiber sheet หรือแผ่น FRP โดยการต่อแบบทับซ้อนเพื่อที่จะทำให้มีการถ่ายแรงอย่างต่อเนื่อง โดยที่การวางซ้อนจะต้องมีระยะทับซ้อนที่พอเพียงตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

8.5.8 การแข็งตัวของเรซิน

การแข็งตัวของเรซินจะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ การแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ของเรซินอาจจะใช้เวลาเป็นหลายวัน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างที่เรซินการแข็งตัว อาจจะส่งผลทำให้เกิดการชะลอการแข็งตัวหรือเร่งการแข็งตัวของเรซินได้ ดังนั้นผู้ผลิตระบบ FRP อาจจะมีเกรดของระบบ FRP หลายๆเกรดเอาไว้ให้ผู้ออกแบบเลือกใช้ตามสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิที่บริเวณหน้างาน
โดยปกติแล้วเรซินจะแข็งตัวเร็วขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นการที่จะทำให้เรซินแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ในเวลาที่ต้องการจึงต้องมีการทำการสอบในเรื่องของการแข็งตัวของเรซิน ที่อุณหภูมิต่างๆ ว่าใช้เวลานานเท่าใด หรือให้ใช้อุณหภูมิตามผลการทดสอบของบริษัทผู้ผลิต

8.5.9 การป้องกันชั่วคราว

ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ มีฝนตก ฝุ่นละออง แดดจัด หรือความชื้นสูง อาจมีผลทำให้เกิดความเสียหายกับระบบ FRP ระหว่างที่มีการติดตั้ง และมีผลทำให้เกิดมีปัญหากับเรซินในช่วงระหว่างที่มีการแข็งตัว ดังนั้นควรมีการป้องกันโดยใช้พลาสติกคลุมระหว่างการติดตั้งจนกว่าเรซินจะแข็งตัว

8.6 การตรวจสอบ การประเมินงาน และการรับงาน

การควบคุมคุณภาพจะต้องมีการทำโดยบริษัทผู้รับเหมาติดตั้ง บริษัทผู้ผลิต และผู้ที่เกี่ยวข้อง ระดับของการควบคุมคุณภาพ ขอบเขตของการทดสอบ การตรวจสอบและการลงบันทึกข้อมูลต่างๆจะขึ้นอยู่กับขนาดและความซับซ้อนของงาน

การรับประกันคุณภาพของงานจะต้องมีการตรวจสอบและการทดสอบ พร้อมทั้งทำการบันทึกผลของการตรวจสอบและการทดสอบเอาไว้เป็นข้อมูลในรายงานที่มีการตรวจรับงานหลังการติดตั้งระบบ FRP เสร็จสิ้น นอกจากนี้ควรมีการเขียนแผนงานของการรับประกันคุณภาพงานสำหรับการติดตั้งระบบ FRP โดยที่ในแผนงานควรจะต้องระบุถึงการป้องกันอุบัติภัยในการทำงาน การตรวจสอบระบบ FRP ที่ตั้งและวิธีการวางทับซ้อนของระบบ FRP วิธีการในการทำผิวงานให้แห้ง วิธีการในการทำให้เรซินแข็งตัว การทำความสะอาด รวมทั้งการเตรียมตัวอย่างของชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบคุณภาพ

8.6.1 การตรวจสอบ

การตรวจสอบจะดำเนินการโดยวิศวกรผู้มีใบประกอบวิชาชีพ หรือผู้ตรวจสอบที่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานที่ดูแลมาตรฐานงานระบบ FRP ผู้ตรวจสอบจะต้องเป็นผู้ที่มีความรู้เป็นอย่างดีในระบบ FRP และมีประสบการณ์เกี่ยวกับงานติดตั้งระบบ FRP หรือเคยผ่านการฝึกงานในการติดตั้งระบบ FRP
การจดบันทึกข้อมูลต่างๆ ระหว่างที่มีการติดตั้งระบบ FRP ในแต่ละวันควรดำเนินการจดบันทึกรายการต่อไปนี้

- วันและเวลาที่ทำการติดตั้ง
- อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และสภาพอากาศโดยทั่วไป
- อุณหภูมิของพื้นผิวคอนกรีต
- ความแห้งของพื้นผิว (ACI 503.4)
- วิธีการเตรียมพื้นผิวงาน

- ความสะอาดของพื้นผิวงาน
- วิธีการให้ความร้อนกับพื้นผิวงาน (ถ้ามี)
- ความกว้างของรอยแตกร้าวในคอนกรีต
- หมายเลขกำกับภาชนะหรือกล่องที่บรรจุ Fiber sheet หรือแผ่น FRP จาก บริษัทผู้ผลิตกับตำแหน่งที่นำ Fiber sheet หรือแผ่น FRP ไปติดตั้ง
- ปริมาณ Fiber sheet หรือแผ่น FRP ที่ใช้ อัตราส่วนผสมของเรซิน เวลาในการผสม การใช้ Primer และ Putty และสารยึดเหนี่ยวในแต่ละวัน
- การแข็งตัวของเรซิน
- ผลการทดสอบ Pull – off test กำลังของการยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิว ลักษณะการวิบัติจากการทดสอบ และตำแหน่งที่ทำการทดสอบ
- คุณสมบัติของระบบ FRP จากการทดสอบตัวอย่างภาคสนาม
- ตำแหน่งและขนาดของฟองอากาศ การหลุดร่อนหรือการแยกตัวของระบบ FRP จากคอนกรีต
- ความคืบหน้าของงานโดยทั่วไป

8.6.2 การประเมินและการรับงาน

การทดสอบ Pull – off test จะใช้เพื่อการประเมินกำลังของระบบ FRP และการทดสอบโดยวางน้ำหนักจริงลงบนโครงสร้างจะใช้เพื่อทดสอบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างหลังจากติดตั้งระบบ FRP



รูปที่ 8.8 *การทดสอบ Pull-off Test*



รูปที่ 8-8 การทดสอบ Pull-off Test(ต่อ)

8.6.2.1 วัสดุที่ใช้

ก่อนที่จะเริ่มการทำงานบริษัทผู้ผลิตควรจะแจ้งหรือรายงานถึงคุณสมบัติของวัสดุในระบบ FRP ที่จะใช้ ถ้ามีข้อมูลบางอย่างที่ไม่สมบูรณ์ให้ดำเนินการทดสอบวัสดุเพิ่มเติม ข้อมูลของวัสดุในระบบ FRP ควรจะมีข้อมูลของกำลังรับแรงดึง ผลการวิเคราะห์ของ Infrared Spectrum และอุณหภูมิ T_g ของวัสดุ FRP อายุของส่วนผสม และกำลังรับแรงเฉือนของสารยึดเหนี่ยว

การทดสอบเพื่อหาค่าต่างๆเหล่านี้โดยปกติแล้วจะใช้วัสดุตัวอย่างที่ส่งไปยังห้องปฏิบัติการตามแผนการทดสอบเพื่อการควบคุมคุณภาพ การทดสอบอายุของเรซินที่มีการผสมแล้วและความแข็งของเรซินที่กำลังแข็งตัวจะทำการทดสอบภาคสนาม วัสดุใดๆที่ไม่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดไว้โดยวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องไม่นำมาใช้

Witness Panel จะใช้ในการประเมินหาค่ากำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัส กำลังของส่วนที่มีการทับซ้อน ความแข็ง และอุณหภูมิ T_g ของระบบ FRP ที่แข็งตัวในที่ระหว่างการติดตั้งระบบ FRP ผู้ควบคุมงานสามารถเตรียม Panel ไว้จากขนาดและความหนาที่กำหนดไว้ล่วงหน้าจากบริเวณหน้างาน หลังจากที่มีการแข็งตัวจึงทำการส่งตัว Panelไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

8.6.6.2การวางตัวของไฟเบอร์

ควรทำการประเมิน Fiber sheet หรือแผ่น FRP ด้วยสายตาถึงการเอียงตัวหรือความคด Fiber sheet หรือแผ่น FRP ที่มีการวางตัวผิดไป 5 องศาจากที่ระบุไว้ในแบบ (80 mm/m) จะต้องมีการรายงานให้วิศวกรผู้ควบคุมงานทราบสำหรับการประเมินและตรวจรับงาน

8.6.6.3 การแยกตัวของวัสดุ FRP

ควรทำการประเมินระบบ FRP ที่แข็งตัวเพื่อตรวจสอบว่าเกิดการแยกตัวหรือมีช่องว่างระหว่างชั้นต่างๆของวัสดุ FRP หรือระหว่างระบบ FRP กันพื้นผิวคอนกรีตหรือไม่ วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบควรที่จะมีศักยภาพในการที่จะตรวจสอบการแยกตัวที่มีขนาดใหญ่กว่า 1300 mm^2 วิธีการเหล่านี้ ได้แก่ การใช้คลื่นเสียง (Acoustic Sounding) การใช้คลื่นอุลตร้าโซนิค (Vltrasonic) และการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือที่สามารถแสดงผลความแตกต่างของอุณหภูมิ(Thermography)

สำหรับระบบแข็งตัวในที่ การแยกตัวที่ยอมรับได้มีดังต่อไปนี้

- การแยกตัวขนาดเล็กที่มีขนาดน้อยกว่า 1300 mm^2 ในแต่ละจุด ถือว่ายอมรับได้ตราบเท่าที่พื้นที่ของการแยกตัวไม่เกิน 5 % ของพื้นที่ทั้งหมด และใน 1 m^2 มีจุดของการแยกตัว ไม่เกิน 10 จุด
- การแยกตัวขนาดใหญ่ที่มีขนาดมากกว่า 16000 mm^2 ในแต่ละจุด ควรที่จะมีการซ่อมแซมจุดดังกล่าว โดยการตัดส่วนที่มีการแยกตัวออกไปและทำการวางแผ่นใหม่ทับซ้อนลงไป ณ บริเวณดังกล่าว
- การแยกตัวขนาดกลาง ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 1300 -16000 mm^2 อาจจะทำการซ่อมแซมได้โดยการฉีดเรซินเข้าไปในบริเวณช่องว่างที่เกิดขึ้น

สำหรับการแยกตัวในระบบที่ใช้แผ่น FRP จะต้องมีการประเมินและซ่อมแซมตามที่วิศวกรผู้ควบคุมงานกำหนด หลังจากการซ่อมแซมแล้วควรจะต้องมีการตรวจสอบอีกครั้งเพื่อที่ให้มั่นใจว่าการซ่อมแซมมีความสมบูรณ์

8.6.6.4เรซินที่แข็งตัวแล้ว

ระบบ FRP ที่แข็งตัวแล้วควรจะได้รับการประเมินคุณภาพโดนการทดสอบตัวอย่างเรซินหรือ Witness Panel ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM D 3418 นอกจากนี้ควรมีการตรวจสอบความหนาและความแข็งของเรซินที่แข็งตัวแล้ว ที่หน้างานด้วย ว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

8.6.6.5 กำลังของการยึดเหนี่ยว

สำหรับการใช้งานที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญจะต้องมีการทดสอบการยึดเหนี่ยวของตัวอย่างตามมาตรฐาน ACI 503R หรือ ASTM D 4541 กำลังของการยึดเหนี่ยวต่อแรงดึงควรจะมีค่ามากกว่า 1.4 MPa และจะต้องเกิดการวิบัติในคอนกรีต ถ้าพบว่ามีกำลังต่ำกว่าที่ระบุหรือเกิดการวิบัติในระบบ FRP ควรจะมีการรายงานให้วิศวกรผู้ควบคุมงานทราบเพื่อที่จะทำการประเมินและพิจารณาตรวจรับงานต่อไป

8.7 การดูแล และ ซ่อมแซม

ผู้เป็นเจ้าของงานควรทำการตรวจสอบและประเมินถึงประสิทธิภาพของระบบ FRP หลังจากที่มีการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วเป็นระยะๆ ถ้าเกิดตรวจพบความเสียหายหรือความบกพร่องในระหว่างที่ทำการตรวจสอบให้ทำการจดบันทึกและปรึกษาหารือกับวิศวกรถึงวิธีแก้ไขก่อนที่จะมีการดำเนินการใดๆ

8.7.1 การตรวจสอบและประเมิน

8.7.1.1 การตรวจสอบทั่วไป

การตรวจสอบด้วยสายตาสามารถทำให้ทราบถึงปัญหาการหลุดร่อนหรือการแยกตัวระหว่างระบบFRP กับพื้นผิวคอนกรีต รอยแตกร้าวในคอนกรีต การโก่งตัวของระบบ FRP รวมทั้งสัญญาณที่บ่งบอกถึงการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ส่วนการทดสอบโดยใช้คลื่นอุลตร้าโซนิค (ultrasonic) คลื่นเสียง (acoustic sounding) หรือคลื่นความร้อน (thermography) อาจจะช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบถึงการหลุดร่อนหรือการแยกตัวระหว่างระบบ FRP กับพื้นผิวคอนกรีตได้ดีขึ้น

8.7.1.2 การทดสอบ

การทดสอบสามารถที่จะใช้การทดสอบ Pull off tension test เพื่อตรวจสอบกำลังยึดเหนี่ยวของระบบ FRP หรือจะใช้การวางน้ำหนักบนโครงสร้างเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมโดยทั่วไปของโครงสร้างหลังการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP

8.7.1.3การประเมิน

ข้อมูลจากการตรวจสอบโดยทั่วไปและการทดสอบจะใช้ในการประเมินถึงความเสียหายและความแข็งแรงของโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังแล้ว ผลจากการประเมินสามารถนำไปสู่การวางแผนซ่อมแซมความเสียหายหรือจุดบกพร่องใดๆที่เกิดขึ้นหลังการเสริมกำลัง

8.7.2 การซ่อมแซมระบบเสริมกำลัง

วิธีการซ่อมแซมโครงสร้างที่เสริมกำลังแล้วจะขึ้นอยู่กับลักษณะความเสียหาย ชนิดของวัสดุ ลักษณะของการเสื่อมกำลัง และระดับของความเสียหาย การซ่อมแซมระบบ FRP จะต้องมีการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความเสียหายก่อนจึงจะดำเนินการซ่อมแซมต่อไปได้

ถ้าความเสียหายมีขนาดเล็ก ใช้การซ่อมแซมสามารถกระทำได้โดยการใช้วัสดุ FRP ซ่อมแซมบริเวณที่เกิดความเสียหายดังกล่าว โดยใช้วัสดุ FRP ที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับระบบ FRP การแยกตัวระหว่างระบบ FRP กับพื้นผิวคอนกรีตเพียงเล็กน้อยสามารถที่จะทำการซ่อมแซมได้โดยการฉีด epoxy resin เข้าไปในบริเวณดังกล่าว ความเสียหายในบริเวณที่กว้าง เช่น การหลุดร่อนของระบบ FRP จากพื้นผิวคอนกรีตที่กินบริเวณกว้าง อาจจะต้องมีการรื้อระบบ FRP จากบริเวณนั้น แล้วทำการปรับสภาพพื้นผิวคอนกรีตใหม่ แล้วจึงติดตั้งวัสดุ FRP ลงไปแทนของเก่า

8.8 ข้อพิจารณาทั่วไปในการออกแบบ

ข้อแนะนำในการออกแบบพัฒนามาจากหลักการในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปที่มีอยู่ใน ACI 318-99 และความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP การเสริมกำลังด้วยระบบ FRP ควรที่จะมีการออกแบบต้านแรงดึงโดยที่ยังรักษาความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัวระหว่างวัสดุ FRP และคอนกรีต ส่วนกำลังรับแรงอัดของระบบ FRP จะไม่นำมาใช้พิจารณาในการออกแบบ

8.8.1 ปรัชญาในการออกแบบ

ข้อแนะนำในการออกแบบนี้ได้พิจารณามาจากหลักการของการออกแบบโดยการจำกัดสภาวะของวัสดุหรือโครงสร้าง (limit state design principles) ที่สภาวะใช้งาน (Serviceability limit state) และที่สภาวะกำลังสูงสุดของโครงสร้าง (Ultimate limit state) ซึ่งจะมีการตั้งระดับความปลอดภัยที่สภาวะใช้งาน เช่น ระบบการโก่งตัวของโครงสร้าง ขนาดของการแตกร้าวในคอนกรีต และที่สภาวะกำลังสูงสุด เช่น กำลังสูงสุดจากการวิบัติเนื่องจากความล้า การเฉือนขาด ในการคำนวณหากำลังของชิ้นส่วนในโครงสร้างต้องมีการตรวจสอบลักษณะการวิบัติแบบต่างๆที่เป็นไปได้ รวมทั้งค่าตรวจสอบของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงในวัสดุแต่ละชนิดอาจจะใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของโครงสร้างสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างในสภาวะการใช้งาน (Serviceability) เช่น อัตราส่วนของค่าโมดูลัสและการแปลงหน้าตัด (Transformed Section) ในการคำนวณดังกล่าวได้

ระบบการเสริมกำลังโดย FRP ควรจะออกแบบตาม ACI 318-99 สำหรับการคำนวณหากำลังของโครงสร้างและสภาวะของโครงสร้างในการใช้งาน (Serviceability) โดยการใช้ตัวคูณเพิ่มสำหรับแรงกระทำ และใช้ตัวคูณลดค่าสำหรับกำลังของโครงสร้างตามที่ระบุไว้ใน ACI 318-99 ตัวคูณลดค่าที่นอกเหนือจากที่ระบุใน ACI 318-99 ที่จะใช้กับระบบการเสริมกำลังโดย FRP ให้ใช้ตามที่ระบุในคู่มือนี้ การที่จะต้องใช้ตัวคูณลดค่าเพิ่มเติมสำหรับระบบ FRP เป็นเพราะระบบ FRP ยังมีข้อมูลไม่พอเพียง วิศวกรผู้ออกแบบอาจจะเลือกใช้ค่าของตัวคูณลดค่าที่ต่ำลงกว่าที่ได้ระบุไว้ในเอกสารในกรณีที่เกิดความไม่มั่นใจเกี่ยวกับกำลังของวัสดุ FRP หรือกำลังของพื้นผิวคอนกรีต

8.8.2 ข้อจำกัดในการเสริมกำลัง

มีวิศวกรผู้ออกแบบและบริษัทผู้ผลิตระบบ FRP จำนวนหนึ่งได้เสนอหลักการในการออกแบบการเสริมกำลังว่า โครงสร้างก่อนที่จะมีการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP จะต้องมีกำลังเพียงพอที่จะรับน้ำหนักที่มากระทำได้ในระดับหนึ่ง นั่นหมายความว่าถ้าระบบ FRP เกิดความเสียหายขึ้น โครงสร้างจะต้องยังสามารถที่จะรับน้ำหนักที่มากระทำในระดับดังกล่าวโดยไม่พังลงมาคู่มือของ ACI 440.2R-02 ได้เสนอให้ใช้สมการต่อไปนี้สำหรับการคำนวณค่าน้ำหนักดังกล่าว

$$\left(\phi R_n\right)_{existing} \geq \left(1.2S_{DL} + 0.85S_{LL}\right)_{new} \qquad (8.1)$$

8.8.2.1 ความทนไฟของโครงสร้าง

โพลิเมอร์เรซินที่ใช้ในระบบ FRP จะเสื่อมกำลังเมื่ออุณหภูมิมีค่าเกินกว่า อุณหภูมิ T_g ของโพลิเมอร์ ซึ่งอุณหภูมิ T_g นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะแตกต่างกันไปในโพลิเมอร์แต่ละตัว อุณหภูมิ T_g ของของเรซิ่นและสารยึด

เหนี่ยวโดยปกติจะอยู่ระหว่าง 60-82 C ดังนั้นระบบ FRP จึงไม่สามารถทนความร้อนสูงๆ เนื่องจากไฟไหม้เป็นเวลานานๆ

แม้ว่าระบบ FRP จะไม่ค่อยมีความคงทนต่อไฟไหม้ แต่เมื่อได้รับการติดตั้งบนพื้นผิวของคอนกรีตอาจจะเพิ่มความสามารถในการทนไฟได้บางส่วน ซึ่งเป็นผลมาจากความทนทานต่อไฟไหม้ของตัวคอนกรีตเอง แต่อย่างไรก็ตามจะต้องนึกอยู่เสมอว่าโครงสร้างคอนกรีตก็จะมีกำลังลดลงเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานานๆ เช่น การเกิดไฟไหม้เป็นเวลานานๆ อุณหภูมิที่สูงจะทำให้กำลังของเหล็กและคอนกรีตลดลงจึงทำให้กำลังของโครงสร้างลดลง ดังนั้นการออกแบบให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับน้ำหนักในขณะที่โครงสร้างมีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงให้ใช้การคำนวณจากสูตรข้างล่าง

$$\left(R_{n\theta}\right)_{existing} \geq S_{DL} + S_{LL} \tag{8.2}$$

เมื่อ $R_{n\theta}$ คือกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถทำการคำนวณได้จากข้อแนะนำใน ACI 216R ค่ากำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างนี้ควรมีการคำนวณสำหรับช่วงเวลาที่ต้องการให้โครงสร้างมีความทนไฟและจะต้องไม่นำกำลังของระบบ FRP มาใช้ในการคำนวณกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้าง

8.8.2.2 กำลังของโครงสร้างโดยรวม

ระบบ FRP สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อใช้เสริมกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนแต่อาจจะไม่ได้ช่วยในการป้องกันลักษณะการวิบัติแบบ Punching Shear ดังนั้นจึงต้องมั่นใจว่าทุกชิ้นส่วนในโครงสร้างจะต้องมีความสามารถที่จะรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่มีการเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนในโครงสร้างบางชิ้น

นอกจากนี้ควรทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบดูว่าชิ้นส่วนที่มีการเสริมกำลังโดยระบบ FRP จะไม่พังเนื่องจากแรงเฉือน แต่จะพังเนื่องจากแรงดัดในสภาวะที่โครงสร้างต้องรับน้ำหนักเกินไปจากที่ออกแบบไว้

8.8.3 การเลือกระบบ FRP

8.8.3.1 ข้อควรพิจารณาเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม

คุณสมบัติทางกล เช่นกำลังรับแรงดึง และโมดูลัสยืดหยุ่น ของระบบ FRP บางระบบจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะบางอย่างเช่น สภาวะความเป็นด่าง อยู่ใกล้น้ำเค็ม อยู่ใกล้สารเคมี สภาวะที่ได้รับรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet Light) สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง หรือความชื้นสูง ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบจะต้องมีการคำนึงถึงกำลังที่ลดลงอันเนื่องมาจากสภาวะเหล่านี้ วิศวกรควรที่จะเลือกระบบ FRP ให้เหมาะสมกับสภาวะต่างๆด้วย

8.8.3.2 ข้อควรพิจารณาในเรื่องของน้ำหนักที่มากระทำ

ข้อควรพิจารณาที่สำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมของระบบมีดังต่อไปนี้

- ความทนทานต่อ Impact Load: AFRP และ GFRP จะมีความทนทานต่อ Impact Load ได้ดีกว่า CFRP
- ความล้าและการคืบ: CFRP มีความทนทานต่อการคืบภายใต้แรงกระทำคงที่และความล้าภายใต้น้ำหนักกระทำที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาสูงกว่า AFRP และ GFRP

8.8.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

โดยปกติแล้วคุณสมบัติของวัสดุที่ระบุไว้โดยบริษัทผู้ผลิต เช่น จะเป็นคุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุที่ไม่ได้คำนึงถึงผลจากการใช้งานในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เป็นเวลานานๆ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงควรพิจารณาใช้คุณสมบัติของวัสดุที่ระบุไว้ให้เป็นคุณสมบัติเริ่มต้นและจะต้องมีการลดกำลังของวัสดุลงเนื่องมาจากการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันไปเป็นระยะเวลานานๆ
สมการ 8.3 ถึง 8.5 จะใช้สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงดึง โดยให้พิจารณาถึงตัวคูณลดค่าของสภาวะแวดล้อมที่มีอยู่ในตาราง 8.1 ในการคำนวณด้วยสำหรับชนิดของไฟเบอร์และสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานที่แตกต่างกัน

$$f_{fu} = C_E f^*_{fu} \tag{8.3}$$

ค่าของหน่วยการยืดหดตัว ณ ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติก็ให้ใช้ค่าที่ได้รับการปรับเนื่องจากสภาวะแวดล้อมเช่นเดียวกัน

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon^*_{fu} \tag{8.4}$$

เนื่องจากวัสดุ FRP มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ดังนั้นค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบจึงคำนวณตาม Hooke's Law โดยพิจารณาว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะไม่ได้รับอิทธิพลจากสภาวะแวดล้อม ดังนั้นจึงจะใช้ค่าเดียวกันกับที่ผู้ผลิตระบุเอาไว้

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \tag{8.5}$$

Exposure conditions	Fiber and resin type	Environmental-reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon/epoxy	0.95
	Glass/epoxy	0.75
	Aramid/epoxy	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon/epoxy	0.85
	Glass/epoxy	0.65
	Aramid/epoxy	0.75
Aggressive environment (chemical plants and waste water treatment plants)	Carbon/epoxy	0.85
	Glass/epoxy	0.50
	Aramid/epoxy	0.70

ตารางที่ 8.1 *ตัวคูณลดค่าสำหรับระบบ FRP เนื่องจากสภาวะแวดล้อม*

ตัวคูณลดค่าเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ให้ไว้ในตารางที่ 8.1 เป็นค่าที่ได้จากการประมาณการ ถ้ามีข้อมูลเพิ่มเติมจากงานวิจัยใหม่ๆ ค่าเหล่านี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ จากตารางที่ 8.1 จะเห็นว่าในการใช้งานของระบบ FRP ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ดีค่าของตัวคูณลดจะมีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ถ้าระบบ FRP ถูกนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ดีตัวคูณลดค่าก็จะมีค่าต่ำลงกว่า 1 มาก

8.9 การเสริมกำลังในการรับแรงดัด

8.9.1 ข้อพิจารณาทั่วไป

8.9.1.1สมมุติฐาน

ข้อสมมุติฐานต่อไปนี้จะใช้สำหรับการคำนวณหากำลังรับแรงดัดของหน้าตัดที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP

- การคำนวณออกแบบจะใช้ขนาดหน้าตัดและตำแหน่งของเหล็กเสริมจริง รวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างที่จะมีการเสริมกำลัง
- หน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมและคอนกรีตจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน นั่นก็คือระนาบของหน้าตัดก่อนและหลังจะมีน้ำหนักมากระทำจะรักษาความเป็นระนาบเอาไว้
- ไม่มีความแตกต่างของการยืดหดตัวระหว่างคอนกรีตและวัสดุ FRP
- การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนภายในชั้นของสารยึดเหนี่ยวจะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากชั้นดังกล่าวมีความบางมากๆ
- ค่าหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003
- กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าเท่ากับศูนย์
- วัสดุ FRP มีความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวที่เป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงจุดที่เกิดการวิบัติของวัสดุ FRP

ข้อสันนิษฐานเหล่านี้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อประโยชน์ในการคำนวณเท่านั้น ดังนั้นอาจจะไม่ได้สะท้อนถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของระบบ FRP ที่เสริมกำลังรับแรงดัด เช่น การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนในชั้นของสารยึดเหนี่ยวจะก่อให้เกิดการยืดหดตัวที่ไม่เท่ากันระหว่างวัสดุ FRP และคอนกรีต อย่างไรก็ตามสิ่งที่เกิดจะไม่มีผลต่อค่ากำลังที่คำนวณได้มากนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวคูณลดค่ากำลังซึ่งจะสามารถช่วยแก้ปัญหาตรงนี้ได้โดยทำให้กำลังที่คำนวณได้มีค่าต่ำลง

8.9.1.2กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด

เมื่อมีการเสริมกำลังรับแรงดัดให้กับโครงสร้างด้วยระบบ FRP โครงสร้างย่อมจะรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นควรตรวจสอบว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าแรงเฉือนมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดที่มีอยู่หรือไม่ ถ้าต้องการให้หน้าตัดมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มอาจจะทำได้โดยการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP โดยให้มีการเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดยการติดตั้งระบบ FRP ในแนวตั้ง

8.9.1.3ค่าหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีต

ก่อนการติดตั้งระบบ FRP การรับแรงของโครงสร้างจะมาจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองและอาจจะมาจากการอัดแรงด้วยลวดอัดแรง ดังนั้นค่าหน่วยการยืดหดตัวเนื่องจากน้ำหนักจากตัวโครงสร้างเองและผลของการอัดแรงจะต้องนำมาใช้เป็นค่าหน่วยการยืดหดตัวเริ่มต้น $\left(\varepsilon_{bi}\right)$ ค่าหน่วยการยืดหดตัวเริ่มต้นนี้สามารถที่จะคำนวณได้จาก

การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีอยู่ก่อนการเสริมกำลังแบบอีลาสติก โดยการใช้คุณสมบัติของหน้าตัดที่เป็น Cracked section

8.9.2กำลังดัดที่ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงกำลัง ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบให้กำลังรับแรงดัดของชิ้นส่วน ในโครงสร้างมีค่ามากว่าแรงดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักที่มากระทำ โดยสามารถอ้างอิงจาก ACI 318-99 ในคู่มือนี้ได้แนะนำให้ใช้ตัวคูณลดกำลังสำหรับระบบ FRP เท่ากับ 0.85 เพิ่มเติมไปจากตัวคูณลดค่าอื่นๆที่ระบุไว้ใน ACI 318-99

$$\phi M_n \geq M_u \tag{8.6}$$

การคำนวณหากำลังของโครงสร้างคอนกรีตหลังจากมีการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP สามารถคำนวณโดยใช้ ความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว สมดุลของแรงภายใน และการควบคุมลักษณะการวิบัติ

8.9.2.1 ลักษณะการวิบัติ

กำลังรับแรงดัดของโครงสร้างขึ้นอยู่กับลักษณะการวิบัติของหน้าตัด ดังนั้นลักษณะการวิบัติดังต่อไปนี้ จะต้องมีการพิจารณาถึงในการออกแบบ

- การวิบัติของคอนกรีต (Crushing of concrete)
- การครากของเหล็กที่รับแรงดึง (Yielding of the steel) แล้วตามด้วยการวิบัติของ วัสดุ FRP
- การครากของเหล็กที่รับแรงดึง (Yielding of the steel) แล้วตามด้วยการวิบัติของคอนกรีต
- การหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากแรงดึงหรือแรงเฉือน
- การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ FRP กับพื้นผิวคอนกรีต

การวิบัติของคอนกรีตจะถูกสมมุติให้เกิดขึ้นเมื่อหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าเท่ากับ 0.003 การวิบัติของวัสดุ FRP จะเกิดขึ้นเมื่อค่าหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุ FRP มีค่าเท่ากับค่าหน่วยการยืดหดตัว ที่สมมติให้เกิดการวิบัติในวัสดุ FRP ก่อนที่จะเกิดการวิบัติในวัสดุ FRPก่อนที่จะเกิดการวิบัติของคอนกรีตหรือก่อนที่คอนกรีตจะมีค่าหน่วยการหดตัวเท่ากับ 0.003

การหลุดร่อนของคอนกรีต หรือการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของระบบ FRP จะเกิดขึ้นถ้าเกิดแรงใน FRP มีค่ามากกว่ากำลังที่พื้นผิวคอนกรีตจะรับได้ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ FRP จำเป็นจะต้องมีการจำกัดระดับของค่าหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุ FRP ตามสมการ (8.7)

$$\kappa_m = \begin{cases} \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1-\dfrac{nE_f t_f}{360,000}\right) \leq 0.90 \text{ for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1-\dfrac{90,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 \text{ for } nE_f t_f \leq 180,000 \end{cases} \tag{8.7}$$

ค่าของ κ_m ในสมการ 8.7 คือตัวคูณที่มีค่ามากสุดได้ไม่เกิน 0.9 ซึ่งจะใช้มีการคูณกับค่าหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดการวิบัติของวัสดุ FRP ผลคูณที่ได้จะใช้เป็นขีดจำกัดสำหรับหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุ FRP ที่จะใช้ป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว

ค่าของ n คือจำนวนของชั้นของวัสดุ FRP ที่ใช้เสริมกำลัง ณ ตำแหน่งที่มีการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดของหน้าตัด การใช้ค่า n ในสมการนี้ เป็นการสะท้อนให้เห็นว่าถ้าค่า Stiffness ของตัววัสดุ FRP ยิ่งมีค่ามากก็จะยิ่งมีโอกาสเกิดปัญหาของการหลุดร่อนจากคอนกรีตได้ง่าย

ค่า κ_m เป็นค่าที่ถูกกำหนดขึ้นจากประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบมากกว่าที่จะมาจากข้อมูลของการวิจัยดั้งนั้นในอนาคตค่านี้อาจเปลี่ยนไปได้เมื่อมีผลงานวิจัยมากขึ้น

8.9.2.2 ระดับของหน่วยการยืดหดตัวในระบบ FRP

การคำนวณหาค่าหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุ FRP ที่สภาวะกำลังสูงสุด (ultimate limit state) มีความสำคัญมาก ค่าของหน่วยการยืดหดตัวจะช่วยบ่งบอกถึงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ค่าหน่วยการยืดหดตัวสูงสุดหรือค่าหน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการออกแบบ จะได้จากค่าหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุ FRP ในขณะที่คอนกรีตเกิดการวิบัติ หรือค่าหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุในขณะทีเกิดการวิบัติในวัสดุ FRP หรือ หน่วยการยืดหดตัวของวัสดุ FRP ในขณะที่วัสดุ FRP สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวจากคอนกรีต ค่าหน่วยการยืดหดตัวสูงสุดหรือหน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลในวัสดุ FRP ที่สภาวะกำลังสูงสุด(ultimate limit state) สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \le \kappa_m \varepsilon_{fu} \tag{8.8}$$

เมื่อ ε_{bi} คือค่าหน่วยการยืดหดตัวเริ่มต้นของคอนกรีต

8.9.2.3ค่าหน่วยแรงในวัสดุ FRP

ระดับของหน่วยแรงประสิทธิผลในวัสดุ FRP คือค่าหน่วยแรงสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุ FRP ก่อนการวิบัติเนื่องจากการรับแรงดัดของหน้าตัดโดยที่สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \tag{8.9}$$

8.9.3ความเหนียว

โดยปกติแล้วการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุ FRP ในการรับแรงดัดจะลดความเหนียวของชิ้นส่วนโครงสร้างเดิม ในบางกรณีการสูญเสียความเหนียวมีค่าน้อยมาก ในกรณีที่หน้าตัดสูญเสียความเหนียวไปมาก จะต้องมีการพิจารณาให้ดีในการออกแบบเพื่อที่จะรักษาให้หน้าตัดมีค่าความเหนียวให้พอเพียงดังนั้นจะต้องตรวจสอบค่าหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมที่สภาวะกำลังสูงสุด (ultimate limit state) การที่หน้าตัดจะมีความเหนียวพอเพียงนั้นค่าหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริม ณ จุดที่คอนกรีตหรือวัสดุ FRP เกิดการวิบัติ หรือเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตหรือ เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับวัสดุ FRP จะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 0.005 ตามการนิยามของ ACI 318-99 เกี่ยวกับหน้าตัดที่เป็น tension – controlled section

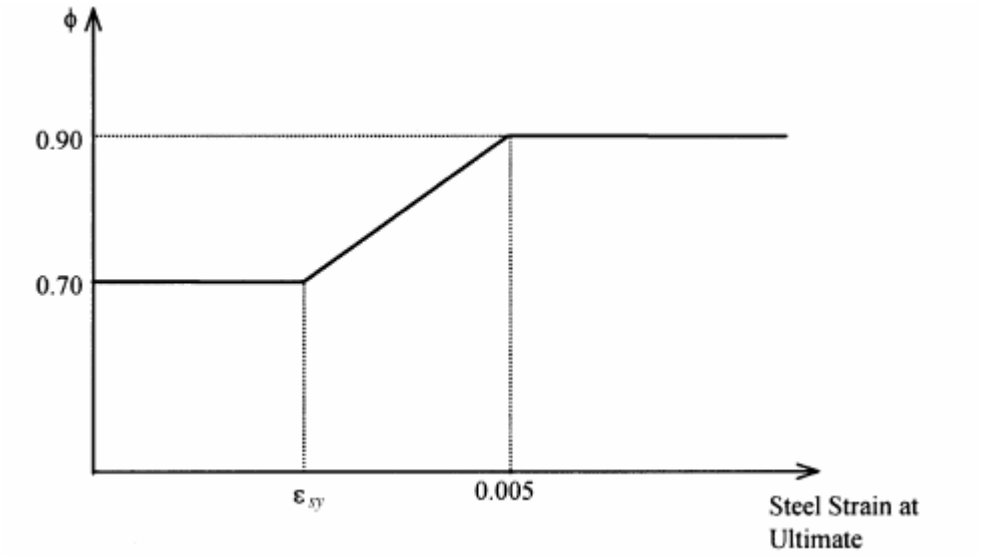
วิธีการที่ใช้ในคู่มือนี้จะใช้หลักการจาก ACI 318-99 สำหรับหน้าตัดที่มีค่าความเหนียวต่ำ ซึ่ง ได้ระบุว่าหน้าตัดชนิดนี้มี จะต้องมีค่ากำลังสูงขึ้นกว่าหน้าตัดปกติทั่วไป โดยการใช้ค่าตัวคูณลดกำลังที่ต่ำลง ซึ่งแนะนำให้ใช้ค่า 0.7 แทนค่า 0.9 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ทั่วไปสำหรับหน้าตัดที่มีความเหนียวสูง

ดังนั้นค่าตัวคูณลดกำลังในสมการข้างล่างจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบระบบ FRP

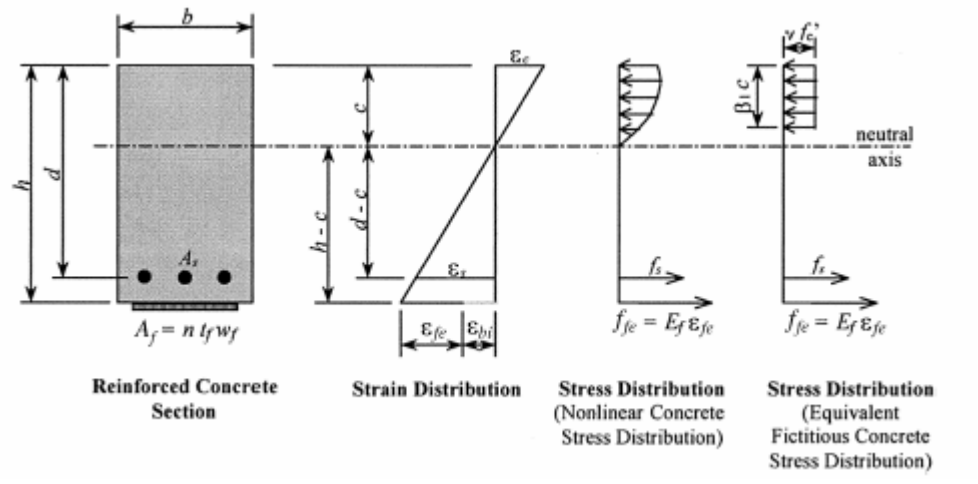
$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{for } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.70 + \dfrac{0.20\left(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy}\right)}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{for } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s 0.005 \\ 0.70 & \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (8.10)$$

เมื่อค่า ε_s คือค่าหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมที่สภาวะกำลังสูงสุด (ultimate limit state)

สมการ 8.10 จะมีลักษณะสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณลดกำลัง (ϕ) กับค่าหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริม ที่สภาวะกำลังสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 *ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณลดกำลัง (ϕ) ของ ACI 318-99 กับค่าหน่วยการยืดหดตัว (strain) ของเหล็กเสริมที่สภาวะกำลังสูงสุด (Ultimate state)*



รูปที่ 8.10 *การกระจายของหน่วยแรง(Stress) และหน่วยการยืดหดตัว(Strain) ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่รับแรงดัด ณ สภาวะกำลังสูงสุด (Ultimate state)*

8.9.4 สภาวะการใช้งาน

สภาวะการใช้งานของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ไม่มีการคูณด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนักควรที่จะสอดคล้องกับข้อกำหนดของ ACI 318-99 หน้าตัดที่มีการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP ที่จะใช้ในการประเมินสภาวะการใช้งานของโครงสร้าง สามารถทำการคำนวณคุณสมบัติของหน้าตัดโดยใช้การแปลงหน้าตัด (Transformed section) เพื่อที่จะป้องกันการเสียรูปที่เป็นแบบอินอิลาสติกของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP เหล็กเสริมจะต้องไม่เกิดการคราก (yielding) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักใช้งานควรถูกจำกัดไว้ไม่ให้เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลัง ณ ตำแหน่งที่เกิดการครากของเหล็กเสริม

$$f_{s,s} \le 0.80\, f_y \qquad (8.11)$$

8.9.5 ขีดจำกัดหน่วยแรงเพื่อป้องกันการคืบและความล้า

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาของการวิบัติเนื่องจากการคืบในวัสดุ FRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง หรือการวิบัติเนื่องจากความล้าของวัสดุ FRP ภายใต้หน่วยแรงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าของหน่วยแรงในวัสดุ FRP ภายใต้สภาวะดังกล่าวจะต้องได้รับการตรวจสอบ โดยสามารถใช้การวิเคราะห์แบบอิลาสติก เนื่องจากระดับของหน่วยแรงจะอยู่ในช่วงที่โครงสร้างมีพฤติกรรมแบบ อีลาสติก

ผลจากงานวิจัยที่มีอยู่ได้แสดงให้เห็นว่าใยแก้ว Aramid fiber และ Carbon fiber เมื่อจะต้องมีการกำหนดค่าหน่วยแรงเท่ากับ 0.3 0.47 และ 0.91 เท่าของกำลังสูงสุดของวัสดุ ตามลำดับ Aramid fiber และ Carbon fiber เกิดปัญหาการวิบัติเนื่องจากการคืบขึ้น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงลักษณะของการวิบัติดังกล่าวรวมไปถึงปัญหาความล้าของวัสดุ FRP จะต้องมีการกำหนดขีดจำกัดของหน่วยแรงสำหรับ FRP สภาวะเหล่านี้ตามสมการ (8.12)

$$\text{Sustained plus cyclic stress limit} \ge f_{f,s} \qquad (8.12)$$

ระดับของหน่วยแรงในวัสดุ FRP สามารถทำการคำนวณจากการวิเคราะห์แบบอีลาสติก และใช้ค่าแรงดัดเนื่องจากน้ำหนักคงค้าง (น้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด และน้ำหนักบรรทุกจรบางส่วน) บวกกับค่าแรงดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักเปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าของหน่วยคงค้างของหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาควรมีค่าไม่เกินที่ระบุไว้ใน ตารางที่ 8.2 ซึ่งใช้ค่า Factor of Safety เท่ากับ 1/0.060 เป็นตัวกำหนด

	Fiber type		
Stress type	**Glass FRP**	**Aramid FRP**	**Carbon FRP**
Sustained plus cyclic stress limit	$0.20f_{fu}$	$0.30f_{fu}$	$0.55f_{fu}$

ตารางที่ 8.2 *ขีดจำกัดของหน่วยแรง(Stress)เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้างและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา*

8.9.6 การนำไปใช้กับโครงสร้างหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เสริมเฉพาะเหล็กรับแรงดึง

8.9.6.1กำลังสูงสุด

รูปที่ 8.10 แสดงถึงการกระจายของหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่รับแรงดัด ณ สภาวะกำลังสูงสุด (ultimate limit state) ขั้นตอนของการคำนวณจะต้องใช้หลักการของความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัวและการสมดุลของแรง และควรพิจารณาลักษณะของการวิบัติ ขั้นตอนในการคำนวณที่ใช้ในคู่มือนี้จะใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method)

ขั้นตอนของการลองผิดลองถูกจะเริ่มจากการสมมติความลึกของแกนสะเทินหรือระยะ c แล้วทำการคำนวณหาระดับของหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุแต่ละชนิด โดยใช้ความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว จากนั้นทำการคำนวณค่าของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุแต่ละชนิด แล้วทำการตรวจสอบสมดุลของแรงภายใน ถ้าผลรวมของแรงภายในไม่ทำให้เกิดสมดุลจะต้องทำการสมมติตำแหน่งของแกนสะเทินใหม่แล้วทำการคำนวณทั้งหมดอีกครั้งจนกว่าจะเกิดสมดุลขึ้น

ในการคำนวณค่าของหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุ FRP จะคำนวณโดยใช้สมการ

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \le \kappa_m \varepsilon_{fu} \tag{8.13}$$

สมการนี้พิจารณาถึงลักษณะการวิบัติที่จะเกิดขึ้น ถ้าเกิดเทอมที่หนึ่งของสมการเป็นเทอมที่ใช้ในการออกแบบแสดงว่าการวิบัติของคอนกรีตจะเกิดขึ้น ถ้าเทอมที่สองเป็นเทอมที่ใช้ในการออกแบบแสดงว่าการวิบัติในวัสดุ FRP จะเกิดขึ้น

ค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลในวัสดุ FRP จะสามารถคำนวณได้จากสมการ 8.14 โดยการสมมติว่าวัสดุมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \tag{8.14}$$

จากระดับของหน่วยการยืดหดตัวในวัสดุ FRP ค่าของหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 8.15 โดยใช้หลักการของความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว

$$\varepsilon_s = \left(\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}\right)\left(\frac{d-c}{h-c}\right) \tag{8.15}$$

ค่าของหน่วยแรงในเหล็กเสริมสามารถคำนวณโดยการสมมติให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรม แบบอีลาสติก – พลาสติก

$$f_s = E_s \varepsilon_s \le f_y \tag{8.16}$$

จากค่าหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงในวัสดุ FRP และเหล็กเสริม การสมดุลของแรงภายในสามารถที่จะตรวจสอบได้โดยใช้สมการ 8.17 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งของแกนสะเทินที่สมมติไว้ตอนเริ่มต้น

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c' \beta_1 b} \tag{8.17}$$

ค่าของ γ และ β_1 ในสมการ 8.17 เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดค่าของบล็อกของหน่วยแรงที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในคอนกรีต ซึ่งจะมีค่าเทียบเท่ากับการกระจายของหน่วยแรงจริงแบบไม่เป็นเส้นตรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ถ้าการวิบัติของคอนกรีตเกิดขึ้น (ก่อนหรือหลังจากการคราก) γ และ β_1 สามารถที่จะใช้ค่า Whitney stress block ในการคำนวณได้ (γ = 0.85 และ β_1 จาก ACI 318-99) ถ้าการวิบัติเกิดขึ้นใน FRP Whitney stress block จะให้ค่าประมาณการในระดับที่แม่นยำพอสมควร

ความลึกที่แท้จริงของแกนสะเทิน หรือระยะ c จะได้มาจากการแก้สมการ 8.13 8.14 8.15 8.16 และ 8.17 พร้อมกัน ค่ากำลังรับแรงดัดของหน้าตัดที่เสริมกำลังด้วยระบบ FRP สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการ 8.18 โดยมีการใช้ตัวคูณลดกำลัง ψ_f เท่ากับ 0.85 สำหรับวัสดุ FRP

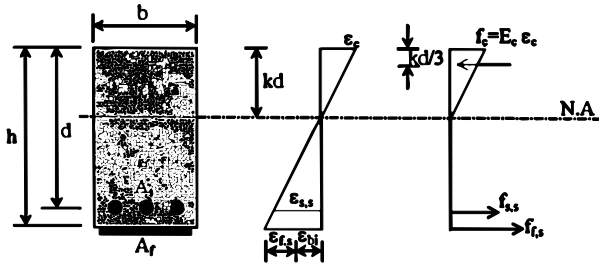
$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \tag{8.18}$$

8.9.6.2 ค่าของหน่วยแรงในเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักใช้งาน

ค่าของหน่วยแรงในเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักใช้งาน สามารถคำนวณจากการวิเคราะห์แบบ cracked elastic analysis โดยใช้สมการ 8.19

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right)(d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right)(h - kd)} \tag{8.19}$$

ลักษณะการกระจายของหน่วยการยืดหดตัว (Strain) และหน่วยแรง (Stress) ของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอีลาสติกได้แสดงไว้ใน รูปที่ 8.11



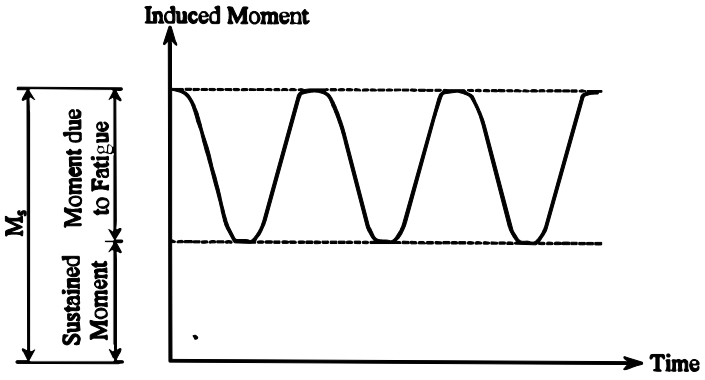
***รูปที่ 8.11* การกระจายของหน่วยการยืดหดตัว(Strain) และหน่วยแรง(Stress) ของหน้าตัดที่เป็นอีลาสติก**

8.9.6.3ค่าของหน่วยแรงในวัสดุ FRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

ค่าของหน่วยแรงในวัสดุ FRP สามารถคำนวณจากสมการ 8.20 โดยใช้ค่า $f_{s,s}$ จากสมการ 8.19 ที่คำนวณโดยให้ M_s ในสมการ 8.19 มีค่าเท่ากับแรงดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง (น้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดและน้ำหนักบรรทุกจรบางส่วน) บวกกับค่าแรงดัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8-12

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \tag{8.20}$$

ค่าของหน่วยแรงในวัสดุ FRP ที่คำนวณได้จากสมการ 8.20 ควรนำไปเปรียบเทียบกับขีดจำกัดของหน่วยแรง



รูปที่ 8-12 *การคำนวณค่าแรงดัด* M_s *ที่จะใช้ในการตรวจสอบระดับของหน่วยแรง(Stress)ในวัสดุ FRP*

8.10 การเสริมกำลังในการรับแรงเฉือน

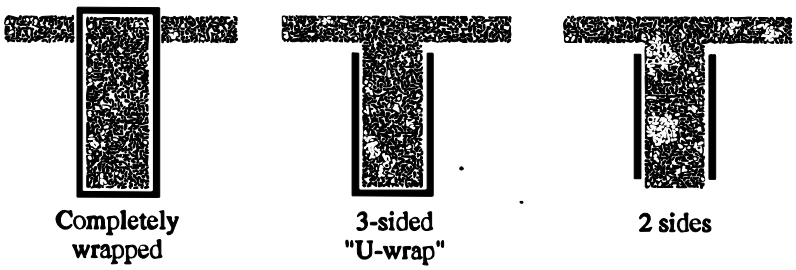
8.10.1ข้อพิจารณาทั่วไป

กำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นหลังจากทำการเสริมกำลังโดยใช้ในระบบ FRP จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย เช่น ลักษณะรูปร่างของหน้าตัด วิธีการรัดรอบโครงสร้างด้วยแผ่น FRP และกำลังของคอนกรีต

8.10.2 รูปแบบการติดตั้งแผ่น FRP

วิธีการติดตั้งระบบ FRP ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานหรือเสาได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 8-13 การที่ใช้วัสดุ FRP รัดโดยรอบของหน้าตัดทั้ง 4 ด้านจะเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิผลสูงสุดและจะมีการใช้ในการพันเสาเป็นส่วนใหญ่ การที่จะใช้การพันรอบสำหรับคานจะทำได้ยากเนื่องจากติดแผ่นพื้น ดังนั้นจึงต้องติดตั้งวัสดุ FRPเป็นลักษณะรูปตัวยูบนด้านทั้งสามหรืออย่างน้อยบนด้านทั้งสองที่อยู่ในแนวดิ่ง การติดตั้งวัสดุ FRP เฉพาะ 2 ด้านจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิผลน้อยที่สุด

ในการติดตั้งวัสดุ FRP สามารถที่จะทำอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของโครงสร้าง หรือจะวางห่างกันเป็นระยะๆก็ได้



รูปที่ 8-13 *ลักษณะของการติดตั้งวัสดุ FRP สำหรับการเสริมกำลัง*

8.10.3 กำลังเฉือนที่ใช้ในการออกแบบ

กำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP จะต้องมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงที่มากระทำโดยที่แรงกระทำจะคำนวณโดยการใช้ตัวคูณเพิ่มสำหรับแรงตามที่ระบุไว้ใน ACI 318-99 และกำลังรับแรงเฉือนจะต้องคำนวณโดยการใช้ตัวคูณลดค่า ϕ ที่ระบุไว้ใน ACI 318-99

$$\phi V_n \geq V_u \tag{8.21}$$

กำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP สามารถคำนวณโดยการเพิ่มกำลังของวัสดุ FRP ในการรับแรงเฉือน (V_f) เข้าไปดังสมการ (8.22)

$$\phi V_n = \phi\left(V_c + V_s + \psi_f V_f\right) \tag{8.22}$$

การใช้ตัวคูณลดค่า ψ_f สำหรับการเสริมกำลังรับแรงที่แรงยึดเหนี่ยวมีความสำคัญจะใช้ค่า ψ_f เท่ากับ 0.85 ส่วนในกรณีที่การยึดเหนี่ยวมีความสำคัญน้อยจะใช้ค่า ψ_f เท่ากับ 0.95

$\psi_f = 0.95$	Completely wrapped members
$\psi_f = 0.85$	Three-sided U-wraps or bonded face piles

ตารางที่ 8.3 *ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับการใช้ระบบ FRP ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือน*

8.10.4 การรับแรงเฉือนโดยระบบ FRP

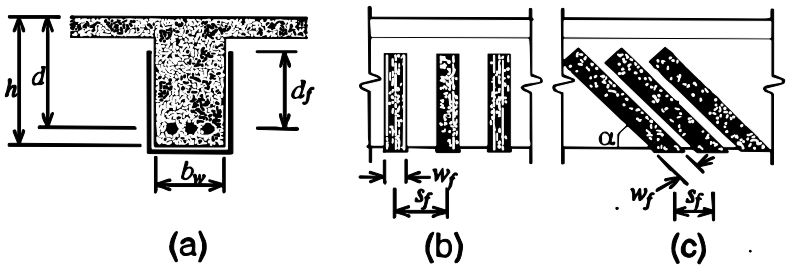
รูปที่ 8-14 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหากำลังรับแรงเฉือนของแผ่น FRP กำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบ FRP จะขึ้นอยู่กับ การวางตัวของไฟเบอร์และสมมติฐานของรูปแบบรอยแตกร้าว กำลังรับแรงเฉือนจากวัสดุ FRP (V_f) สามารถคำนวณจากหน่วยแรงดึงในวัสดุ FRP บริเวณรอยแตกร้าวสมการของกำลังรับแรงเฉือนเนื่องจากวัสดุ FRP คือ

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} \left(\sin\alpha + \cos\alpha\right) d_f}{S_f} \tag{8-23}$$

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \tag{8-24}$$

ค่าหน่วยแรงดึงในวัสดุ FRP ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าหน่วยการยืดหดตัวของตัววัสดุ FRP

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \tag{8-25}$$



รูปที่8-14 *ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณออกแบบสำหรับการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP*

8.10.4.1หน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลในแผ่น FRP

หน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลคือค่าหน่วยการยืดหดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ในระบบ FRP ในขณะที่มีน้ำหนักสูงสุดมากระทำ โดยที่ลักษณะการวิบัติที่จะเกิดขึ้น จะเกิดขึ้นในตัวระบบ FRP ของโครงสร้างที่เสื่อมกำลังแล้ว วิศวกรผู้ออกแบบควรจะพิจารณาถึงลักษณะการวิบัติลักษณะต่างๆที่เป็นไปได้และใช้ค่าหน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลเป็นค่าวิกฤต หัวข้อต่อไปนี้จะแนะนำวิธีการคำนวณห่าค่าหน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลสำหรับแผ่น FRP ที่ใช้เสริมกำลังรับรับแรงเฉือนในลักษณะต่าง ๆ

8.10.4.1.1 การพันรอบวัสดุ FRPทั้งสี่ด้านของโครงสร้าง

สำหรับโครงสร้างเสาและคานทีมีการพันรอบด้วยระบบ FRP ค่าหน่วยการยืดหดตัวสูงสุดที่จะใช้ในการออกแบบจะถูกจำกัดไว้ที่ 0.4 %ตามผลการทดลองและจากประสบการณ์ของผู้ที่ทำการวิจัย

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \le 0.75\varepsilon_{fu} \qquad (8.26(a))$$

8.10.4.1.2 การติดตั้งวัสดุ FRP เป็นรูปตัวยูหรือติดตั้งบนด้านสองด้าน

ระบบ FRP ที่ไม่ได้พันรอบหน้าตัดทั้งหมดจะเกิดการวิบัติโดยที่จะมีการแยกตัวของวัสดุ FRP จากคอนกรีตก่อนที่จะเกิดการแยกตัวกันของมวลรวมในคอนกรีต ดังนั้นค่าการคำนวณหน่วยการยืดหดตัวประสิทธิผลจะทำการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ลดค่าของแรงยึดเหนี่ยว κ_v สำหรับแรงเฉือน

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \le 0.004 \qquad (8.26(b))$$

ค่าสัมประสิทธิ์ลดค่าแรงยึดเหนี่ยว κ_v เป็นฟังก์ชันกับกำลังของคอนกรีต วิธีการติดตั้งวัสดุ FRP และความแข็งแรงของแผ่น FRP ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ κ_v สามารถคำนวณได้จากสมการ 10.7 – 10.10

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11{,}900\varepsilon_{fu}} \le 0.75 \qquad (8.27)$$

ระยะประสิทธิผลผลของการยึดเหนี่ยว L_e คือระยะความยาวซึ่งหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระยะ L_e นี้สามารถคำนวณได้จากสมการ 8.28

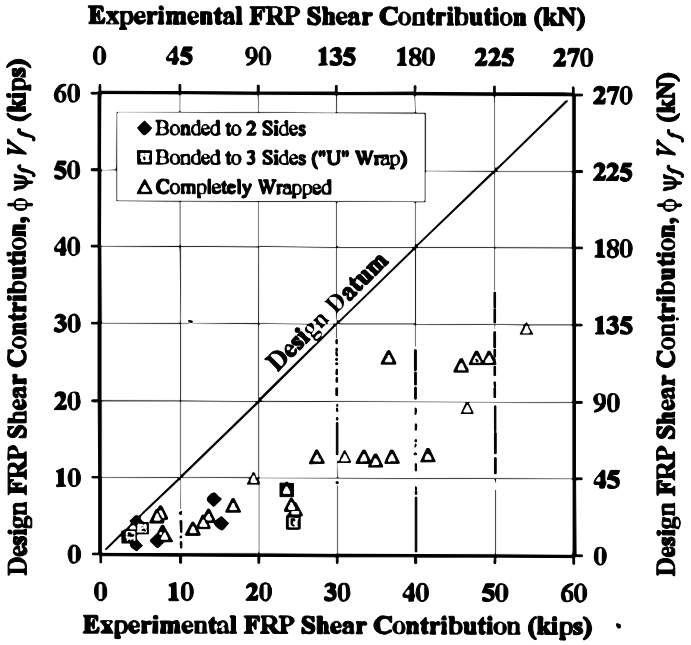
$$L_e = \frac{23{,}300}{\left(nt_f E_f\right)^{0.58}} \qquad (8.28)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ลดค่าแรงยึดเหนี่ยวจะขึ้นอยู่กับค่า k_1 และ k_2 ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตและวิธีการติดตั้งระบบ FRP ตามลำดับ ดังนั้นสมการสำหรับ k_1 และ k_2 จะได้จากสมการที่ 8.29 และ 8.30

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27}\right)^{2/3} \qquad (8.29)$$

$$k_2 = \begin{cases} \dfrac{d_f - L_e}{d_f} & \text{for U-wraps} \\ \dfrac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{for two sides bonded} \end{cases} \qquad (8.30)$$

วิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่า κ_v ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้ได้สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างในบริเวณที่มีค่าแรงเฉือนที่สูงและมีค่าแรงดัดที่ต่ำ แต่ยังไม่มีการพิสูจน์สำหรับบริเวณที่มีค่าแรงเฉือนและแรงดัดที่สูงแต่ก็ถือว่าค่า κ_v มีความปลอดภัยพอเพียงที่จะนำไปใช้ในการคำนวณในกรณีทั่วๆไป รูปที่ 8-15 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการออกแบบกับผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบจะมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ



รูปที่ 8-15 *การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ FRP ที่ได้จากการทดลองและจากการออกแบบ*

8.10.4.2ระยะห่างระหว่างวัสดุ FRP

วัสดุ FRP ที่ใช้เสริมกำลังรับแรงเฉือนควรมีการกำหนดระยะห่างระหว่างแนวตาม ACI 318-99สำหรับเหล็กรับแรงเฉือน ระยะระหว่างแนวจะใช้ระยะจากจุดกึ่งกลางของแต่ละแนว

8.10.4.3 ข้อจำกัดในการเสริมกำลังรับแรงเฉือน

กำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างจะได้มาจากกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมและกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ FRP กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรวมกับวัสดุ FRP รวมกันแล้วจะต้องไม่เกินไปจากขีดจำกัดที่ให้ไว้ใน ACI 318-99 สำหรับเหล็กเสริมอย่างเดียว

$$V_s + V_f \le 0.66\sqrt{f_c'}b_w d \qquad \text{SI Unit} \qquad (8\text{-}31)$$

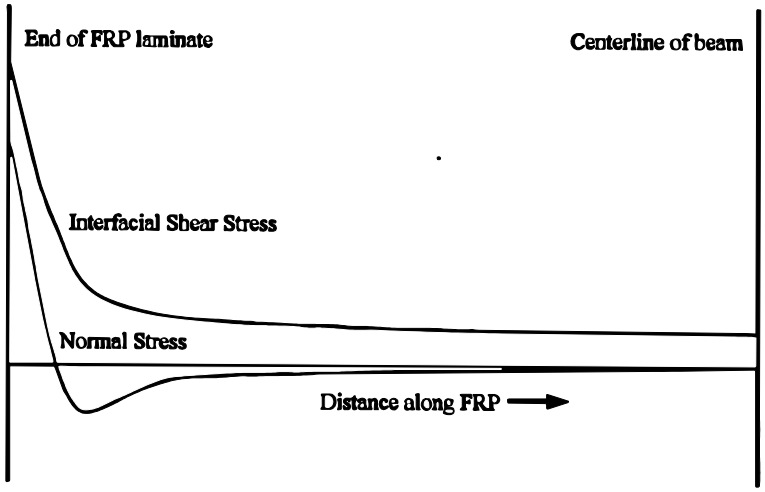
8.11 รายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมกำลัง

ปัญหาเกี่ยวกับการวิบัติเนื่องจากการสูญเสียแงยึดเหนี่ยว สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยการป้องกันง่ายๆ ดังต่อไปนี้

- อย่าวาง Fiber sheet ตามการหักมุมในของหน้าตัด (inside corner)
- เมื่อมีการวาง Fiber sheet ให้มีการหักมุมนอกของหน้าตัด (outside corner) ควรจะมีการวาง Fiber sheet ให้มีรัศมีความโค้งตรงมุมนอกอย่างน้อย 13 mm.
- จัดให้มีระยะทับซ้อนที่เพียงพอในการต่อวัสดุ FRP

8.11.1 การยึดเหนี่ยวและการหลุดร่อน

ลักษณะของการกระจายของแรงยึดเหนี่ยวในระบบ FRP เป็นสิ่งที่ซับซ้อน เนื่องมาจากการเกิดการแตกร้าวในพื้นผิวคอนกรีตในบริเวณที่ติดตั้งระบบ FRP ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส และหน่วยแรงดึงระหว่างระบบ FRP กับคอนกรีตที่ไม่มีการแตกร้าว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8-16 หน่วยแรงดึงในรูปที่ 8-16 มีทิศทางตั้งฉากกับ ระนาบของวัสดุ FRP จุดอ่อนของการยึดเหนี่ยวในการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP จะอยู่ที่ตัวคอนกรีตด้านนอกเหล็กเสริม ความแข็งแรงและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการยึดเหนี่ยวของระบบ FRP



รูปที่ 8-16 *หน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงดึงของระบบ FRP กับคอนกรีต*

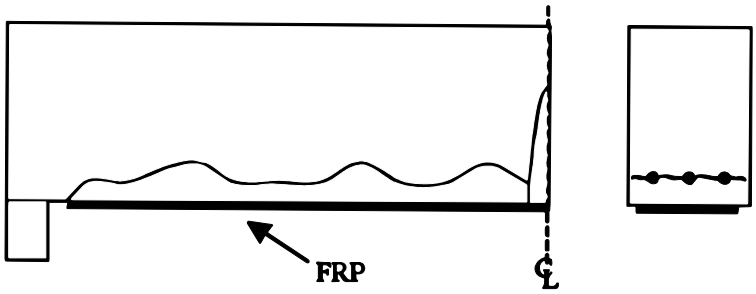
8.11.1.1การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของระบบ FRP

การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของระบบ FRP อาจเกิดจากการที่มีพื้นที่สัมผัสระหว่างระบบ FRP กับคอนกรีตในการยึดเหนี่ยวไม่พอเพียง คอนกรีตไม่มีกำลังพอสำหรับแรงเฉือนและแรงดึงที่ผิวสัมผัส ทำให้มีผิวบางๆ ของคอนกรีตหลุดติดไปกับระบบ FRP

การคำนวณหาพื้นที่สัมผัสระหว่างระบบ FRP กับคอนกรีต จะต้องคำนวณมาจาก กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดึง ของคอนกรีตบริเวณดังกล่าว โดยให้ใช้ตัวคูณลดกำลังแรงเฉือนเท่ากับ 0.5 เนื่องจากการวิบัตินี้จะเป็นการวิบัติแบบทันทีทัน (Brittle failure)

8.11.1.2 การหลุดร่อนของคอนกรีต

หน้าตัดคอนกรีตส่วนที่อยู่นอกบริเวณของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอาจะมีปัญหาของการหลุดร่อนของคอนกรีตบริเวณนี้ เนื่องมาจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่น FRP ที่ยึดติดกับคอนกรีตบริเวณนี้ ลักษณะการหลุดร่อนของคอนกรีตแบบนี้จะเกิดขึ้นโดยมีแนวของเหล็กเสริมเป็นตัวแบ่งระนาบระหว่างคอนกรีตทีหลุดออกมากับคอนกรีตส่วนที่ยังอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 8-17



รูปที่ 8-17 *การหลุดร่อนจากการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในคอนกรีตด้านนอกเหล็กเสริม*

ลักษณะการพังโดยที่คอนกรีตที่อยู่นอกเหล็กเสริมเกิดการแตกตัวออกมาเนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงในบริเวณดังกล่าวจะเป็นผลมาจากระดับของหน่วยแรงที่ตำแหน่งของการสิ้นสุดแผ่น FRP ดังนั้นจึงควรใช้ข้อแนะนำต่อไปนี้สำหรับตำแหน่งจะการสิ้นสุดของแผ่น FRP เพื่อป้องกันลักษณะการวิบัติดังกล่าว

- สำหรับคานอย่างง่าย ชั้นของแผ่น FRP ควรมีความยาวเกินกว่าระยะ d ผ่านจุดซึ่งค่าของโมเมนต์มีค่าเท่ากับ ค่ามอดูลัสการแตกร้าว M_{cr} ภายใต้น้ำหนักกระทำที่มีการคูณเพิ่ม นอกจากนี้ถ้าเกิดค่าของแรงเฉือนที่คำนวณได้จากน้ำหนักดังกล่าว ณ ตำแหน่งที่มีการสิ้นสุดแผ่น FRP มีค่ามากกว่า 2/3 ของกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต ($V_u > 0.67\ V_c$) แผ่น FRP ควรที่จะมีการยึดโดยการเสริมกำลังตามแนวขวางเพื่อที่จะป้องกันคอนกรีตส่วนที่อยู่ด้านอกเหล็กเสริมจากการแยกตัว
- สำหรับคานต่อเนื่องถ้าเกิดใช้แผ่น FRP ชั้นเดี่ยวควรจะหยุดที่ระยะ d/2 หรือ 150 mm หลังจากจุดดัดกลับ(จุดที่ M = 0) สำหรับการใช้แผ่น FRPหลายแผ่นซ้อนกัน จุดที่ทำการหยุดของแผ่น FRP ต้องค่อย ๆหลุดที่ละชั้นโดยที่ชั้นนอกสุดจะต้องหยุดที่ระยะไม่น้อยกว่า 150 mm จากจุดดัดกลับและชั้นที่อยู่ข้างในเข้ามาจะต้องหยุดไม่น้อยกว่า 150 mm จากชั้นด้านนอกดังแสดงในรูปที่ 8-18

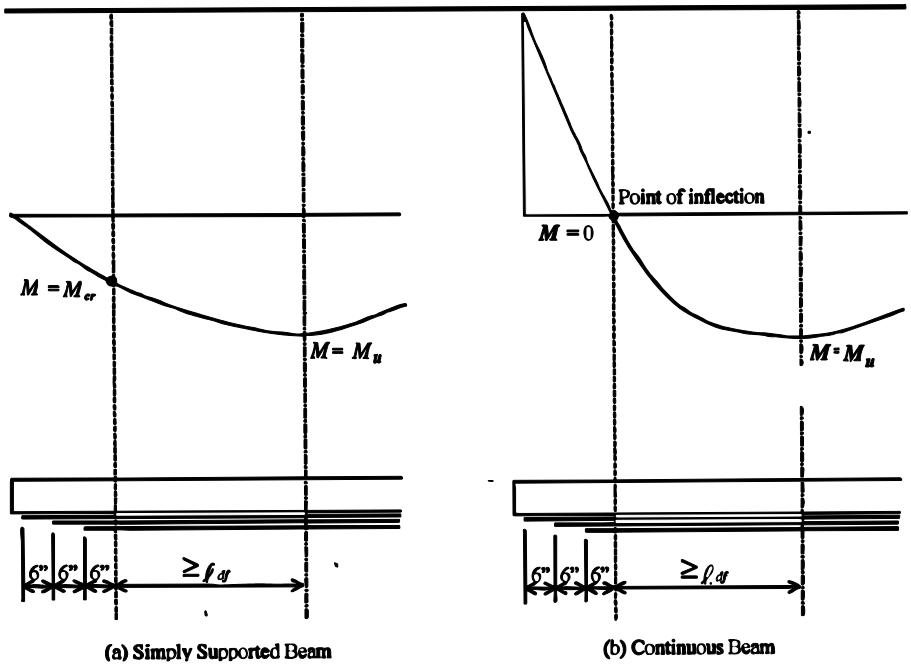


Fig. 12.3 — Graphical representation of the guidelines for allowable termination points of a three-ply FRP laminate.

รูปที่ 8-18 *แนวทางในการหยุดของวัสดุ FRP ที่ใช้เสริมกำลัง สำหรับที่ใช้การทับซ้อนกัน 3 ชั้น*

8.11.2รายะเอียดเกี่ยวกับการต่อและทับซ้อนของแผ่น FRP

การต่อชนของ แผ่น FRP ควรจะทำเฉพาะในกรณีที่วิศวกรหรือผู้ผลิตแนะนำให้ใช้เท่านั้น ไฟเบอร์ของระบบ FRPควรมีความต่อเนื่องและวางตัวในทิศทางที่มีแรงดึงสูงสุด ความต่อเนื่องของไฟเบอร์สามารถทำให้เกิดขึ้นโดยการใช้การทับซ้อนของวัสดุ FRP ระยะทับซ้อนจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดึงและความหนาของวัสดุ FRP และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของแผ่น FRP ระยะทับซ่อนที่พอเพียงควรจะต้องทำให้เกิดการวิบัติในชั้นของ FRP ก่อนที่จะเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว ณ ตำแหน่งที่มากรทับซ้อน ระยะของการทับซ้อนของวัสดุ FRP ควรจะเป็นไปตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด หรือจากการทดสอบจากห้อง ปฏิบัติการ

สำหรับแผ่น FRP ที่มีการวางตัวของไฟเบอร์ในทิศทางเดียว การทับซ้อนมีความจำเป็นที่จะต้องทำในทิศทางของการวางตัวของไฟเบอร์ สำหรับแผ่น FRP ที่มีการวางตัวของไฟเบอร์มากกว่าหนึ่งทิศทางจะต้องมีการทับซ้อนตามทิศทางที่มีการวางตัวของไฟเบอร์ทุกทิศทาง

8.12 แบบ

วิศวกรควรที่จะทำเอกสารเกี่ยวกับรายการคำนวณโดยอธิบายถึงสมติฐานและตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP และควรเตรียมแบบและรายละเอียดอย่างน้อยดังต่อไปนี้

- ระบบ FRP ที่ใช้
- ตำแหน่งของระบบ FRP ในกับโครงสร้าง
- ขนาดและทิศทางการวางตัวของแผ่น FRP

- จำนวนของชั้นของแผ่น FRP และลำดับขั้นตอนในการติดตั้ง
- ตำแหน่งของรอยต่อและระยะการทับซ้อน
- น้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบและค่าหน่วยการยืดหดตัวที่ยอมให้ในแผ่น FRP
- คุณสมบัติของวัสดุ FRP และพื้นผิวคอนกรีต
- การเตรียมพื้นผิวคอนกรีต และมุมต่างๆ ของหน้าตัดคอนกรีต
- วิธีการดำเนินการติดตั้ง อุณหภูมิของพื้นผิวคอนกรีตและความชื้น และระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งระหว่างแต่ละชั้น
- วิธีการบ่มระบบ FRP
- การเคลือบผิว(ถ้ามี)
- วิธีการขนส่ง การเก็บรักษาและข้อมูลเกี่ยวกับอายุของวัสดุ
- ขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพและตรวจสอบ
- การทดสอบการรับน้ำหนักหลังจากการติดตั้งระบบ FRP (ถ้าจำเป็น)

ภาคผนวก ก
ประมวลคำศัพท์

Anchored	สมอยึด
Bearing Assembly	ส่วนประกอบของแผ่นแบริ่งรองรับโครงสร้างส่วนบน
Brittle failure	การวิบัติจากความเปราะของวัสดุ
Concrete Overlayer	คอนกรีตทับหน้า
Confinement	การรัดรอบเพื่อป้องกันการวิบัติ
Continous External Column Confinement	เหล็กปลอกรัดรอบเสา
Corbel	หูช้าง
Creep	การคืบ
Dowel	เหล็กเดือย
Dry Packing	การใช้คอนกรีตอัดแห้ง
Embankment	คันทางดินถม
External Post Tension	การอัดแรงภายนอกโดยใช้ลวดอัดแรง
Fatigue	ความล้า
Fiber Sheet	แผ่นไฟเบอร์ที่ถักทอใช้สำหรับซ่อมแซม หรือเสริมกำลัง
Grout	การเกราท์ การอุดรู น้ำปูนหรือวัสดุที่ใช้ในการอุดรู
Impact Load	แรงกระแทก
Misalignment	การเยื้องศูนย์
Multiple Plie	เสาเข็มกลุ่ม
Primer	กาวประสาน
Pull-off adhesion test	การทดสอบกำลังรับแรงดึง
Putty	วัสดุปรับแต่งพื้นผิว
Retaining Wall	กำแพงกันดิน
Short Compression Column (Pedestal)	เสาสั้นรับแรงอัด
Shotcrete Encasement	การหุ้มผิวโครงสร้างโดยใช้คอนกรีตแบบฉีดพ่น
Slab Jacking	การยกแผ่นพื้นโดยใช้แม่แรง

Slap on Grade	ระบบแผ่นพื้นคอนกรีตที่รองรับโดยพื้นดินแข็งโดยที่ไม่มีคาน หรือตอม่อมารองรับ
Slide Bearing	แผ่นแบริ่งแบบที่ออกแบบให้โครงสร้างด้านบนเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ
Steel Wedge	ลิ่มเหล็ก
Strut	ชิ้นส่วนรับแรงอัด
Transformed section	หน้าตัดแปลง
U-wraps	การพันรูปตัวยู