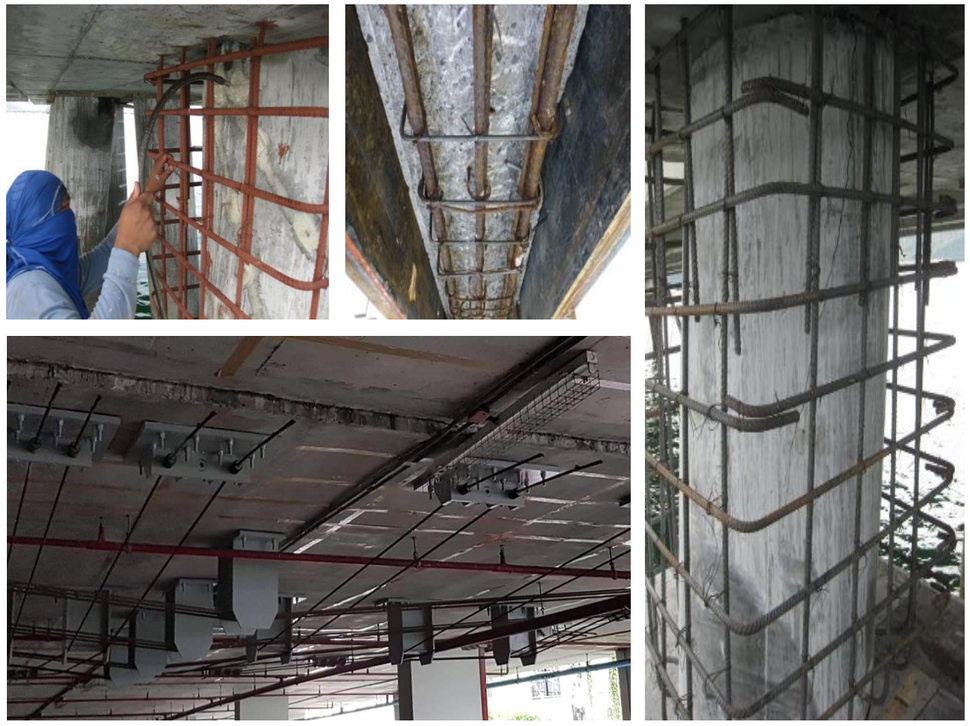
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร
กรมโยธาธิการและผังเมือง
ถ.พระรามที่ 6 แขวงพญาไท
เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทร. 0-2299-4321 โทรสาร 0-2299-4321

# คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร



กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย

**คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร**

# กรมโยธาธิการและผังเมือง

# กระทรวงมหาดไทย

กรมโยธาธิการและผังเมือง

คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร

ISBN 978-974-458-669-8

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537

โดย สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

กรมโยธาธิการและผังเมือง

ถนนพระราม 6 แขวงพญาไท

เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400

โทร. 0-2299-4321 โทรสาร 0-2299-4321

พิมพ์ที่ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง

อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2562 จำนวน 1,000 เล่ม

# คำนำ

ปัจจุบันอาคารที่ก่อสร้างแล้วเสร็จและมีอายุการใช้งานเป็นเวลานาน และอาคารที่ก่อสร้างไม่แล้วเสร็จและถูกปล่อยทิ้งร้าง เนื่องจากได้รับผลกระทบจากปัญหาเศรษฐกิจ รวมไปถึงอาคารที่ประสบอุบัติภัยหรือภัยธรรมชาติต่าง ๆ เช่น อัคคีภัย วาตภัย และอุทกภัย อาจมีโครงสร้างที่ได้รับความเสียหายจากการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายของวัสดุ หรือปัญหาการทรุดตัว การแอ่นตัว การแตกร้าว การผุกร่อน ความเสียหายจากเหตุเพลิงไหม้ตลอดจนปัญหาการปรับปรุงอาคารอันเนื่องมาจากการดัดแปลงหรือการเปลี่ยนการใช้ ซึ่งอาคารดังกล่าวมีความจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบ และประเมินความเสียหาย แต่เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานหรือหลักเกณฑ์ดังกล่าวที่ชัดเจน กรมโยธาธิการและผังเมืองจึงได้จัดทำมาตรฐานการตรวจสอบ การประเมิน การซ่อมแซม และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารเก่าและโครงสร้างอาคารที่เสียหาย (มยผ. 1902-62) และเพื่อให้การปฏิบัติตามมาตรฐานที่จัดทำขึ้นเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงได้จัดทำคู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารนี้ขึ้นเพื่อประกอบการปฏิบัติตามมาตรฐานดังกล่าว

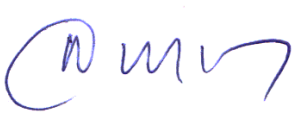
กรมโยธาธิการและผังเมืองหวังเป็นอย่างยิ่งว่าคู่มือฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้นำคู่มือไปใช้ปฏิบัติเพื่อให้การเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารเป็นไปอย่างเหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชาการ ซึ่งจะก่อให้เกิดความปลอดภัยต่อชีวิต และทรัพย์สินของประชาชนเพิ่มมากยิ่งขึ้น

(นายมณฑล สุดประเสริฐ)
อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง

# บทนำ

คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงส่วนหนึ่งสำหรับประกอบมาตรฐาน การตรวจสอบ การประเมิน การซ่อมแซม และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารเก่า และโครงสร้างอาคารที่เสียหาย (มยผ 1902-62) โดยมีเนื้อหาครอบคลุมวิธีการเสริมกำลังหลายชนิด ตั้งแต่ การขยายหน้าตัด การติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก การใช้ระบบอัดแรงภายหลังภายนอก การเพิ่มจุดรองรับ โดยให้รายละเอียดเกี่ยวกับข้อพิจารณาด้านวิศวกรรม วิธีการ ประโยชน์และข้อจำกัดของแต่ละวิธี เพื่อให้เป็นประโยชน์สำหรับการตัดสินใจเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร และในภาคผนวกของคู่มือฉบับนี้ได้ให้ตัวอย่างการคำนวณ และตัวอย่างงานเสริมกำลังโครงสร้างเพื่อเป็นตัวอย่างประกอบคู่มือไว้ด้วย

คณะทำงานจัดทำคู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารฉบับนี้ ขอขอบคุณกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับโครงการจัดทำมาตรฐานและคู่มือชุดนี้ รวมถึงร่วมตรวจสอบติดตามโครงการ ขอขอบคุณคณะทำงาน ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการศึกษา และจัดทำคู่มือประกอบมาตรฐานฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และหวังว่าคู่มือฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับงานเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้าง เพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างถูกต้องตามหลักการทางวิชาการ รวมถึงเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษา และผู้ที่สนใจศึกษางานที่เกี่ยวข้องกับคู่มือฉบับนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การนำมาตรฐานและคู่มือดังกล่าวไปใช้ปฏิบัติ จะทำให้อาคารเก่า และอาคารที่เสียหาย ได้รับการเสริมความมั่นคงแข็งแรงอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม และมีสมรรถนะของโครงสร้างทั้งความปลอดภัย ความสามารถในการใช้งาน และความคงทนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตลอดอายุการใช้งาน



ศ. ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล
หัวหน้าคณะทำงานจัดทำคู่มือ

## คณะทำงานจัดทำคู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร

**หัวหน้าคณะทำงาน**

| | |
|---|---|
| ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |

**คณะทำงานหลัก**

| | | |
|---|---|---|
| 1. | ดร.กันต์ไชย ธนาพรรวีกิตติ์ | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. | ศ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. | รศ.ดร.ทวีป ชัยสมภพ | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 4. | ผศ.ดร.ภัควัฒน์ แสนเจริญ | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 5. | ผศ.ดร.วรางคณา แสงสร้อย | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |

**คณะทำงานสนับสนุน**

| | | |
|---|---|---|
| 1. | นายปวีร์ ศิลปเสริฐสกุลวงศ์ | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร |
| 2. | ดร.พงษ์ศักดิ์ วิวัฒน์โรจนกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 3. | นายวีรเดช ธนพลังกร | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

## คณะกรรมการกำกับดูแลการปฏิบัติงานของที่ปรึกษา
## คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร

**ประธานกรรมการ**

นายสินิทธิ์ บุญสิทธิ์
ผู้อำนวยการสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

**คณะกรรมการ**

นายอนวัช บูรพาชน
วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

นายพรชัย สังข์ศรี
วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

นายสมโชค เล่งวงศ์
วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

นางสาวสุรีย์ ประเสริฐสุด
วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

ดร.ทยากร จันทรางศุ
วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

ดร.ธนิต ใจสอาด
วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ
สำนักสนับสนุนและพัฒนาตามผังเมือง

**กรรมการและเลขานุการ**

นางณัฏกานต์ แสงสุวรรณ
วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

**กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ**

นางสาวยุพิน พรมหล่อ
วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

ดร.สุวัฒน์ รามจันทร์
วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร

# สารบัญ


คำนำ ..... i
บทนำ ..... ii
ส่วนที่ 1 ข้อพิจารณาทั่วไปทางวิศวกรรม ..... 1
1.1 กระบวนการออกแบบการเสริมกำลัง ..... 3
ส่วนที่ 2 การขยายหน้าตัด ..... 7
2.1 ข้อพิจารณาด้านความคงทน ..... 9
2.2 ข้อพิจารณาด้านอัคคีภัย ..... 9
2.3 ประโยชน์และข้อจำกัด ..... 10
ส่วนที่ 3 การเสริมกำลังด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก ..... 11
3.1 กรณีศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ..... 14
3.1.1 การเสริมกำลังคาน ..... 14
3.1.2 การเสริมกำลังพื้น ..... 15
3.1.3 การเสริมกำลังเสา ..... 15
3.1.4 การเสริมกำลังกำแพง ..... 15
3.2 ข้อพิจารณาด้านความคงทน ..... 17
3.3 ประโยชน์และข้อจำกัด ..... 19
ส่วนที่ 4 ระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (Externally Post–Tensioning Systems) ..... 21
4.1 ข้อคำนึงด้านวิศวกรรม ..... 21
4.2 ระบบ วิธีการ และวัสดุ ..... 22
4.3 ข้อควรคำนึงด้านความคงทน ..... 23
4.4 ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการทนไฟ ..... 24
4.5 การใช้งาน ..... 24
4.6 ประโยชน์และข้อจำกัด ..... 25
4.6.1 ประโยชน์ ..... 25
4.6.2 ข้อจำกัด ..... 25
ส่วนที่ 5 การเสริมกำลังโดยการเพิ่มจุดรองรับ ..... 27
5.1 ข้อพิจารณาด้านวิศวกรรม ..... 27
5.2 วิธี และวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง ..... 29
5.2.1 การลดความยาวองค์อาคาร สามารถทำได้หลายรูปแบบ ดังนี้ ..... 29

5.2.2 การเพิ่มระบบโครงเฟรมลงในโครงสร้างเดิม ..... 29
5.2.3 การเสริมกำลังโดยการขยายจุดรองรับ ..... 30
5.3 ข้อพิจารณาด้านความคงทน ..... 30
5.4 ข้อพิจารณาด้านการทนไฟ ..... 30
5.5 ตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มจุดรองรับ ..... 31
5.6 ประโยชน์และข้อจำกัด ..... 31
บรรณานุกรม ..... 32
ภาคผนวก ก ..... 35
ตัวอย่างการเสริมกำลังโดยวิธีการขยายหน้าตัด ..... 36
ตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยการติดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก ..... 40
ภาคผนวก ข ..... 47
ตัวอย่างที่ 1 การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด ..... 48
ตัวอย่างที่ 2 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (External Post-Tensioning System) ..... 53
ตัวอย่างที่ 3 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก ..... 57

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการและขั้นตอนการเสริมกำลัง ..... 6
รูปที่ 2 ถนนทางเข้าสนามบิน ..... 8
รูปที่ 3 ตัวอย่างการเสริมกำลังโดยวิธีการขยายหน้าตัด ..... 9
รูปที่ 4 การติดตั้งแผ่น FRP ที่ด้านข้างโครงสร้างคานเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ..... 12
รูปที่ 5 การติดตั้งแผ่น FRP โดยวิธีโอบรัดองค์อาคารเสา ..... 12
รูปที่ 6 การเสริมความกำลังชิ้นส่วนคานโดยใช้ FRP แบบแผ่นสำเร็จรูป ..... 14
รูปที่ 7 การใช้ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้งเพื่อเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างคาน ..... 14
รูปที่ 8 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงองค์อาคารพื้นโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นสำเร็จรูป ..... 16
รูปที่ 9 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างเสาโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง ..... 16
รูปที่ 10 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างกำแพงโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง..... 16
รูปที่ 11 การอัดแรงภายหลังภายนอกที่ใช้ในการเสริมกำลังแผ่นพื้น ..... 25
รูปที่ 12 การติดตั้งคานเหล็กเพิ่มเติมเพื่อเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างพื้น..... 28
รูปที่ 13 หน้าตัดเสาก่อนเสริมกำลัง (หน่วย มม.) ..... 37
รูปที่ 14 หน้าตัดเสาที่เสริมกำลังโดยการพอกคอนกรีต (หน่วย มม.) ..... 38
รูปที่ 15 P-M diagram ของเสาก่อนที่จะมีการเสริมกำลังและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกคอนกรีต ..... 39
รูปที่ 16 ขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กในคานก่อนที่จะมีการเสริมกำลัง (หน่วย มม.)..... 40
รูปที่ 17 ความสอดคล้องของความเครียดบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนการเสริมกำลัง ..... 41
รูปที่ 18 ความสอดคล้องของความเครียดบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเสริมกำลัง ..... 44

# สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 การทดสอบความคงทนของระบบ FRP, ICC (AC125)..... 17
ตารางที่ 2 ตัวคูณปรับลดค่าเนื่องจากผลของสภาพแวดล้อม (ACI 440.2R)..... 19

# คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร

## ส่วนที่ 1 ข้อพิจารณาทั่วไปทางวิศวกรรม

การเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารหรือที่นิยมเรียกว่า การเสริมกำลังโครงสร้างอาคาร ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างด้านการรับน้ำหนักบรรทุก เช่น แรงดัด แรงเฉือน แรงตามแนวแกน และแรงบิด หลักการเสริมกำลังสามารถทำได้โดยเพิ่มกำลังขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง หรือการลดแรง หรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อองค์อาคาร หรือโครงสร้าง โดยการลดแรง หรือน้ำหนักบรรทุก อาจทำได้โดยวิธีการถ่ายแรง หรือน้ำหนักบรรทุกจากองค์อาคาร หรือโครงสร้างที่มีปัญหาไปยังจุดรองรับอื่น ตัวอย่างวิธีการเสริมกำลังโดยทั่วไป เช่น การเพิ่มขนาดหน้าตัด หรือขนาดองค์อาคาร การอัดแรงภายนอก การอัดแรงภายหลัง และการเสริมหรือเพิ่มโครงสร้างรองรับ

ระบบเสริมกำลังสามารถออกแบบให้ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงภายในโดยวิธีเชิงรับ (passive) หรือวิธีเชิงรุก (active) การเสริมกำลังแบบวิธีเชิงรับมักใช้เมื่อต้องการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่มากกว่าน้ำหนักบรรทุกตามเดิม การติดตั้งแผ่นเหล็กหรือการใช้โพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer หรือ FRP) เป็นตัวอย่างของการเสริมกำลังแบบวิธีเชิงรับ ส่วนการเสริมกำลังแบบเชิงรุกจะเป็นการใส่แรงกระทำเข้าไปในองค์อาคารหรือโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลังเพื่อให้ระบบเสริมกำลังทำงานทันทีเพื่อชดเชยผลของแรงภายใน เช่น การใช้ระบบอัดแรงภายนอกภายหลัง หรือการใช้แม่แรงช่วยในการลดหรือถ่ายแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่องค์อาคารรับอยู่ อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเสริมกำลังด้วยระบบเชิงรุกหรือเชิงรับหลักการสำคัญคือ การทำให้โครงสร้างเดิมและระบบเสริมกำลังสามารถทำงานร่วมกันได้ดีในการรับแรงหรือน้ำหนักบรรทุกหลังจากการเสริมกำลังแล้ว

นอกจากการเสริมกำลังโดยการติดตั้งระบบเสริมกำลังเพิ่มเติมเข้าไปในโครงสร้างเดิม สามารถใช้วิธีการเสริมกำลังเสมือน (virtual strengthening) ดังต่อไปนี้

**ส่วนที่ 1** การลดแรงกระทำหรือน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง โดยการลดน้ำหนักบรรทุกคงที่หรือน้ำหนักบรรทุกจร

**ส่วนที่ 2** ผ่านการพิสูจน์โดยการทดสอบวัสดุว่ามีกำลังสูงกว่ากำลังวัสดุออกแบบ และผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างว่าสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานได้อย่างปลอดภัย

**ส่วนที่ 3** ผ่านการพิสูจน์โดยการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก (full-scale load test) ว่าสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานได้อย่างปลอดภัย

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจะสามารถคำนวณได้ตามหลักวิศวกรรม แต่การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกประกอบกันไปด้วยจะเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่น สำหรับการประเมิน

ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง โดยเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อน หรือเกิดความเสียหาย หรือเสื่อมสภาพในลักษณะที่ยากต่อการประเมินโดยการคำนวณตามหลักวิศวกรรมอย่างเดียว การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกยังทำให้ทราบข้อมูลที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างในด้านกำลัง หรือการเสียรูป และการแอ่นตัวได้ โดยหากโครงสร้างมีพื้นที่ใหญ่โต กว้างขวาง ก็สามารถเลือกบางพื้นที่มาทดสอบ ซึ่งพื้นที่เหล่านั้นอาจเป็นพื้นที่ที่ได้รับการพิจารณาแล้วว่า มีความอ่อนไหว (weak) และคาดการณ์ว่าสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยที่สุด มีการเสื่อมสภาพมากที่สุด มีช่วงยาวที่สุด หรือเป็นพื้นที่ที่น่าจะเป็นตัวแทนของโครงสร้างโดยรวมได้ การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสามารถใช้ประเมินประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างที่เสื่อมสภาพ มีความเสียหาย โครงสร้างที่รับหน่วยแรงสูงเกินไป โครงสร้างที่มีข้อสงสัยด้านการรับน้ำหนักบรรทุก หรือโครงสร้างหลังจากได้รับการเสริมกำลังแล้ว ในบางกรณีอาจทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเพื่อพิสูจน์พฤติกรรมของโครงสร้างที่เป็นนวัตกรรมใหม่ มีการใช้เทคโนโลยีการก่อสร้างใหม่ หรือใช้วัสดุชนิดใหม่ การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจำเป็นต้องได้รับการดูแลโดยวิศวกรที่มีหน้าที่ความรับผิดชอบในการสำรวจโครงสร้างในเบื้องต้นการเลือกพื้นที่และบริเวณที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกำหนดปริมาณน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ การประเมินพฤติกรรมและสมรรถนะของโครงสร้างที่ทดสอบทั้งระหว่างการทดสอบ และภายหลังทดสอบแล้วเสร็จ โดยสามารถอ้างอิงรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการ วิธีการทดสอบ และเกณฑ์สำหรับตัดสินตาม ACI 318 และ ACI 437R

การเลือกวิธีการเสริมกำลังให้เหมาะสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญด้านวิศวกรรมดังต่อไปนี้

- กำลังที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเสริมกำลัง
- การเปลี่ยนแปลงของสติฟเนสในองค์อาคารเนื่องจากการเสริมกำลัง
- ขนาดของโครงการ เช่น โครงการขนาดเล็กอาจสามารถเลือกใช้วิธีการ หรือวัสดุพิเศษที่อาจมีราคาสูงได้
- สภาพแวดล้อม เช่น การใช้วัสดุประเภทอีพอกซี หรือโพลิเมอร์บางชนิดอาจไม่เหมาะกับการใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือการใช้ลวดอัดแรงในการอัดแรงภายนอก หรือเหล็กเสริมอัดแรงอยู่ภายนอกองค์อาคารอาจไม่เหมาะกับสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็กอย่างรุนแรง
- กำลังของคอนกรีตเดิมและความสมบูรณ์ของผิวคอนกรีตเดิม เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแรงยึดเกาะระหว่างระบบการเสริมกำลังกับคอนกรีตเดิม และจะทำให้มีข้อจำกัดในการเสริมกำลัง และการเลือกใช้วิธีการเสริมกำลัง
- ข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ทำงาน และความต้องการพื้นที่ว่างโดยรอบขององค์อาคารที่จะเสริมกำลัง โดยเฉพาะวิธีการขยายหน้าตัด หรือขนาดขององค์อาคาร หรือการอัดแรงภายนอก
- ความสามารถในการเข้าถึงสถานที่หรือตำแหน่งที่จะทำงาน หรือติดตั้งระบบเสริมกำลัง
- ข้อจำกัดด้านการใช้อาคารในระหว่างการเสริมกำลัง หรือจำเป็นต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จเร็วที่สุด
- ความยุ่งยากในการจัดหาวัสดุ เครื่องมือ และผู้รับเหมาที่มีคุณภาพ

- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน
- การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก เพื่อยืนยันกำลังที่มีอยู่ของโครงสร้าง หรือวัสดุใหม่

ขั้นตอนแรกของการเสริมกำลัง คือ การประเมินสภาพของโครงสร้าง และองค์อาคารที่ต้องการเสริมกำลัง เพื่อระบุประเภท ระดับของความเสียหาย หรือการเสื่อมสภาพ รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อเปรียบเทียบกำลังที่มีอยู่กับกำลังที่ต้องการสำหรับใช้เป็นแนวทางในการเลือกวิธีการเสริมกำลังที่เหมาะสม

### 1.1 กระบวนการออกแบบการเสริมกำลัง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนทั่วไปที่ใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้าง เพื่อทำให้การเสริมกำลังมีประสิทธิภาพ มีความคงทน และราคาที่เหมาะสม จุดประสงค์หลักคือ การเลือกวิธีการออกแบบและวิธีการเสริมกำลังที่เหมาะสม และเงื่อนไขต่าง ๆ ตลอดจนข้อจำกัดที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละโครงการ โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) <u>ขั้นตอนที่ 1</u> : การตรวจประเมินสภาพโครงสร้าง

ขั้นตอนแรกในการเสริมกำลัง คือ ต้องทำความเข้าใจถึงสภาพของโครงสร้างเดิม ซึ่งได้จากการศึกษาแบบก่อสร้างที่มีอยู่ เช่น แบบก่อสร้างจริง (as-built drawings) รายงานก่อสร้าง รายการคำนวณ รายงานผู้ควบคุมงาน รวมถึงประวัติการใช้อาคาร การรับน้ำหนักบรรทุก ลักษณะวัสดุ รวมไปถึงประวัติการซ่อมแซมและบำรุงรักษา เป็นต้น ในบางกรณีอาจจำเป็นต้องทำการทดสอบแบบไม่ทำลายและแบบกึ่งทำลายเพื่อประกอบการพิจารณา ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จาก ACI 364.1R และ SEI-ASCE 11-99

2) <u>ขั้นตอนที่ 2</u> : การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเดิมก่อนการเสริมกำลังมีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคาร หรือส่วนของโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับความต้องการในการใช้งานจริง หรือเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่ทำการออกแบบ ซึ่งหากพบว่าไม่เพียงพอจะใช้ข้อมูลดังกล่าวในการพิจารณาต่อไป ซึ่งรวมถึงระดับที่ทำให้เกิดความไม่เพียงพอของการรับน้ำหนักบรรทุก ข้อมูลจากการวิเคราะห์เหล่านี้สามารถใช้เป็นประโยชน์ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูป การแอ่นตัวขององค์อาคารหรือโครงสร้างในระหว่างการเสริมกำลัง หรือภายหลังจากการเสริมกำลัง ในกรณีที่โครงสร้างมีลักษณะซับซ้อน หรือเกิดความเสียหาย หรือมีการเสื่อมสภาพที่ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการวิเคราะห์ อาจทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก เพื่อให้ทราบระดับความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมของโครงสร้างเดิมก่อนการเสริมกำลังมาประกอบการวิเคราะห์โครงสร้าง การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสามารถอ้างอิงได้จากบทที่ 20 ของ ACI 318 และ ACI 437R

3) ขั้นตอนที่ 3 : เพิ่มกำลัง หรือฟื้นกำลัง (strengthen or stabilize)

การเพิ่มกำลังเป็นการดำเนินการที่ทำให้โครงสร้าง หรือองค์อาคารมีกำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นกว่ากำลังเดิม หรือคืนสภาพเทียบเท่ากับกำลังเดิมที่ออกแบบไว้ หรือต่ำกว่าทั้งสองกรณีแต่เพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการใช้งาน

4) ขั้นตอนที่ 4 : ประเภทของการเสริมกำลังที่ต้องการ

ประเภทของการเสริมกำลังสามารถนิยามได้ดังต่อไปนี้

- การเสริมกำลังหลัก (primary strengthening) เป็นการเสริมกำลังในกรณีที่กำลังที่ประเมินขององค์อาคารต่ำกว่าน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ (ไม่รวมตัวคูณน้ำหนักบรรทุก) ทำให้จุดประสงค์ของการเสริมกำลังเป็นการป้องกันการวิบัติขององค์อาคาร การเสริมกำลังหลักรวมถึงการเพิ่มขนาดหน้าตัด การลดช่วงคาน และการเสริมฐานหรือจุดรองรับ

- การเสริมกำลังรอง (supplementary strengthening) เป็นการเสริมกำลังในกรณีที่กำลังที่ประเมินขององค์อาคารสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ (ไม่รวมตัวคูณน้ำหนักบรรทุก) ซึ่งในกรณีนี้หากไม่ได้รับการเสริมกำลัง องค์อาคารดังกล่าวอาจไม่ถึงจุดวิบัติ แต่อาจจะมีหน่วยแรงในองค์อาคารสูงเกินไป หรืออาจมีการแอ่นตัวมากเกินไป และเกิดรอยร้าว

- การเสริมกำลังเชิงรับ (passive strengthening) เป็นเทคนิคการเสริมกำลังที่ระบบเสริมกำลังจะเริ่มทำงานภายหลังจากน้ำหนักบรรทุกใหม่กระทำกับองค์อาคารที่ได้รับการเสริมกำลัง และการเสียรูปที่เกิดขึ้นภายหลัง เช่น การเสริมกำลังด้วยระบบโพลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อเนื่อง (FRP) หรือการใช้แผ่นเหล็กประกับ หรือการเพิ่มหน้าตัดขององค์อาคาร เป็นต้น

- การเสริมกำลังเชิงรุก (active strengthening) เป็นเทคนิคการเสริมกำลังที่ระบบเสริมกำลังจะเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกเดิมและใหม่ทันที เช่น ระบบอัดแรงภายนอก หรือระบบที่ใช้แม่แรงยกโครงสร้างก่อนการเสริมกำลัง เป็นต้น

5) ขั้นตอนที่ 5 : กำหนดเทคนิคการเสริมกำลังที่เหมาะสม

เทคนิคในการเสริมกำลังมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาเลือกวิธีการเสริมกำลังประกอบด้วยการคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบการเสริมกำลัง ความปลอดภัยและมีเสถียรภาพของโครงสร้าง ความสะดวกต่อการก่อสร้างและการติดตั้งระบบเสริมกำลัง ความสวยงาม และความเหมาะสมด้านราคา

6) ขั้นตอนที่ 6 : ประเมินสภาพของโครงสร้างในระหว่างการก่อสร้างและติดตั้งระบบเสริมกำลัง

ระหว่างการก่อสร้าง การติดตั้ง และการบ่มวัสดุซ่อมแซมที่ใช้ในระบบเสริมกำลังจำเป็นต้องคำนึงถึงผลจากการการสั่นสะเทือน น้ำหนักบรรทุกและหน่วยแรงที่กระทำต่อระบบเสริมกำลังในขณะปฏิบัติงาน นอกจากนี้การแอ่นตัวอาจมีผลต่อระบบเสริมกำลังและวัสดุซ่อมแซมทำให้ได้รับเสียหายในขณะก่อสร้างและติดตั้งระบบเสริมกำลัง ซึ่งอาจทำให้ระบบเสริมกำลังมีประสิทธิภาพ และความคงทนลดลง

7) ขั้นตอนที่ 7 : ประเมินลักษณะ และสิ่งแวดล้อมการใช้งานในระหว่างและภายหลังการก่อสร้างหรือติดตั้งระบบเสริมกำลัง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้าง และติดตั้งระบบเสริมกำลัง มีดังต่อไปนี้

- ความสะดวกในการเข้าถึงสถานที่ทำงาน
- อุปสรรคของการทำงาน และสิ่งกีดขวาง
- การควบคุมฝุ่น และเสียงที่เกิดจากการทำงาน
- เวลาในการทำงาน
- สภาพแวดล้อมในขณะทำงาน

ภายหลังการเสริมกำลังโครงสร้างและเปิดใช้งาน อาคารอาจต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อม เช่น สารเคมี อุณหภูมิ การขัดสี หรือแรงกระแทก ดังนั้น ควรพิจารณาระบบเสริมกำลังที่ป้องกันความเสียหายดังกล่าว หรือการเสื่อมสภาพเร็วเกินไป ซึ่งอาจพิจารณาระบบเคลือบป้องกันสารเคมีเพิ่มเติมในระบบเสริมกำลังโครงสร้างในด้านการรับน้ำหนักบรรทุก

กรณีที่ต้องการความสวยงามของโครงสร้างภายหลังการเสริมกำลังมีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกระบบเสริมกำลัง บางกรณีสามารถเพิ่มเติมระบบเสริมกำลังที่จะช่วยให้องค์อาคาร หรือโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลังมีความสวยงามมากขึ้นได้ด้วย เช่น ระบบเคลือบผิว การทำให้โครงสร้างภายหลังการเสริมกำลังมีความเข้ากันได้ หรือกลมกลืนกับสภาพแวดล้อม เป็นต้น

8) ขั้นตอนที่ 8 : เลือกเทคนิคการเสริมกำลังที่ดีที่สุด

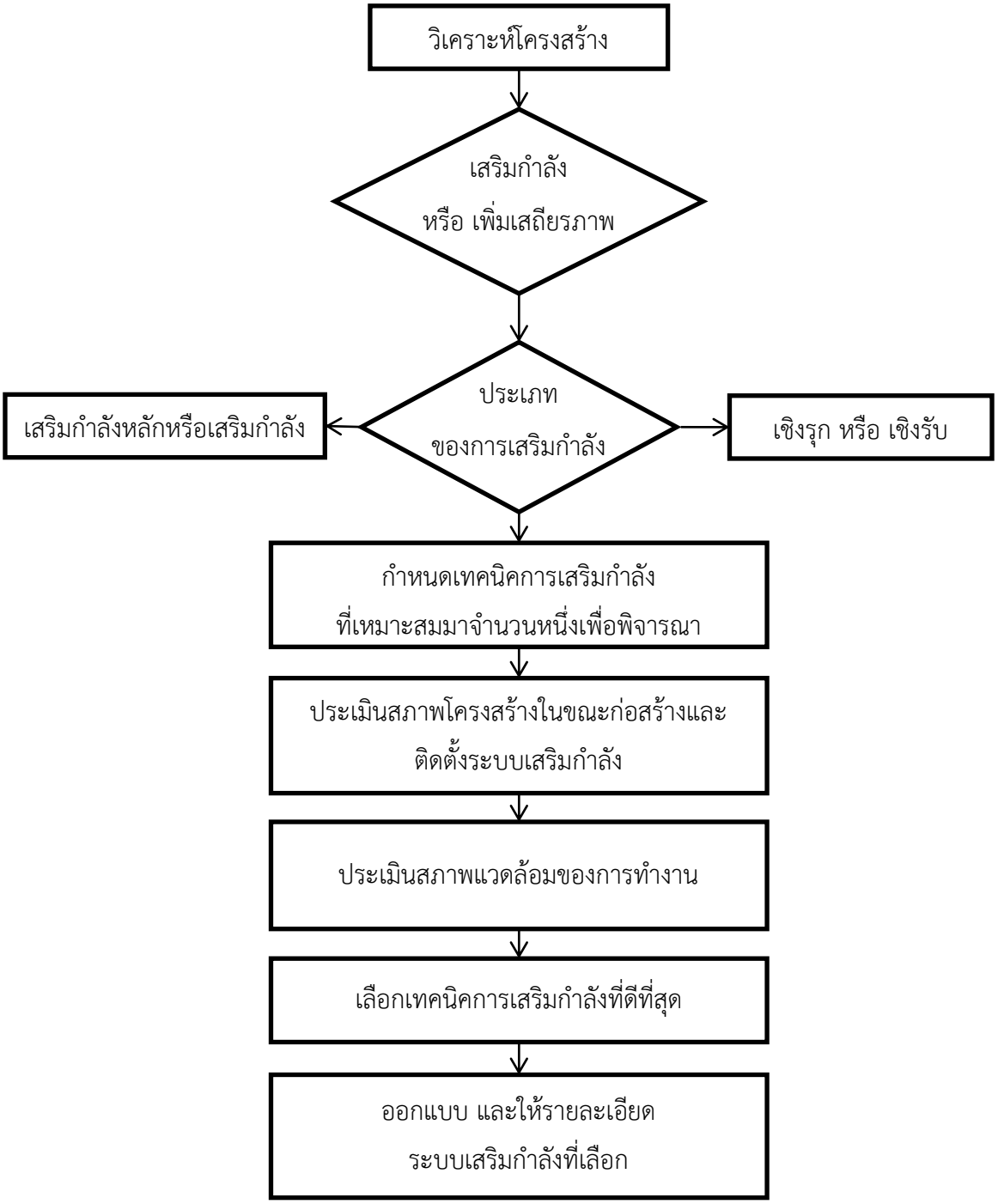
หลังจากดำเนินการในขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 7 ควรเลือกเทคนิคการเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการเสริมกำลัง บางกรณีแม้ว่าวัสดุหรือบางส่วนของระบบเสริมกำลังที่เลือกใช้อาจมีราคาสูงกว่าวัสดุและระบบเสริมกำลังอื่น แต่สามารถดำเนินการให้แล้วเสร็จในระยะเวลาสั้น หรือรบกวนการใช้งานของอาคารน้อยกว่า ก็ถือว่ามีความคุ้มกว่า

9) ขั้นตอนที่ 9 : การออกแบบ และให้รายละเอียดระบบเสริมกำลังที่เลือกใช้

หลังจากเลือกระบบเสริมกำลังที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปมีดังนี้

- ออกแบบและให้รายละเอียดระบบการเสริมกำลัง
- ตรวจสอบความสามารถในการใช้งาน (serviceability)
- ตรวจสอบ น้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากระบบเสริมกำลัง และเกิดจากขั้นตอนในการก่อสร้างและติดตั้ง
- การควบคุมคุณภาพ

ข้อกำหนดของโครงการ ซึ่งเป็นแบบกำหนดโดยเริ่มต้น (prescriptive) หรือตามสมรรถนะ (performance-based) หรือการออกแบบเพื่อการก่อสร้าง (design-build) เป็นต้น




**รูปที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการและขั้นตอนการเสริมกำลัง**

**ส่วนที่ 2 การขยายหน้าตัด**

การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัดองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตเป็นวิธีการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบดั้งเดิม ซึ่งคอนกรีตที่นำมาใช้เป็นส่วนเพิ่มเติมกับองค์อาคารเก่าอาจใช้ร่วมกับเหล็กเสริม เหล็กตะแกรง หรือลวดอัดแรงได้ แต่ต้องออกแบบหน้าตัดองค์อาคารใหม่ให้มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและสติฟเนสเพิ่มขึ้น ซึ่งคอนกรีตที่เพิ่มถือเป็นส่วนของโครงสร้างที่ใช้ในการป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างเดิม หรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่อาจเกิดจากสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง จากการขัดสี รวมไปถึงยังช่วยเพิ่มความต้านทานการทนไฟของโครงสร้างเดิม วิธีการขยายหน้าตัดหรือการพอกคอนกรีตสามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้ได้กับองค์อาคารเสา คาน พื้น และกำแพง โดยวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เกิดจากการขยายหน้าตัดรวมในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อออกแบบการเสริมกำลังขององค์อาคารด้วย

การออกแบบการเสริมกำลังด้วยการพอกด้วยคอนกรีตต้องพิจารณาปัจจัย ดังต่อไปนี้

1) พฤติกรรมเชิงประกอบ (composite action) ระหว่างองค์อาคารเก่าและคอนกรีตส่วนที่เพิ่มเติมโดยใช้การยึดเหนี่ยวระหว่างส่วนคอนกรีตใหม่และองค์อาคารเก่าตามวิธีการที่เหมาะสม เช่น การใช้เหล็กเดือย การยึดต่อโดยวิธีทางกล หรือใช้วัสดุประสานประเภทเคมีภัณฑ์ เป็นต้น หากไม่มีการยึดเหนี่ยวที่ดีอาจส่งผลต่อการต้านทานแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างส่วนคอนกรีตใหม่และองค์อาคารเก่า ทั้งนี้การออกแบบ เหล็กเสริมเพื่อรับแรงเฉือนบริเวณดังกล่าวสามารถอ้างอิงตาม ACI 318 และต้องคำนึงถึงการวิบัติเนื่องจากการกระจุกตัวของหน่วยแรง (stress concentration) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขนาดหน้าตัดอย่างกระทันหัน

2) การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกคงที่ขององค์อาคารจากการเทคอนกรีตเพิ่มบริเวณผิวบนของชิ้นส่วนองค์อาคาร เช่น พื้น คาน หรือคานย่อย สามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดบวกขององค์อาคารได้ เนื่องจากการเพิ่มความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด และเมื่อมีการเทคอนกรีตเพิ่มที่ผิวบนของชิ้นส่วนองค์อาคารจะต้องมีเหล็กเสริมในบริเวณดังกล่าวเพิ่มด้วย เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดลบ นอกจากนี้อาจพิจารณาเลือกใช้คอนกรีตมวลเบาในส่วนที่มีการเทคอนกรีตเพิ่ม เพื่อให้องค์อาคารใหม่มีน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่มากจนเกินไปเมื่อเทียบกับกำลังของโครงสร้างที่สูงขึ้น

3) การเพิ่มขึ้นของสติฟเนสขององค์อาคารภายหลังการเสริมกำลังที่อาจส่งผลกระทบต่อการถ่ายแรง

4) ผลการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยตามแนวแกนแบบเยื้องศูนย์

5) สภาวะหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

6) พฤติกรรมการรับแรงขององค์อาคาร

ดังนั้น ควรทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารภายหลังการเสริมกำลังจากการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีต

การค้ำยันหรือแยกส่วนองค์อาคารที่ทำการเสริมกำลังโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีต เป็นสิ่งสำคัญที่วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาไม่ให้ค่าการแอ่นตัวหรือการสั่นสะเทือนส่งผลต่อการพัฒนากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่ในช่วงเวลาการบ่มคอนกรีตใหม่

เทคนิคและรูปแบบการพอกคอนกรีตบนผิวของชิ้นส่วนองค์อาคารคอนกรีตเก่าโดยทั่วไป ได้แก่ การตั้งแบบและหล่อคอนกรีตในที่ รวมถึงการใช้คอนกรีตพ่น (shotcreting) การเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมจะพิจารณาจากความเป็นไปได้ในการทำงาน สภาพแวดล้อมหน้างาน ขนาดองค์อาคารภายหลังการเสริมความมั่นคงแข็งแรง และวัสดุที่เลือกใช้ โดยทั่วไปต้องคำนึงถึงการยึดเกาะให้เพียงพอระหว่างวัสดุขององค์อาคารเก่าและวัสดุที่เลือกใช้ในการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในสากล เช่น ICRI 310.2R, ICRI 320.2R, ICRI 210.3R [5-7] นอกจากนี้ในการพอกด้วยคอนกรีตใหม่ที่มีการเสริมเหล็ก จะต้องจัดให้มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมใหม่กับผิวคอนกรีตเดิมที่เพียงพอเพื่อให้คอนกรีตใหม่สามารถไหลเข้าไปบริเวณช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมใหม่และผิวคอนกรีตเดิมได้ ซึ่งระยะดังกล่าวขึ้นกับขนาดใหญ่ที่สุดของขนาดมวลรวมของวัสดุที่เลือกใช้ในการเสริมกำลัง

กรณีตัวอย่างของโครงสร้างพื้นที่ไม่สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและอาจพิจารณาเลือกใช้การเสริมกำลังโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตได้ คือ พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำหน้าที่เป็นถนนทางเข้าสนามบินในชั้นบนดังรูปที่ 2 หากองค์อาคารที่ออกแบบไว้ในเบื้องต้นไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกรวมได้ ต้องดำเนินการเพิ่มความหนาขององค์อาคารพื้น นอกจากนี้อาจต้องเสริมเหล็กเดือยหรือใช้วิธีการอื่นเพิ่มเติมเพื่อให้โครงสร้างคงพฤติกรรมเชิงประกอบภายหลังการเสริมความมั่นคงแข็งแรงได้

องค์อาคารประเภทคานสามารถพิจารณาเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดและแรงเฉือน โดยเลือกใช้วิธีเสริมกำลังโดยการพอกคอนกรีตได้ ซึ่งก่อนที่จะดำเนินการต้องจัดเตรียมพื้นผิวองค์อาคาร โดยทำความสะอาดและปรับระดับผิว การติดตั้งเหล็กปลอกเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือน ในบางกรณีสามารถติดตั้งลวดอัดแรงเข้ากับปลายคานทั้งสองข้างเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัด ขั้นตอนต่อไป คือการพอกคอนกรีตเพิ่มเติมบริเวณด้านข้างและด้านล่างของคาน และในขั้นตอนสุดท้าย (ถ้ามี) ก็คือการดึงลวดอัดแรงที่ปลายคานคอนกรีตที่ทำการพอกเรียบร้อยแล้ว

**รูปที่ 2 ถนนทางเข้าสนามบิน**

(ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Chennai_International_Airport)

กรณีตัวอย่างของเสาที่สามารถพิจารณาเลือกใช้การเสริมกำลังโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตได้แก่ โครงสร้างอาคารจอดรถผู้พักอาศัยในคอนโดมิเนียมซึ่งตรวจพบว่ามีองค์อาคารพื้นรอบบริเวณเสาโครงสร้างบางตำแหน่งมีกำลังต้านทานแรงเฉือนเจาะทะลุ (punching shear) ไม่เพียงพอ ในกรณีนี้ต้องขยายพื้นที่ปลายองค์อาคารเสาหรือหัวเสาเพื่อเพิ่มพื้นที่แบกทาน (bearing area) ซึ่งในขั้นตอนแรกต้องเตรียมผิวคอนกรีตโดยกำจัดส่วนของคอนกรีตที่มีการแตกหักหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกับคอนกรีตโดยรวม ถัดมาคือการเตรียมเหล็กปลอกรอบเสา รวมทั้งเหล็กเดือยที่ทำหน้าที่ถ่ายแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่เพื่อคงพฤติกรรมเชิงประกอบของโครงสร้างด้วย หลังจากนั้นจึงเป็นการเตรียมแบบ และเทคอนกรีตพอกเข้าไปบริเวณหัวเสา รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการเสริมกำลังโดยวิธีการขยายหน้าตัด

## 2.1 ข้อพิจารณาด้านความคงทน

การเสริมกำลังโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตต้องพิจารณาด้านความคงทนเช่นเดียวกับการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่ และต้องคำนึงถึงการป้องกันการกัดกร่อนในเหล็กเสริม โดยพิจารณาจากลักษณะสภาพแวดล้อมของที่ตั้งอาคาร ทั้งนี้ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อความคงทนขององค์อาคารคอนกรีตประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพของคอนกรีตภายหลังการแข็งตัว ระยะหุ้มคอนกรีต คุณภาพการก่อสร้างและลักษณะสภาพแวดล้อม คอนกรีตมีความทึบน้ำกล่าวคือ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ระยะเวลาและวิธีการบ่มคอนกรีตต้องมีความเหมาะสม เพื่อลดการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage) นอกจากนี้ควรเสริมเหล็กต้านทานการหดตัวของคอนกรีตเพื่อควบคุมรอยร้าวที่อาจจะเกิดขึ้นจากการหดตัวที่ถูกยึดรั้ง

## 2.2 ข้อพิจารณาด้านอัคคีภัย

การพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตต้องคำนึงถึงการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างจากอัคคีภัย ซึ่งมีข้อกำหนดเช่นเดียวกับการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่ตามมาตรฐาน ACI 318 และ ACI 216.1 กรณีที่พิจารณาความปลอดภัยด้านอัคคีภัยเป็นวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบการเสริมกำลัง ควรใช้ปูนเกราท์ (cement grout) หรือสมอยึดทางกลในการยึดรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ แทนการใช้สมอยึดแบบอีพอกซี (epoxy anchor)

**รูปที่ 3 ตัวอย่างการเสริมกำลังโดยวิธีการขยายหน้าตัด**

## 2.3 ประโยชน์และข้อจำกัด

การพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตเป็นวิธีที่สะดวกต่อการปฏิบัติงาน สามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัด แรงเฉือน แรงบิด และแรงตามแนวแกน และยังทำให้องค์อาคารมีสติฟเนสและความเหนียวเพิ่มขึ้น เหมาะกับกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังต้านทานและปรับปรุงสมรรถนะขององค์อาคารให้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อขยายขีดจำกัดสภาวะด้านการใช้งานและความคงทนต่ออัคคีภัย นอกจากนี้การออกแบบเสริมความมั่นคงแข็งแรงโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีต รวมถึงวัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานเป็นสิ่งที่ผู้รับเหมามีความคุ้นเคยเป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตามการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตยังคงมีข้อจำกัด ได้แก่ ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มขึ้น การสูญเสียพื้นที่ใช้สอยหรือความสูงเดิมระหว่างชั้นของอาคาร มีค่าใช้จ่ายสูงในการเตรียมผิวคอนกรีตเก่า รวมทั้งเทคนิคที่ใช้สำหรับการเทคอนกรีตในพื้นที่จำกัด โดยรวมแล้วการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตถือเป็นวิธีที่ต้องใช้เวลาในการดำเนินงานมากกว่าวิธีอื่น วิศวกรผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงการป้องกันการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นในเหล็กเสริมที่ติดตั้งเข้ากับคอนกรีตใหม่ ในกรณีที่โครงสร้างที่ทำการเสริมกำลังตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนรุนแรง การป้องกันปัญหาการกัดกร่อนสามารถทำได้โดยการใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่เพียงพอ รวมถึงการเลือกใช้ระบบป้องกันการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอย่างเหมาะสม เช่น การเคลือบผิวเหล็กเสริม การป้องกันแบบแคโทดิก การใช้สารผสมเพิ่มที่ส่งผลดีต่อการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในส่วนผสมคอนกรีต เช่น เถ้าลอย หรือซิลิกาฟูม หรือเลือกใช้วัสดุอื่นที่ไม่เป็นสนิมสำหรับรับแรงดึง เช่น วัสดุเส้นใยสังเคราะห์กำลังรับแรงดึงสูง

## ส่วนที่ 3 การเสริมกำลังด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก

พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer หรือ FRP) เป็นวัสดุเสริมกำลังที่ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนอยู่ในเกณฑ์ดีและมีน้ำหนักเบา สำหรับ FRP ที่นิยมใช้ในปัจจุบันจำแนกตามประเภทของเส้นใยได้ 3 แบบ คือ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer หรือ GFRP) พอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber Reinforced Polymer หรือ AFRP) และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer หรือ CFRP) โดยทั่วไปวิศวกรผู้ออกแบบจะพิจารณาให้ FRP ทำหน้าที่ต้านทานหน่วยแรงดึง และใช้ข้อสมมติฐาน ความสอดคล้องของความเครียด (strain compatibility) บนหน้าตัดองค์อาคารภายหลังการเสริมกำลังให้ความเครียดมีการกระจายตัวแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นไปตามหลักปฏิบัติและหลักการทางวิศวกรรม

การติดตั้งแผ่น FRP บริเวณผิวล่างของชิ้นส่วนคานหรือพื้น ซึ่งเป็นบริเวณที่รับแรงดึง แผ่น FRP มีกำลังดึงสูงจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดัดบวกของหน้าตัดที่เสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การติดตั้งแผ่น FRP บริเวณด้านบนรอบ ๆ จุดรองรับขององค์อาคารที่เป็นโครงสร้างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึงเป็นหลักเนื่องจากแรงดัดลบ เช่น การติดแผ่น FRP บริเวณผิวบนของคานหรือพื้นบริเวณเสาจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดัดลบมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการติดตั้งแผ่น FRP บริเวณด้านบนหรือด้านล่างขององค์อาคารที่รับแรงดัดเป็นหลักนั้น สามารถเพิ่มกำลังต้านทานได้เฉพาะแรงดัดเท่านั้น ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบต้องตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างเดิมมีเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมความมั่นคงแข็งแรงได้หรือไม่ รวมถึงต้องตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการวิบัติที่จุดประลัย และความเหนียวขององค์อาคารที่เปลี่ยนไปจากการเสริมกำลังด้วย

นอกจากนี้ การติดตั้งแผ่น FRP ยังสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดนอกระนาบ (out of plane) กับโครงสร้างกำแพงได้เช่นเดียวกัน ซึ่งแรงนอกระนาบที่กระทำต่อโครงสร้างกำแพงโดยทั่วไปจะเกิดจากแรงลม หรือแรงแผ่นดินไหว

นอกจากการเพิ่มกำลังการรับแรงดัดด้วยการติดตั้งแผ่น FRP การเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างคาน สามารถทำได้โดยการติดแผ่น FRP บริเวณด้านข้างของคาน หรือสามารถติดตั้งในการลักษณะการพันรอบด้านข้างคานเป็นรูปแบบตัวยู ดังรูปที่ 4

สำหรับการติดตั้งแผ่น FRP เพื่อเสริมกำลังในเสาให้ดำเนินการภายใต้แนวคิดเช่นเดียวกับการติดตั้งเหล็กปลอกในโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป โดยการใช้แผ่น FRP พันรอบโครงสร้างเสาในบริเวณที่ต้องการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนดังรูปที่ 5 หรืออาจพิจารณาลดปริมาณการใช้แผ่น FRP โดยการใช้แผ่น FRP พันเป็นช่วง ๆ ของระยะห่างคงที่ได้

นอกเหนือจากการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือน การโอบรัดองค์อาคารเสาด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดและความเหนียวของเสาได้เช่นเดียวกัน นอกจากนั้นการโอบรัดของแผ่น

FRP ยังทำหน้าที่ช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมภายในเสาเกิดการโก่งเดาะ และสามารถป้องกันการวิบัติจากการกะเทาะ (spalling) ออกของคอนกรีตด้วย

การติดตั้ง FRP ที่ใช้ในการเสริมกำลัง จำแนกได้ 4 รูปแบบ ดังนี้

(1) FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง (FRP fabric) สามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือน และแรงดัดขององค์อาคารคอนกรีต หรืออิฐก่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปนิยมใช้เส้นใยคาร์บอนเส้นใยอะรามิด และเส้นใยแก้วติดตั้งเข้ากับองค์อาคารโดยใช้วัสดุประสานประเภทอีพอกซีเรซิน FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้งมีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง รวมถึงมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดึงสูง สำหรับการติดตั้งแผ่นเส้นใยแห้งสามารถตัดให้มีขนาดที่เหมาะสมเข้ากับพื้นที่ที่จะติดตั้งได้ง่าย สิ่งที่ต้องพิจารณาในการติดตั้งระบบ FRP คือ การเตรียมผิวองค์อาคารให้สะอาด แห้ง และปราศจากสิ่งปนเปื้อน สำหรับบริเวณคอนกรีตที่มีการเสื่อมสภาพจะต้องปรับปรุงก่อนที่จะทำการติดตั้งระบบ FRP ซึ่งรายละเอียดการเตรียมผิวสามารถอ้างอิงตาม ACI 440.2R, ACI 546R, ICRI 310.1R และมยผ. 1508-51

**รูปที่ 4 การติดตั้งแผ่น FRP ที่ด้านข้างโครงสร้างคานเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน**

(ที่มา : https://theconstructor.org/structural-engg/rcc-beams-strengthening-shear-frp-plate/15148/)

**รูปที่ 5 การติดตั้งแผ่น FRP โดยวิธีโอบรัดองค์อาคารเสา**

(ที่มา : http://www.frpcolumn.com/)

(2) FRP แบบแผ่นสำเร็จรูป (FRP plate) สามารถควบคุมการผลิตได้ ทำให้การขึ้นรูปมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ มีความหนาและความแข็งแรงมากกว่า FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง เหมาะสมกับองค์อาคารที่มีความหนาไม่มาก เช่น คาน พื้น และคานย่อย (joist) ใช้ติดตั้งเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดบวกในกรณีที่ติดตั้งบริเวณผิวล่างขององค์อาคาร หรือเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดลบในกรณีที่ติดตั้งบริเวณผิวบนขององค์อาคาร วัสดุประสานที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวระบบ FRP กับองค์อาคารที่ต้องการเสริมกำลัง คือ วัสดุประสานแบบอีพอกซีเรซินเช่นเดียวกับการติดตั้งระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง เนื่องจากวัสดุ FRP มีน้ำหนักเบา และยึดติดกับพื้นผิวคอนกรีตด้วยวัสดุประสานแบบอีพอกซีเรซินได้โดยง่าย โดยทั่วไปจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้โครงสร้างชั่วคราวเพื่อค้ำยันระบบ FRP ระหว่างขั้นตอนการติดตั้ง

(3) FRP แบบฝังใกล้ผิว (Near Surface Mounted หรือ NSM) ดำเนินการภายใต้แนวคิดเดียวกับการติดตั้งเหล็กเสริมแบบฝังใกล้ผิวในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งระบบ NSM สามารถประยุกต์ใช้ได้กับ FRP แบบแผ่นสำเร็จรูป หรือ FRP แบบเส้นซึ่งมีลักษณะเหมือนเหล็กเสริม วัสดุประสานระหว่างคอนกรีตและ FRP ระบบ NSM คือ อีพอกซีเรซินเช่นเดียวกับที่ใช้ในการติดตั้ง FRP ระบบอื่น ข้อแตกต่างระหว่าง NSM กับ FRP ระบบอื่น คือ ระบบ NSM นี้มีการเซาะร่องผิวของชิ้นส่วนองค์อาคารเพื่อฝัง FRP เข้าไปในร่อง ซึ่งขนาดของร่องขึ้นอยู่กับขนาดของ FRP และข้อพิจารณาด้านความคงทนซึ่งพิจารณาในรูปของระยะหุ้มคอนกรีต การดำเนินงานเริ่มจากการเซาะร่ององค์อาคาร ทำความสะอาด ติดตั้งระบบ FRP และขั้นตอนสุดท้าย คือ การปรับระดับผิวชิ้นส่วนองค์อาคารให้กลับสู่สภาพเดิม การเสริมกำลังด้วย FRP ระบบ NSM เหมาะสำหรับกรณีที่ผิวคอนกรีตขององค์อาคารที่ต้องการเสริมกำลังมีความขรุขระมาก การเซาะร่ององค์อาคารเป็นขั้นตอนที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการเตรียมและปรับสภาพพื้นผิวคอนกรีตสำหรับการติดตั้ง FRP ระบบอื่น ๆ ข้อดีของระบบ NSM คือ วัสดุ FRP จะถูกฝังลงไปในเนื้อคอนกรีต ทำให้ลดการเสื่อมสภาพของวัสดุ FRP จากสภาพสิ่งแวดล้อมได้ รวมถึงวัสดุ FRP จะทำหน้าที่ปกป้องจากการกัดกร่อนและการขัดสีจากการใช้งานองค์อาคาร ซึ่งโดยรวมแล้วการเสริมกำลังด้วย FRP ระบบ NSM จะทำให้โครงสร้างภายหลัง การเสริมกำลังมีความคงทนสูงกว่าการเสริมกำลังด้วย FRP ระบบอื่น

(4) FRP ระบบอื่น ๆ เช่น FRP ที่ใช้การอัดแรงภายหลัง (post-tensioned) การเสริมกำลังด้วย FRP ที่มีการอัดแรงภายหลัง ซึ่งมีแนวคิดในการออกแบบและการใช้งานเช่นเดียวกับการใช้ลวดอัดแรง การเสริมกำลังโครงสร้างโดยการใช้ FRP แบบอัดแรงนอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัด และสามารถปิดรอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในองค์อาคารคอนกรีตได้ด้วยการอัดแรง เป็นการใช้งานสมบัติวัสดุของ FRP ที่มีประสิทธิภาพด้านความสามารถในการรับแรงดึงได้สูง

นอกจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะรามิดดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว พอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็ก (Steel-Reinforced Polymers หรือ SRP) ถือเป็นวัสดุที่สามารถประยุกต์ใช้ในงานเสริมความกำลังได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงมาก สามารถเชื่อมประสาน

กับองค์อาคารคอนกรีตได้โดยใช้อีพอกซีเรซินหรือปูนทราย ข้อดีของการใช้วัสดุ SRP ที่มีมากกว่า FRP คือสามารถต้านทานการเสื่อมสภาพได้ดีในสภาวะที่ต้องเผชิญกับอุณหภูมิสูง และเพลิงไหม้

## 3.1 กรณีศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างประเภทต่าง ๆ

**3.1.1** การเสริมกำลังคาน

กรณีที่ลวดอัดแรงในชิ้นส่วนคานที่ทำการอัดแรงมีค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ ทำให้หน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงมีค่าสูง และกำลังรับแรงดัดมีค่าต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยและความแข็งแรงของโครงสร้างที่ต้องเปิดใช้งานได้โดยเร็ว วิศวกรจึงติดตั้งระบบ FRP บริเวณด้านล่างของชิ้นส่วนคาน เพื่อให้สามารถต้านทานแรงดัดได้อย่างปลอดภัย ซึ่งโดยทั่วไปการติดตั้งระบบ FRP จะใช้เวลาประมาณ 2 วัน จากการดำเนินการดังกล่าวใช้ระยะเวลาการเสริมกำลังโครงสร้างไม่มาก และสามารถเปิดการใช้งานได้เร็ว

การเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้อาคารเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ทำให้ต้องดำเนินการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัด รูปที่ 6 แสดงการติดตั้ง FRP แบบแผ่นสำเร็จรูปด้านล่างของชิ้นส่วนคานเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัด

**รูปที่ 6 การเสริมความกำลังชิ้นส่วนคานโดยใช้ FRP แบบแผ่นสำเร็จรูป**

(ที่มา : http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/frpdebond/index.html)

**รูปที่ 7 การใช้ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้งเพื่อเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างคาน**

(ที่มา : https://www.structuremag.org/?p=8643)

สำหรับระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง สามารถติดตั้งด้านล่างและด้านข้างของชิ้นส่วนคาน เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดและกำลังต้านทานแรงเฉือนดังรูปที่ 7 การเสริมกำลังในลักษณะดังกล่าว สามารถป้องกันการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดจากแรงเฉือนในชิ้นส่วนคานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**3.1.2** การเสริมกำลังพื้น

กรณีที่พื้นไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่ออกแบบหรือพื้นเกิดการเสื่อมสภาพในระดับที่อาจส่งผลต่อกำลังและเสถียรภาพของโครงสร้าง วิศวกรผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเสริมกำลังด้วยระบบ FRP เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดของโครงสร้างพื้น ในรูปที่ 8 แสดงการเสริมกำลังโดยการติดตั้งระบบ FRP บริเวณด้านบนของพื้นบริเวณโดยรอบเสา โดยมีจุดประสงค์ในการเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัดลบ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการติดตั้งระบบ FRP บริเวณด้านบนของพื้น วิศวกรจะต้องออกแบบระบบการป้องกันพื้นผิวของโครงสร้างที่ทำการเสริมกำลังต่อการขัดสีและการสึกร่อนจากการใช้งานโครงสร้าง รวมถึงการกระแทกที่อาจจะเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุเพื่อป้องกันความเสียหายทางกลที่อาจจะเกิดขึ้นได้กับระบบ FRP

**3.1.3** การเสริมกำลังเสา

การเสริมกำลังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระบบ FRP ช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงแรงดัดที่เกิดจากแรงในแนวดิ่ง และแรงทางด้านข้างเนื่องจากแรงลม หรือแรงแผ่นดินไหวได้ ในกรณีพบรอยร้าวในเสา อาจดำเนินการซ่อมด้วยวิธีฉีดอีพอกซีเพื่อประสานรอยร้าวในขั้นตอนแรก และจัดให้มีการป้องกันไม่ให้ความชื้นแพร่กระจายเข้าสู่เนื้อคอนกรีตด้านในผ่านรอยร้าวก่อนการติดตั้งระบบ FRP นอกจากนี้บริเวณมุมของเสาต้องมีรัศมีไม่น้อยกว่า 12.7 มม. (0.5 นิ้ว) หรือพิจารณาจากมาตรฐานที่เกี่ยวข้องร่วมด้วย เพื่อป้องกันการรวมตัวของหน่วยแรงเฉพาะที่บริเวณมุมเสา ซึ่งจะเกิดการวิบัติในระบบ FRP ก่อนที่ออกแบบไว้ รูปที่ 9 แสดงการเสริมกำลังเสาโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง

**3.1.4** การเสริมกำลังกำแพง

กรณีมีการถมดินด้านหลังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้กำแพงรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนการออกแบบกำแพงได้ออกแบบภายใต้สภาวะฐานรองรับแบบกำแพงยื่น (cantilever wall) แต่ในขณะทำการก่อสร้างโครงสร้างกำแพงด้านบนมีการยึดเข้ากับองค์อาคารอื่น ทำให้กำแพงต้องรับแรงดัดบวกไม่ได้รับแรงดัดลบตามที่ได้ออกแบบไว้กรณีเดียว ส่งผลให้กำแพงบริเวณนี้เกิดการแตกร้าว วิศวกรจึงได้ทำการเสริมกำลังโครงสร้างกำแพงนี้โดยติดตั้งแผ่น FRP สำเร็จรูปในแนวดิ่งเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัดบวก ดังแสดงในรูปที่ 10

**รูปที่ 8 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงองค์อาคารพื้นโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นสำเร็จรูป**

(ที่มา : http://www.radyab.co/en/retrofit)

**รูปที่ 9 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างเสาโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง**

(ที่มา : https://www.structuremag.org/?p=8643)

**รูปที่ 10 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างกำแพงโดยใช้ระบบ FRP แบบแผ่นเส้นใยแห้ง**

(ที่มา : https://www.frontierbasementsystems.com/foundation-repair/foundation-repair-products/wall-reinforcing-systems.html)

### 3.2 ข้อพิจารณาด้านความคงทน

วิศวกรผู้ออกแบบควรเลือกใช้ระบบ FRP ที่ได้รับการรับรองหรือผ่านการทดสอบจากผู้ผลิตด้านความคงทนภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมที่ตั้งอาคาร โดยการทดสอบความคงทนอาจหมายถึงการทดสอบความคงทนต่อน้ำ ต่อสารละลายเกลือ ต่อสภาวะด่าง (alkaline immersion) ต่อสภาวะอบแห้ง (dry heat) และต่อเชื้อเพลิง (fuel resistance) (SEI-ASCE 11-99) ซึ่งแนวทางการทดสอบโดยสังเขปเป็นไปตามรายละเอียดในตารางที่ 1 นอกจากนี้การเลือกประเภทและกำหนดความหนาของสารเคลือบปกป้องผิวของระบบ FRP ควรพิจารณาให้เหมาะสมกับระบบ FRP ที่ใช้งาน รวมถึงสารเคลือบปกป้องผิวที่ใช้ควรได้รับการรับรองว่าช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของระบบ FRP ได้

**ตารางที่ 1 การทดสอบความคงทนของระบบ FRP, ICC (AC125)**

| ความสามารถต้านทาน | มาตรฐานที่อ้างถึง | รูปแบบการทดสอบ | กำลังของวัสดุภายหลังการเสื่อมสภาพเทียบกับกำลังของวัสดุก่อนการทดสอบ (ร้อยละ) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 1,000 ชั่วโมง | 3,000 ชั่วโมง |
| น้ำ | ASTM D 2247 และ ASTM E104 | ทดสอบชิ้นงานภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 100% และอุณหภูมิ 38 °C | 90 | 85 |
| สารละลายเกลือ | ASTM D1141 และ ASTM C581 | แช่ชิ้นงานในสารละลายเกลือที่อุณหภูมิ 24 °C | | |
| สภาวะด่าง | ASTM C581 | แช่ชิ้นงานในแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งจัดเตรียมสารให้มีค่า pH ที่ 9.5 | | |
| สภาวะอบแห้ง | ASTM D3045 | ทดสอบชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิ 62 °C | | |
| เชื้อเพลิง | ASTM C581 | จัดให้ FRP มีการสัมผัสกับน้ำมันดีเซลเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง | | 90 |

ชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตภายหลังการเสริมกำลังด้วย FRP ควรทำการตรวจสอบเพื่อลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่อาจส่งผลให้องค์อาคารเกิดการเสื่อมสภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมปฏิกิริยาระหว่างด่าง และแร่ซิลิกาในมวลรวม (Alkali-Silica Reaction หรือ ASR) การกักตัวของน้ำ (water entrapment) ความดันไอน้ำ (vapor pressure) และการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยการส่งผ่านไอน้ำ (moisture vapor transmission) (ACI 440.2R)

ผลกระทบของสภาพแวดล้อมในระยะยาวอาจส่งผลถึงความสามารถต้านทานหน่วยแรงดึง การต้านทานการวิบัติจากการคืบ และการต้านทานความล้าของระบบ FRP ดังนั้นในการออกแบบการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาปรับลดหน่วยแรงดึงประลัยและความเครียดประลัยของวัสดุ FRP ดังนี้ (ACI 440.2R)

$$f_{fu} = C_E \cdot f^*_{fu} \tag{3.1}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon^*_{fu} \tag{3.2}$$

โดยที่

$C_E$ = ตัวคูณปรับลดค่าเนื่องจากผลของสภาพแวดล้อม

$f_{fu}$ = หน่วยแรงดึงประลัยที่ใช้ออกแบบของ FRP

$f^*_{fu}$ = หน่วยแรงดึงประลัยของ FRP ที่ได้จากการทดสอบตาม ASTM D3039

$\varepsilon_{fu}$ = ความเครียดประลัยที่ใช้ออกแบบของ FRP

$\varepsilon^*_{fu}$ = ความเครียดประลัยของ FRP ที่ได้จากการทดสอบตาม ASTM D3039

ตัวประกอบปรับค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมแสดงดังตารางที่ 2 และในการออกแบบเสริมกำลังสามารถใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP ที่ระบุโดยผู้ผลิตได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ FRP มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นจากสภาวะที่ไม่มีแรงกระทำไปสู่สภาวะที่ FRP เกิดการวิบัติ

**ตารางที่ 2 ตัวคูณปรับลดค่าเนื่องจากผลของสภาพแวดล้อม (ACI 440.2R)**

| ลักษณะสภาพแวดล้อม | ประเภทของ FRP | ตัวประกอบปรับลดค่า เนื่องจากผลของสภาพแวดล้อม ($C_E$) |
|---|---|---|
| ภายในอาคาร | CFRP | 0.95 |
| | GFRP | 0.75 |
| | AFRP | 0.85 |
| ภายนอกอาคาร (รวมถึงโครงสร้างสะพาน และอาคารจอดรถ) | CFRP | 0.85 |
| | GFRP | 0.65 |
| | AFRP | 0.75 |
| สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรง (รวมถึงอาคารเก็บสารเคมี และอาคารบำบัดน้ำเสีย) | CFRP | 0.85 |
| | GFRP | 0.50 |
| | AFRP | 0.70 |

### 3.3 ประโยชน์และข้อจำกัด

การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบ FRP มีความสะดวกต่อการปฏิบัติ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา สามารถลดปัญหาการขนส่งวัสดุ หรืออุปกรณ์บริเวณสถานที่ก่อสร้างสามารถติดตั้งได้อย่างแนบสนิทกับโครงสร้างที่มีรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย แม้กระทั่งการติดตั้งในพื้นที่เหนือศรีษะ และด้วยคุณสมบัติที่สามารถรับแรงดึงได้สูง มีกำลังต้านทานของโครงสร้างภายหลังการเสริมกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญประกอบกับมีความหนาไม่มาก ทำให้สามารถตกแต่งผิว FRP ได้ง่าย จึงสามารถคงรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและการใช้งานโครงสร้างไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้

อย่างไรก็ตาม การเสริมกำลังด้วย FRP มีข้อเสียที่ไม่สามารถพิจารณาใช้เป็นแนวทางการเสริมกำลังขั้นพื้นฐานได้ เนื่องจากระบบ FRP มีการเชื่อมต่อกับองค์อาคารด้วยวัสดุประสานซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญมีส่งผลต่อการเสื่อมสภาพในระยะยาว รวมถึงการเตรียมวัสดุประสานและการติดตั้งที่ต้องดำเนินงานโดยผู้ที่มีความชำนาญ โดยทั่วไปแล้วผู้ที่ทำการติดตั้งระบบ FRP จะต้องควบคุมไม่ให้ความหนาของวัสดุประสานเกิน 3 มม. เพื่อจะลดผลจากการคืบและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion coefficient) ไม่ให้แตกต่างจากคอนกรีตเกินไป รวมทั้งระบบ FRP ไม่ควรใช้เสริมกำลังในบริเวณ

ที่ต้องรับแรงเฉือนแบบเจาะทะลุ หรือบริเวณที่มีการขัดสีโดยตรง เพื่อป้องกันความเสียหายก่อนสภาวะที่ออกแบบไว้ หรือป้องกันการเกิดการวิบัติแบบฉับพลัน นอกจากนี้วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบว่าการเสริมกำลังด้วยระบบ FRP จะไม่ทำให้อัตราส่วนการเสริมวัสดุรับแรงดึงมากจนเกินไป (over-reinforced) ซึ่งจะทำให้องค์อาคารที่ได้รับการเสริมกำลังเกิดการวิบัติจากหน่วยแรงอัดเร็วเกินไป

## ส่วนที่ 4 ระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (Externally Post–Tensioning Systems)

ระบบอัดแรงภายหลังเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อชดเชยหน่วยแรงดึง และการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก เหล็กเสริมอัดแรงหรือลวดอัดแรงจะทำหน้าที่แตกต่างกับเหล็กเสริมทั่วไป กล่าวคือ จะมีหน่วยแรงอยู่ก่อนที่องค์อาคารจะรับน้ำหนักบรรทุก แต่เหล็กเสริมทั่วไปจะมีหน่วยแรงเมื่อองค์อาคารเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) ระบบคอนกรีตอัดแรงถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างมานานแล้ว และต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้ระบบอัดแรงกับการซ่อมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วย เช่น ในการซ่อมและเสริมกำลังพื้นอาคาร หรือโครงสร้างสะพาน รวมถึงโครงสร้างในลักษณะผนัง หรือกำแพงรับแรง เพื่อให้สามารถต้านทานแรงด้านข้างได้

### 4.1 ข้อคำนึงด้านวิศวกรรม

ข้อคำนึงด้านวิศวกรรมในระบบอัดแรงภายหลังมีปัจจัยที่ต้องพิจารณา ดังนี้

๑) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุก แรงกระทำ รูปร่างขององค์อาคาร จุดเชื่อมต่อ (boundary condition) ข้อมูลเหล็กเสริมคอนกรีต และสมบัติของวัสดุอื่น ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบอัดแรงภายหลัง

๒) ข้อมูลด้านวิศวกรรม เช่น กำลัง (strength) และความสามารถในการใช้ (serviceability) ข้อควรระวังในการวิเคราะห์ออกแบบ ได้แก่ ไม่ให้ค่าการอัดแรงที่ได้จากคำนวณน้ำหนักบรรทุกที่รวมกับอัตราส่วนปลอดภัย (factored load combination) มีค่าสูงเกินไปจนทำให้เกิดหน่วยแรงจากการอัดแรงสูงสูงเกินไปด้วย อย่างไรก็ตามจะต้องตรวจสอบค่าการโก่งเดาะ (buckling) ในเสาหรือผนัง โดยเฉพาะองค์อาคารประเภท เสากลวง หรือ กำแพงอิฐก่อ

๓) การออกแบบระบบอัดแรงต้องคำนึงถึงการถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างและระบบอัดแรงให้สามารถถ่ายแรงจากระบบอัดแรงไปยังองค์อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

๔) บริเวณแม่แรงที่ใช้อัดแรงจะมีค่าแรงอัดสูงมาก หากไม่ได้ทำการออกแบบเป็นอย่างดี อาจทำให้คอนกรีตบริเวณจุดรองรับการถ่ายแรง (local zone) และบริเวณใกล้เคียง (general zone) ได้รับความเสียหาย เกิดการกะเทาะ หรือวิบัติได้ ดังนั้น ต้องทำการออกแบบเสริมเหล็กเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยอ้างอิงได้จาก ACI 318, Wollman and Wollman (2000) ตำแหน่งสมอยึด (anchorage) บริเวณปลายคานที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับเสารองรับคานควรอยู่ในบริเวณเดียวกับตำแหน่งเหนือรอยต่อของเสา และคาน โดยไม่ควรอยู่ในตำแหน่งด้านหน้าเสา เพื่อไม่ให้เกิดหน่วยแรงดึงตามแนวแกนระหว่างบริเวณสมอยึดและด้านหน้าเสา

๕) การอัดแรงในองค์อาคารที่มีความบาง เช่น คานรูปตัวที ปีกของคาน หรือโครงสร้างรูปกล่อง ควรคำนึงถึงหน่วยแรงอัดเฉพาะจุดที่อาจทำให้เกิดการแตกร้าวผ่าซีก (splitting) หรือการระเบิด (bursting)

บริเวณสมอยึด สำหรับองค์อาคารที่มีความหนาที่เพียงพอจะต้องทำการเสริมเหล็กเพิ่มเติมบริเวณบล็อคสมอยึดด้วย

๖) การพิจารณาความสามารถในการใช้งานควรตรวจสอบการแอ่นตัว การควบคุมรอยร้าว และหน่วยแรงในเหล็กเสริมที่เกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานขององค์อาคารผ่านการเสริมกำลังด้วยการอัดแรง โดยทั่วไปองค์อาคารคอนกรีตที่ได้รับการอัดแรงจะมีมิติสั้นลงทำให้เกิดการล้า (creep) อาจส่งผลต่อองค์อาคารรอบ ๆ ได้ หากเป็นอาคารที่มีสติฟเนสสูงควรพิจารณาความไม่ต่อเนื่องและการยึดรั้งโดยองค์อาคารที่มีสติฟเนสสูงกว่า และอาจต้องทำการเสริมเหล็กเพิ่มเติมในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ควรพิจารณาความสำคัญด้านสถาปัตยกรรมด้วย เช่น ข้อจำกัดของระยะห่างระหว่างชั้น และความสวยงาม

๗) ก่อนทำการติดตั้งระบบอัดแรงภายหลังกับโครงสร้างเดิมต้องทำการประเมินกำลังที่เหลืออยู่และความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้าง เนื่องจากการอัดแรงอาจทำให้โครงสร้างเดิมที่มีความเสียหายอยู่ก่อนแล้ว เกิดความเสียหายมากยิ่งขึ้น และควรพิจารณาระยะหุ้มคอนกรีตที่ทำหน้าที่ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมธรรมดา และสมอยึด

๘) การสูญเสียกำลังจากการอัดแรง (post-tensioning losses) ต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบอัดแรงเพื่อประเมินการสูญเสียกำลังจากการอัดแรง โดยสามารถอ้างอิง ACI 318 และ Zia et al (1979) ทั้งนี้ การสูญเสียกำลังจากการอัดแรงเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การหดตัวและเปลี่ยนรูป การหดตัวแห้ง การล้า การคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรง (relaxation) การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีต การเปลี่ยนรูปของสมอยึดเนื่องจากแรงอัด เป็นต้น

### 4.2 ระบบ วิธีการ และวัสดุ

การอัดแรงภายหลังแบ่งออกเป็น ๒ ระบบ ได้แก่ ระบบมีการยึดเหนี่ยว (bonded) และระบบไม่มีการยึดเหนี่ยว (unbonded) โดยระบบมีการยึดเหนี่ยวจะทำการอัดฉีดน้ำปูน หรือเกราท์ เพื่อให้เหล็กเสริมอัดแรงยึดเกาะคอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริมภายหลังจากการดึงเหล็กเสริมอัดแรงเพื่อให้คอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรงมีการเปลี่ยนรูปในแนวแกนเท่า ๆ กัน เช่น คานอัดแรงที่ใช้การร้อยลวดอัดแรงในท่อตลอดความยาวคาน แล้วทำการเกราท์น้ำปูนภายหลังจากดึงลวดอัดแรงแล้วเข้าไปในท่อหรือรูดังกล่าว ส่วนระบบ unbonded เป็นระบบที่เหล็กเสริมอัดแรงไม่ถูกยึดติดกับคอนกรีตรอบ ๆ (ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน หรือเกราท์) ดังนั้น เหล็กเสริมอัดแรงจะทำงานเป็นอิสระจากคอนกรีตโดยรอบ

การอัดแรงภายนอกภายหลัง (external post-tensioning) เป็นเทคนิคการเสริมกำลังโดยการใช้วัสดุเสริมกำลังซึ่งอาจเป็นเหล็กเสริมอัดแรง ลวดอัดแรง หรือวัสดุอื่น ๆ เช่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ขึงตามแนวแกนอยู่ภายนอกองค์อาคาร เช่น ขึงด้านล่าง หรือด้านข้างของคาน โดยมีการใช้สมอเปลี่ยนทิศทาง (deviator) ในการเปลี่ยนทิศทางการขึงลวดอัดแรงเพื่อปรับโมเมนต์ต้านที่ได้จากการอัดแรงภายนอกให้ได้ตามที่ต้องการตามแนวแกนขององค์อาคาร โดยทั่วไปจะติดตั้งสมอเปลี่ยนทิศทางไว้ที่กลางคานบริเวณหนึ่งในสาม หรือหนึ่งในสี่ หรือสองในสาม หรือสามในสี่ของช่วงคาน ตัวอย่างการใช้ระบบการอัดแรงภายนอกภายหลัง เช่น

การเสริมกำลังหลังคาโครงเหล็ก การเสริมกำลังคานสะพาน และโครงสร้างอาคาร ส่วนตัวอย่างการใช้งานระบบที่มีการอัดฉีดน้ำปูน หรือเกราท์ลวดอัดแรง เช่น การเสริมกำลังผนังอิฐก่อที่ใช้วิธีร้อยลวดอัดแรงผ่านรูในผนังอิฐก่อแล้วเกราท์ทีหลัง หรือการเจาะรูตลอดความยาวองค์อาคารคอนกรีตตามแนวแกน แล้วร้อยลวดอัดแรงผ่านรูที่เจาะแล้วเกราท์หลังจากการดึงลวดอัดแรงแล้ว

การยึดลวดอัดแรงด้วยสมอเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและการอัดแรงภายหลัง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สมอยึดปลายที่อัดแรง (stressing end) กับสมอยึดปลายที่ไม่ได้อัดแรง (dead end) บริเวณปลายองค์อาคารที่ทำการอัดแรงจะใช้แม่แรงในการดึงลวดอัดแรงผ่านช่องอัดแรง ภายหลังการอัดแรงเสร็จแล้วจะมีการเกราท์น้ำปูน หรืออีพอกซี ส่วนปลายด้านที่ไม่อัดแรงจะยึดลวดอัดแรงด้วยสมอตายเอาไว้โดยไม่มีการดึงลวดด้วยแม่แรงที่ปลายนี้ หากความยาวของการดึงลวดอัดแรง (ระยะระหว่างสมอทั้งสอง) ห่างกันมากกว่าประมาณ 36 เมตร จำเป็นต้องดึงลวดอัดแรงจากทั้งสองปลาย หากปลายองค์อาคารไม่สามารถเข้าถึงได้ อาจใช้เทคนิคการอัดแรงบริเวณช่วงกลางองค์อาคารแทน โดยต้องออกแบบวิธีการยึดสมอให้เหมาะสมด้วย เช่น ออกแบบให้มีแผ่นเหล็กยึด หรือหล่อคอนกรีตบล็อคเพื่อรับสมอยึดขึ้นมาต่างหาก

การอัดแรงโดยปรับทิศทางลวดอัดแรงได้รับความนิยมในการเสริมกำลังโครงสร้างต่าง ๆ เช่น คานที่จอดรถ โครงหลังคาเหล็ก และคานสะพาน เป็นต้น มีการใช้สมอยึดและสมอเปลี่ยนทิศทางลวดอัดแรงในหลายรูปแบบ เช่น การติดตั้งชุดสมอยึดเหล็กด้วยการเชื่อม หรือยึดด้วยสกรูเข้ากับองค์อาคารเดิม หรือหล่อชุดสมอยึดที่เหมาะกับการอัดแรงบริเวณกลางคาน บริเวณสมอเปลี่ยนทิศทางลวดอัดแรงต้องคำนึงถึงผิวสัมผัสระหว่างสมอกับลวดอัดแรง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับลวดอัดแรง เช่น ควรออกแบบให้มีความเรียบเพื่อป้องกันลวดอัดแรงได้รับความเสียหายจากการเสียดสี เป็นต้น

นอกจากนี้การใช้ลวดอัดแรงในลักษณะที่เป็นลวดกลุ่มจะต้องมีการใช้เหล็กเส้นกำลังสูงในการอัดแรงเพื่อเสริมกำลังด้วย เช่น การเสริมกำลังผนังอิฐก่อเพื่อต้านทานแรงดัดและแรงเฉือน การเสริมกำลังรับแรงดัดของคานในอาคาร และการเสริมกำลังรับแรงเฉือนที่บริเวณบล็อคสมอยึด การใช้เหล็กเส้นกำลังสูงในการอัดแรงเหมาะกับการอัดแรงที่มีระยะความยาวไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้ลวดอัดแรง และมักไม่มีการสูญเสียการอัดแรงบริเวณลิ่มยึดปลายเหมือนกรณีของลวดอัดแรงที่จะมีการสูญเสียการอัดแรงบริเวณลิ่มที่ใช้ยึดลวดอัดแรงในสมอยึด

### 4.3 ข้อควรคำนึงด้านความคงทน

ระบบอัดแรงภายหลังต้องทำการป้องกันการกัดกร่อนของลวดอัดแรงและสมอยึด โดยเฉพาะเมื่อต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง ควรทำการป้องกันกลุ่มลวดอัดแรงโดยการร้อยภายในท่อโพลีเอธิลีนหรือท่อเหล็กชุบสังกะสี ที่มีการเกราท์น้ำปูนเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของลวดอัดแรง ส่วนบริเวณปลายลวดอัดแรงและสมอยึด ควรทำการป้องกันโดยการเกราท์ปิด หรือหล่อปิด ด้วยคอนกรีต หรืออีพอกซี

ลวดอัดแรงเส้นเดี่ยวขณะใช้งานที่ไม่มีการสัมผัสกับแสงอาทิตย์ (แสงยูวี) อาจใช้ระบบท่ออัดจาระบี (grease and sheath system) เคลือบอยู่บนผิวลวดอัดแรงเพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยในบางกรณีมี

การผลิตท่อโพลีเอธิลีนที่ร้อยลวดอัดแรงพร้อมอัดจาระบีแบบสำเร็จรูปเพื่อใช้งานได้ด้วย นอกจากนี้ยังมีวิธีการป้องกันการกัดกร่อนอีกหลายวิธี เช่น การใช้เหล็ก หรือลวดเคลือบสังกะสี (galvanizing) หรือใช้สารเคลือบป้องกันสนิมบนลวด หรือเหล็กเสริมอัดแรง ส่วนสมอยึดปลายลวดอัดแรงอาจได้รับการป้องกันโดยหลายวิธีการ เช่น ใช้อีพอกซี หรือพลาสติก หรือระบบกัลวานิก การใช้พลาสติกมักได้รับความนิยมเนื่องจากประสิทธิภาพดีและราคาถูก ชุดประกอบสมอยึดประกอบไปด้วยกรวยพลาสติกสำหรับห่อหุ้มลวดอัดแรงบริเวณใกล้สมอยึดและหมวกพลาสติกสำหรับครอบปลายลวดอัดแรง

### 4.4 ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการทนไฟ

ระบบการเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายหลังต้องออกแบบให้มีการทนไฟเทียบเท่ากับโครงสร้างเดิม โดยปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างและระบบเสริมกำลังในกรณีที่โครงสร้างจะต้องเผชิญกับอุณหภูมิสูง คือ กำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น การขยายตัว ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ การล้า และการคลายหน่วยแรง (stress relaxation) ลวดอัดแรงที่ไม่ได้รับการป้องกันจะมีความเสี่ยงหากเกิดเพลิงไหม้ โดยทั่วไปกำลังของลวดอัดแรงจะลดลงครึ่งหนึ่งหากอุณหภูมิสูงประมาณ 427 °C (ACI 216R) ซึ่งเป็นอุณหภูมิวิกฤตสำหรับลวดอัดแรง ASTM E119 และ Post-Tensioning Manual (1990) แสดงผลการทดสอบการเผชิญไฟ ซึ่งสามารถใช้อ้างอิงในการวิเคราะห์การทนไฟสำหรับระบบอัดแรงภายหลังได้

การเกราท์น้ำปูนรอบลวดอัดแรง หรือการหล่อคอนกรีตหุ้มบริเวณลวดอัดแรง และสมอยึดถือเป็นวิธีการที่เพิ่มการทนไฟของระบบอัดแรงภายหลังได้ด้วย

ลวดอัดแรงบางประเภทจะได้รับการออกแบบเป็นกรณีพิเศษ เพื่อให้มีการทนไฟสูง ซึ่งมักเคลือบด้วยสารเคลือบทนไฟที่อาจมีความหนาประมาณ 25 มม. นอกจากนี้ควรปกป้องด้วยท่อร้อยลวดอัดแรง และระบบป้องกันการกัดกร่อนอื่น ๆ เช่น จาระบี หรือการเกราท์น้ำปูน

### 4.5 การใช้งาน

การเสริมกำลังโดยระบบอัดแรงภายหลังมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ในงานเสริมกำลังแผ่นพื้นทางเดียว แผ่นพื้นสองทางในอาคาร เสริมกำลังคานและแผ่นพื้นของที่จอดรถ เสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถาน เสริมกำลังคานยื่น เสริมกำลังองค์อาคารในโรงงานอุตสาหกรรม สนามกีฬา สะพานทั้งขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก รูปที่ 11 แสดงตัวอย่างการเสริมกำลังแผ่นพื้นด้วยวิธีการอัดแรงภายหลังภายนอก

**รูปที่ 11 การอัดแรงภายหลังภายนอกที่ใช้ในการเสริมกำลังแผ่นพื้น**

## 4.6 ประโยชน์และข้อจำกัด

### 4.6.1 ประโยชน์

ประโยชน์ของระบบเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายนอก คือ สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและความสามารถในการใช้งานขององค์อาคารที่ได้รับการเสริมกำลัง การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงเกิดจากผลของการอัดแรงภายหลังที่ทำหน้าที่ชดเชยหน่วยแรงดึงจากน้ำหนักบรรทุก หรือแรงกระทำอื่น ๆ และชดเชยการแอ่นตัวขององค์อาคาร โดยการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถยกระดับการรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคารที่ได้รับการเสริมกำลังให้สูงกว่าที่ออกแบบตามเดิม การเสริมกำลังโดยวิธีการอัดแรงภายหลังยังสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ เนื่องจากการอัดแรงจะช่วยปิดหรือลดความกว้างของรอยร้าวเดิมที่เคยมีอยู่ก่อนการอัดแรงได้ นอกจากนี้วิธีนี้ยังมีข้อได้เปรียบวิธีการเสริมกำลังโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาในเรื่องปริมาณการใช้วัสดุ แรงงาน และเวลาที่น้อยกว่า

### 4.6.2 ข้อจำกัด

ระบบการเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายหลังมีข้อจำกัดเรื่องความสะดวกในการทำงาน โดยทั่วไปโครงสร้างเดิมจะติดตั้งระบบประกอบต่าง ๆ เช่น ระบบเครื่องกล ระบบไฟฟ้า ระบบสุขาภิบาล และระบบปรับอากาศ เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปสรรคในการติดตั้งระบบอัดแรงภายหลัง ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องเป็นผู้ที่มีความชำนาญ และได้รับการฝึกอบรมเป็นอย่างดี ในบางครั้งมีความจำเป็นต้องเจาะโครงสร้างเดิมที่กีดขวางเส้นทางของลวดอัดแรง ดังนั้น จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และคำนึงถึงการรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคารที่ถูกเจาะตำแหน่งของสมอยึด ซึ่งไม่สามารถติดตั้งได้ที่ปลายองค์อาคารเสมอไป การวางทิศทางและตำแหน่งของระบบอัดแรงภายหลังซึ่งรวมถึงลวดอัดแรง สมอยึด และสมอปรับทิศทางต่าง ๆ ควรคำนึงถึงการปรับเปลี่ยนการใช้งานองค์อาคารในอนาคตด้วย

การเสริมกำลังโดยการอัดแรงภายหลังต้องคำนึงถึงข้อจำกัดที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงเกินไปจากการอัดแรงภายหลังที่เพิ่มแรงเข้าไปในระบบแรงภายในขององค์อาคารเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ในกรณีที่องค์อาคารมีสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุกจรสูง การอัดแรงภายหลังอาจทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่สูงเกินไปในช่วงที่องค์อาคารนั้นไม่มีน้ำหนักบรรทุกจรอยู่ เช่น ในช่วงเวลาที่ไม่มีการจราจรในกรณีของสะพาน ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคารโดยเพิ่มทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร จำเป็นต้องออกแบบให้การอัดแรงภายหลังกระทำเป็นหลายขั้นตอนไม่ใช่เพียงครั้งเดียว โดยเฉพาะหากมีการใช้ระบบอัดแรงภายหลังร่วมกับระบบการเสริมกำลังอื่น ๆ เช่น การลดช่วงคาน การเพิ่มขนาดหน้าตัดขององค์อาคาร หรือระบบคอมโพสิท

## ส่วนที่ 5 การเสริมกำลังโดยการเพิ่มจุดรองรับ

การเพิ่มองค์อาคารใหม่เข้าไปในระบบโครงสร้างเดิม โดยการเพิ่มจุดรองรับให้กับองค์อาคารเดิม ซึ่งจะช่วยลดผลของน้ำหนักบรรทุกหรือลดหน่วยแรงภายในขององค์อาคารเดิมได้ วิธีการนี้ถือเป็นระบบการเสริมกำลังโครงสร้างเช่นเดียวกัน การเพิ่มองค์อาคารใหม่หรือจุดรองรับนี้ อาจอยู่ในรูปแบบของคาน เสา หรือระบบโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหลายองค์อาคารได้เช่นเดียวกัน ในบางกรณีการเพิ่มองค์อาคารใหม่นอกจากจะช่วยลดหน่วยแรงภายในองค์อาคารเดิมแล้ว ยังสามารถออกแบบให้องค์อาคารใหม่เปลี่ยนเส้นทางการถ่ายแรงของโครงสร้างเดิมได้ ซึ่งในกรณีหลังเหมาะสำหรับโครงสร้างเดิมที่มีความเสียหายรุนแรงและไม่คุ้มค่าที่จะซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง จึงเพิ่มองค์อาคารใหม่เพื่อเปลี่ยนเส้นทางการถ่ายแรงไม่ให้ผ่านชิ้นส่วนที่มีความเสียหายนั้น

การเพิ่มองค์อาคารใหม่นอกจากจะช่วยลดหน่วยแรงภายใน เช่น แรงเฉือน และแรงดัดแล้วยังช่วยเพิ่มกำลังและสติฟเนสของโครงสร้างเดิมด้วย รวมถึงเพิ่มกำลังต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้างซึ่งประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มองค์อาคาร หรือการเพิ่มจุดรองรับจะขึ้นอยู่กับการออกแบบ และการให้รายละเอียด รวมถึงการเลือกวัสดุ และวิธีการติดตั้งด้วย รูปที่ 12 แสดงตัวอย่างการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างพื้นด้วยการติดตั้งคานเหล็กเพิ่มเติม

### 5.1 ข้อพิจารณาด้านวิศวกรรม

โดยทั่วไปการออกแบบขนาดขององค์อาคารใหม่ที่เพิ่มขึ้น วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณากำลังขององค์อาคารใหม่ว่าเพียงพอกับหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นหรือไม่ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากกำลังขององค์อาคารแล้ว ปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งสำหรับการออกแบบขนาดของชิ้นส่วน ได้แก่ สติฟเนสขององค์อาคารใหม่จะส่งผลต่อการถ่ายแรงจากการรับน้ำหนักบรรทุกระหว่างโครงสร้างเดิมและองค์อาคารใหม่ โดยทั่วไปองค์อาคารที่มีสติฟเนสสูงกว่าจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า ทำให้การถ่ายน้ำหนักของระบบโครงสร้างภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้เปลี่ยนไป วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบแรงภายในที่เปลี่ยนไปด้วย

**รูปที่ 12 การติดตั้งคานเหล็กเพิ่มเติมเพื่อเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างพื้น**

การเลือกวัสดุในการก่อสร้างองค์อาคารใหม่ นอกจากการออกแบบกำลังและสติฟเนสแล้ว วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุขององค์อาคารใหม่กับโครงสร้างเดิมด้วย ซึ่งการเข้ากันได้ของวัสดุนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวม และความคงทนของโครงสร้างภายหลังการเสริมกำลัง

ข้อพิจารณาของวิศวกรผู้ออกแบบที่สำคัญสำหรับการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้คือ ต้องตรวจสอบเส้นทางการถ่ายแรงที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเพิ่มองค์อาคารใหม่ และพิจารณาว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกินกว่ากำลังของวัสดุหรือไม่ เช่น เมื่อมีการก่อสร้างเสา (หรือจุดรองรับ) ใหม่เพิ่มขึ้นระหว่างช่วงคานเดิมจะช่วยลดระยะช่วงคานได้ แต่วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบคานบริเวณจุดเชื่อมต่อที่เป็นจุดรองรับใหม่นี้ด้วยว่ากำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดบริเวณนั้นเพียงพอกับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นและแรงดัดที่เปลี่ยนทิศไปหรือไม่

รอยต่อระหว่างองค์อาคารใหม่และโครงสร้างเดิมจะต้องออกแบบให้สามารถถ่ายแรง และรับแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างองค์อาคารทั้งสองได้ วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้รอยต่อได้หลายประเภท เช่น รอยต่อที่ยึดด้วยสกรู รอยต่อที่ยึดด้วยกาวหรือผลิตภัณฑ์ทางเคมี และรอยต่อที่อาศัยแรงเสียดทาน อย่างไรก็ตามจะต้องเลือกประเภทและรูปแบบของรอยต่อให้เหมาะสม และหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อเหล็กเสริมในองค์อาคารที่อาจจะเกิดขึ้นจากการเจาะยึดรอยต่อ

นอกจากนี้ประเภทรอยต่อที่เลือกใช้บริเวณหน้ารอยต่อระหว่างองค์อาคารเดิมและองค์อาคารใหม่จะต้องเชื่อมต่อกันสนิท เพื่อให้การถ่ายแรงเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในบางกรณีการหดตัวของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะเว้นช่องว่างระหว่างรอยต่อไว้โดยการตั้งจุดรองรับเพิ่มเติมแล้วทำการอัดส่วนผสมปูนที่ไม่มีการหดตัว (non-shrink grout) เข้าไปเมื่อส่วนผสมปูนนี้แข็งตัวดีแล้ว บริเวณรอยต่อจึงจะแนบสนิทได้ดี นอกจากนี้บริเวณสถานที่ก่อสร้างที่สามารถพิจารณายกองค์อาคารเก่าขึ้น หรือเอาน้ำหนักบรรทุกออกให้มากที่สุด เพื่อที่จะช่วยให้รอยต่อแนบสนิทได้ดีขึ้น รวมทั้งช่วยให้องค์อาคารใหม่รับน้ำหนักบรรทุกได้ทันทีภายหลังการเสริมกำลังโครงสร้าง โดยทั่วไปแล้วนอกจากแรงในแนวดิ่งหรือแนวแกน รอยต่อจะต้องสามารถถ่ายแรงเฉือนในแนวราบได้ ซึ่งในกรณีนี้จะต้องออกแบบสลักหรือเหล็กเดือยเพื่อรับแรงเฉือนให้เพียงพอ

## 5.2 วิธี และวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง

5.2.1 การลดความยาวองค์อาคาร สามารถทำได้หลายรูปแบบ ดังนี้

(1) การติดตั้งจุดรองรับใหม่ระหว่างช่วงความยาวองค์อาคารเดิม ซึ่งจุดรองรับใหม่นี้อาจเป็นรูปแบบของเสา ค้ำยันในแนวทแยง ค้ำยันทางด้านข้างของคาน ซึ่งวัสดุที่ใช้อาจเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ หรือโครงสร้างเชิงประกอบ ซึ่งเทคนิคการเสริมกำลังโดยการลดความยาวช่วงของโครงสร้างจะเหมาะสำหรับกรณีที่โครงสร้างเดิมมีกำลังรับแรงดัดไม่เพียงพอ โดยที่ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของโครงสร้าง สภาวะการยึดรั้ง และอัตราส่วนระหว่างความยาวช่วงเดิมต่อความยาวช่วงที่ลดค่าแล้ว เช่น การลดความยาวช่วงคานลงครึ่งหนึ่ง แรงเฉือนของคานภายหลังการลดความยาวช่วงแล้วจะเหลือเพียงครึ่งเดียว ในขณะที่แรงดัดจะเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของแรงดัดก่อนที่จะมีการลดความยาวช่วงคาน

(2) กรณีที่ช่วงคานไม่ได้ยาวมากสามารถลดความยาวช่วงคานลงได้โดยการติดตั้ง knee braced ที่บริเวณหัวเสา อย่างไรก็ตามวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาถึงแรงเฉือนและแรงดัดที่เปลี่ยนไปภายใต้สภาวะที่มี knee braced ด้วย

(3) การยึดรั้งทางด้านข้างของโครงสร้างเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ลดความยาวช่วงของโครงสร้างได้ ซึ่งทำได้โดยติดตั้งองค์อาคารอีกชิ้นในแนวขวางกับความยาวช่วงคาน โดยองค์อาคารนี้จะยึดติดกับโครงสร้างเดิม หรืออาจจะทำการติดตั้งเสาใหม่เพื่อมารับองค์อาคารอีกชิ้นส่วนก็ได้

อย่างไรก็ตามการลดความยาวช่วงของโครงสร้างในรูปแบบเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะทำให้เสียพื้นที่ในแนวราบ หรือแนวดิ่ง รวมถึงทำให้ความสวยงามทางสถาปัตยกรรมของโครงสร้างโดยรวมลดลงไปด้วย

5.2.2 การเพิ่มระบบโครงเฟรมลงในโครงสร้างเดิม

การเสริมกำลังโครงสร้างโดยการเพิ่มระบบโครงเฟรมสามารถเปลี่ยนเส้นทางการถ่ายแรงทำให้องค์อาคารเกิดความเสียหายน้อยลงจากการรับน้ำหนักบรรทุก การเพิ่มระบบโครงเฟรมอาจเพิ่มเพียงองค์อาคารเดียว หรืออาจใช้หลายองค์อาคารประกอบกันได้ ตัวอย่างของการเพิ่มระบบโครงเฟรม ได้แก่

(1) การเพิ่มคานคอนกรีต หรือคานเหล็กระหว่างช่วงคานเดิม โดยน้ำหนักบรรทุกที่เข้าสู่คานใหม่จะถูกถ่ายแรงไปยังจุดรองรับที่มีอยู่แล้ว หรืออาจจะสร้างจุดรองรับใหม่ขึ้นมาก็ได้เช่นเดียวกัน

(2) การเพิ่มโครงเฟรม หรือค้ำยันให้โครงสร้างเดิมจะช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงด้านข้างให้มากขึ้น ซึ่งน้ำหนักบรรทุกจากด้านข้างที่กระทำกับโครงสร้าง ได้แก่ แรงลม แรงแผ่นดินไหว หรือแรงระเบิด

การเลือกใช้วัสดุสำหรับระบบโครงเฟรม โดยทั่วไปแล้วจะต้องเลือกใช้ระบบโครงเฟรมที่สามารถเข้ากันได้กับโครงสร้างเดิม และมีพื้นที่ว่างที่สามารถทำการติดตั้งได้ นอกจากนี้จะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการทนไฟ ราคา และความสวยงาม ในกรณีที่ต้องมีการเสริมกำลังโดยเร่งด่วน การเลือกใช้ระบบโครงเฟรมที่เป็นโครงสร้างเหล็กเป็นทางเลือกที่ดี แต่มีข้อจำกัดในการติดตั้งที่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษที่มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเหล็กมีน้ำหนักมาก รวมทั้งในกรณีที่มีความยาวของโครงสร้างเหล็กมาก ๆ จะมีอุปสรรคในการขนส่ง

ในขณะที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถหล่อในที่ได้ จึงไม่มีข้อจำกัดในเรื่องดังกล่าว รวมถึงสามารถหล่อให้เป็นรูปทรงที่เข้ากับระบบโครงสร้างเดิมได้ดีกว่า นอกจากนี้คอนกรีตยังเป็นวัสดุที่มีความคงทน และสามารถทนไฟได้ดีกว่าโครงสร้างเหล็ก

5.2.3 การเสริมกำลังโดยการขยายจุดรองรับ

ในกรณีที่เกิดความเสียหายบริเวณจุดรองรับขององค์อาคารจะต้องหาสาเหตุของความเสียหายและทำการซ่อมแซมให้ถูกวิธีก่อนที่จะทำการเสริมกำลังบริเวณจุดรองรับ การขยายพื้นที่หรือขยายมิติของจุดรองรับเป็นวิธีการที่ใช้เพิ่มกำลังขององค์อาคารบริเวณจุดรองรับ โดยเฉพาะสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแบกทานระหว่างองค์อาคารและจุดรองรับให้สูงขึ้น การขยายจุดรองรับสามารถทำได้โดยการใช้เหล็กแผ่นเสริมเข้าไปบริเวณที่เป็นจุดรองรับเดิม หรือขยายหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณจุดรองรับนั้น

สำหรับการยึดเกาะระหว่างจุดรองรับเดิมกับองค์อาคารใหม่ที่ใช้ในการขยายจุดรองรับเดิมโดยทั่วไปจะใช้การยึดทางกล หรือการยึดโดยเคมีภัณฑ์ โดยจะต้องออกแบบรายละเอียดจุดต่อให้สามารถรับแรงที่จะเกิดขึ้นบริเวณจุดรองรับ ทั้งนี้รวมถึงแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และการขยายตัวและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ

**5.3 ข้อพิจารณาด้านความคงทน**

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคงทนของระบบเสริมกำลังโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมรุนแรง เช่น สภาวะด่าง น้ำทะเล สารเคมี รังสียูวี ความชื้นและอุณหภูมิที่สูง รวมทั้งวัฏจักรเยือกแข็งและหลอมเหลวจะทำให้สมบัติของวัสดุลดลง ดังนั้นการออกแบบระบบการเสริมกำลังโดยการเพิ่มจุดรองรับจะต้องพิจารณาสมบัติทางกลของวัสดุ เพื่อชดเชยการเสื่อมสภาพของวัสดุเมื่อต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่มีการทำลายและการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น ๆ

การเลือกวิธีป้องกันไม่ให้วัสดุที่นำมาใช้ในการเสริมกำลังต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมรุนแรงโดยตรงอย่างเหมาะสมสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุเสริมกำลังได้

ดังนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาเลือกวัสดุ รวมทั้งวิธีป้องกันวัสดุจากการเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นได้จากสภาวะแวดล้อม เช่น เมื่อมีการใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กในการเสริมกำลังควรจัดให้มีระบบป้องกันไม่ให้เกิดสนิมเหล็ก

**5.4 ข้อพิจารณาด้านการทนไฟ**

การเสริมกำลังโดยการเพิ่มจุดรองรับในระบบโครงสร้างเดิมต้องพิจารณาถึงการป้องกัน หรือการเพิ่มความสามารถในการทนไฟให้กับองค์อาคารที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะหากระบบโครงสร้างภายหลังการเสริมกำลังมีการถ่ายแรงไปที่โครงสร้างใหม่โดยตรง ในกรณีที่การทนไฟเป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาเลือกใช้วิธีการเสริมกำลัง หรือในกรณีที่โครงสร้างที่เสริมกำลังต้องการความสามารถในการทนไฟเป็นพิเศษ ควรหลีกเลี่ยงการใช้การยึดโดยใช้วัสดุเคมีภัณฑ์ เนื่องจากสมบัติของวัสดุเคมีภัณฑ์จะเสียไปอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง

### 5.5 ตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มจุดรองรับ

โครงสร้างพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแอ่นตัวและเกิดรอยร้าวเนื่องจากช่วงความยาวพื้นมีระยะยาวเกินไป รวมถึงน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานจริงมีมากกว่าที่ออกแบบไว้ วิศวกรผู้ออกแบบได้เลือกใช้วิธีการติดตั้งคานเหล็กเพื่อเพิ่มจุดรองรับให้กับโครงสร้างเดิม ดังแสดงในรูปที่ 12 การติดตั้งคานเหล็กทำให้ช่วงความยาวพื้นมีระยะลดลง ส่งผลให้โมเมนต์บวกที่โครงสร้างพื้นต้องรับมีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบว่าปริมาณเหล็กเสริมในโครงสร้างพื้นเดิมเพียงพอสำหรับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างพื้นบริเวณโดยรอบคานเหล็กที่ติดตั้งเข้าไปใหม่ รวมทั้งตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวด้วย

### 5.6 ประโยชน์และข้อจำกัด

วิธีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มจุดรองรับเหมาะสำหรับโครงสร้างเดิมที่มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกกำลังรับแรงเฉือน แรงดัด หรือแรงบิดไม่เพียงพอ ซึ่งต้องแก้ไขด้วยการลดแรงที่จะถ่ายเข้าสู่องค์อาคารเดิม นอกจากนี้ยังสามารถใช้เสริมกำลังโครงสร้างที่มีปัญหาเรื่องการแอ่นตัว และรอยร้าวที่มากเกินค่าที่ยอมรับได้ในสภาวะใช้งาน การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้ใช้วิธีการก่อสร้างรวมถึงวัสดุที่ไม่แตกต่างไปจากการก่อสร้างทั่วไป ผู้ปฏิบัติงานมีความคุ้นเคยกับการเสริมกำลังโดยวิธีนี้อยู่แล้ว องค์อาคารใหม่ที่เพิ่มขึ้นในการเสริมกำลังจะช่วยในการรับน้ำหนักบรรทุกบางส่วนหรือทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบของวิศวกร และถือว่าองค์อาคารใหม่ที่เพิ่มขึ้นเป็นองค์อาคารหลักในการรับน้ำหนักบรรทุกได้เช่นเดียวกับองค์อาคารอื่น ๆ

เมื่อเลือกใช้การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้จะต้องพิจารณาเลือกประเภท และวัสดุของรอยต่อระหว่างองค์อาคารใหม่และองค์อาคารเดิมให้เหมาะสม หากมีการเจาะยึดรอยต่อจะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดความเสียหายต่อเหล็กเสริมในองค์อาคารที่ถูกเจาะยึดด้วย

อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังโดยการเพิ่มองค์อาคารใหม่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ใช้สอย และโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ในบางกรณีอาจต้องออกแบบและก่อสร้างฐานรากใหม่เพื่อรองรับองค์อาคารใหม่ โดยทั่วไปการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาค่อนข้างมาก และมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการเสริมกำลังวิธีอื่น

# บรรณานุกรม


- American Concrete Institute (ACI), "Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements (ACI 216R)", 1989.
- American Concrete Institute (ACI), "Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies (ACI 216.1)", 2014.
- American Concrete Institute (ACI), "Guide for Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation (ACI 364.1R)", 2007.
- American Concrete Institute (ACI), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318)", 2014.
- American Concrete Institute (ACI), "Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings (ACI 437R)", 2003.
- American Concrete Institute (ACI), "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R)", 2017.
- American Concrete Institute (ACI), " Guide to Concrete Repair (ACI 546R)", 2014.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), "Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings (SEI-ASCE 11-99)", 2000.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Practice for Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service (ASTM C581)", 2015.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water (ASTM D1141)", 2013.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings in 100 % Relative Humidity (ASTM D2247)", 2015.

- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load (ASTM D3045)", 2018.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions (ASTM E104)", 2012.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials (ASTM E119)", 2007.
- International Concrete Repair Institute (ICRI), "Guide for the Selection of Strengthening Systems for Concrete Structures (ICRI Guideline No. 03742)", 2006
- International Concrete Repair Institute (ICRI), "Guide for Using In-Situ Tensile Pull Off Tests to Evaluate Bond of Concrete Surface Materials (ICRI 210.3R)", 2013
- International Concrete Repair Institute (ICRI), "Guideline for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion (ICRI 310.1R)", 2008.
- International Concrete Repair Institute (ICRI), "Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation (ICRI 310.2R)", 2013.
- International Concrete Repair Institute (ICRI), "Guide for Selecting and Specifying Materials for Repair of Concrete Surfaces (ICRI 320.2R)", 2018.
- ICC (ICBO) Evaluation Service (AC125) 2003, Interim criteria for concrete and reinforced and unreinforced masonry strengthening using fibre-reinforced polymer (FRP), composite system: 3-10: California: USA.
- Wollman, G., and Wollman, C., "Anchorage Zone Design, Repair of Chapter V, III," Post-Tensioning Manual, Sixth Edition, Post-Tensioning Institute, Phoenix, AZ, 2000.
- Zia, P., Preston, H., Scott, N. and Workman, E., "Estimating Prestress Losses", Concrete International, V. 19, No. 6, 1979, pp. 32-38.
- Post-Tensioning Institute (PTI), "Post-Tensioning Manual, Sixth Edition", Phoenix, AZ, 1990.

- American Concrete Institute (ACI) International, BRE, Concrete Society and ICRI, "Guide to the Maintenance, Repair and Monitoring of Reinforced Concrete Structures, Concrete Repair Manual", 2nd Edition, ISBN: 0-87031-105-0, 1: pp. 691-736.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง, "มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1303-57)"
- กรมโยธาธิการและผังเมือง, "มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (มยผ. 1508-51)"
- กรมโยธาธิการและผังเมือง, "มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต (มยผ. 1901-51)"

**ภาคผนวก ก.**

**ตัวอย่างการเสริมกำลังโดยวิธีการขยายหน้าตัด**

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 250 มม.×250 มม. เสริมด้วยเหล็กชั้นคุณภาพ SD 40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. จำนวน 4 เส้น และมีเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ระยะเรียงทุกๆ 250 มม. ดังแสดงในรูปที่ 13 จากการทดสอบแบบไม่ทำลายพบว่าค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 250 กก./ซม.$^2$ ในกรณีที่รูปแบบการใช้งานของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เสาต้นนี้จะต้องรับแรงประลัยในแนวแกนเท่ากับ 160 ตัน ร่วมกับโมเมนต์ดัดประลัย 9 ตัน-เมตร วิศวกรจะต้องตรวจสอบว่าเสาเดิมมีกำลังเพียงพอหรือไม่ ถ้าไม่เพียงพอจะต้องออกแบบการเสริมกำลังเสาต้นนี้ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวได้

(1) ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนของเสาเดิม เมื่อเสารับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนเพียงอย่างเดียว

$$\phi P_n = \phi[0.85f_c'(A_g-A_{st})+f_yA_{st}] \quad (1)$$

$$= 0.7[0.85\times250(625-4\times2.01)+4000\times4\times2.01] \text{ กก.}$$

$$= 114.28 \text{ ตัน} < 160 \text{ ตัน}$$

เนื่องจากเสาต้นดังกล่าวมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบการเสริมกำลัง โดยในที่นี้จะเลือกการเสริมกำลังโดยวิธีการพอกคอนกรีต

โดยข้อกำหนดพื้นฐานที่แนะนำโดย ACI International and ICRI ระบุว่า

- ระยะพอกขั้นต่ำในแต่ละด้าน = 100 มม.
- ขนาดเหล็กเสริมเล็กที่สุดที่ใช้ในบริเวณที่มีการพอกคอนกรีต = 16 มม.
- จำนวนเหล็กเสริมที่ใช้ในบริเวณที่มีการพอกคอนกรีตอย่างน้อย = 4 เส้น
- ขนาดเหล็กปลอกเล็กที่สุดที่ใช้ในบริเวณที่มีการพอกคอนกรีต = 9 มม.
- ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกไม่เกิน 100 มม.

และที่แนะนำโดย มยผ. 1303-57 ระบุว่า

- กำลังอัดของคอนกรีตใหม่ที่นำมาพอกต้องมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อเสาเดิม
- ความหนาของคอนกรีตใหม่ที่นำมาพอกต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 100 มม. ในแต่ละด้าน และให้ทำการพอกโดยรอบเสาทั้งสี่ด้าน
- พื้นที่หน้าตัดเหล็กยืนของเหล็กเสริมหลักควรอยู่ระหว่างร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 4 ของพื้นที่ทั้งหมดที่พอก

- ใช้เหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 มม.ขึ้นไปบริเวณหัวเสา
- เหล็กปลอกที่ใช้ในบริเวณที่มีการพอกคอนกรีตใหม่ต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.ขึ้นไป หรือไม่เล็กกว่าหนึ่งในสามของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยืนที่ใหญ่ที่สุดของหน้าตัดเสาเดิม

จากข้อกำหนดดังกล่าว เบื้องต้นสามารถกำหนดขนาดหน้าตัดใหม่ภายหลังการพอกคอนกรีตได้ดังนี้ (250+100+100)×(250+100+100) หรือ = 450×450 มม.

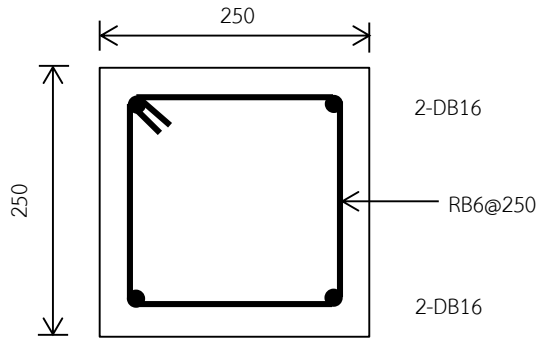
โดยเลือกใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากับของโครงสร้างเสาเดิม = 250 กก./ซม.$^2$

สมมติให้ใช้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลักในแนวแกน = 1%×ของพื้นที่คอนกรีตที่พอกใหม่

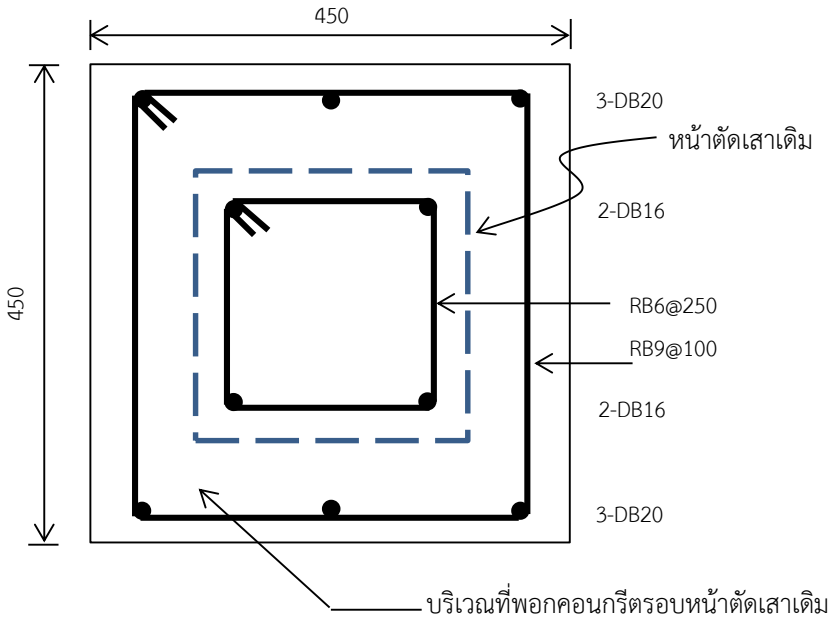
$= 0.01\times[(450\times450)-(250\times250)]$ มม$^2$

$= 1400$ มม$^2$

ถ้าเลือกใช้เหล็ก DB20 จะต้องใช้ทั้งหมด = 1400/314 ≈ 5 เส้น แต่เพื่อให้การเสริมเหล็กมีความสมมาตร จะใช้เหล็ก DB20 ทั้งหมด 6 เส้นในบริเวณที่มีการพอกคอนกรีตใหม่ และมีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณที่พอกคอนกรีตใหม่เป็นไปตามที่ระบุไว้ใน มยผ. 1303-57 โดยใช้เหล็กปลอกกลมขนาด 9 มม. โดยมีระยะห่าง 100 มม. ดังแสดงในรูปที่ 14

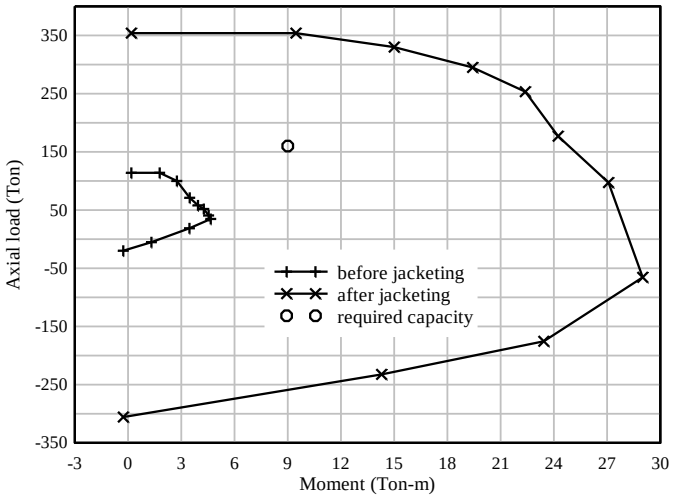



**รูปที่ 13 หน้าตัดเสาก่อนเสริมกำลัง (หน่วย มม.)**




**รูปที่ 14 หน้าตัดเสาที่เสริมกำลังโดยการพอกคอนกรีต (หน่วย มม.)**

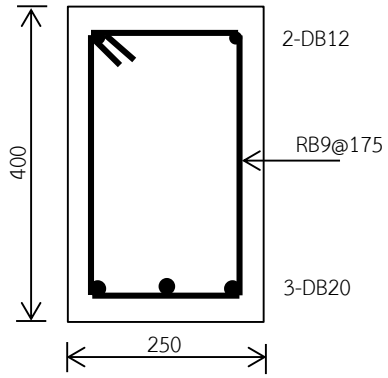
เมื่อกำหนดขนาดของคอนกรีตที่พอกใหม่และระบุเหล็กเสริมขั้นต่ำซึ่งระบุไว้ใน มยผ. 1303-57 วิศวกรผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนและกำลังรับแรงดัดเพื่อใช้สร้าง P-M diagram ของเสาภายหลังที่มีการพอกคอนกรีตแล้วได้โดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ เช่น การคำนวณตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (วสท.) การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์หน้าตัด หรือการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลีเมนต์ในกรณีที่ต้องการศึกษาพฤติกรรมอย่างละเอียดของเสาที่เสริมกำลังด้วยการพอกคอนกรีต อย่างไรก็ตามในตัวอย่างการคำนวณนี้ได้แสดง P-M diagram ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป โดย P-M diagram ของเสาก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยการพอกคอนกรีตแสดงในรูปที่ 15 โดยที่ค่าแรงในแนวแกนประลัยและแรงดัดประลัยที่เสาต้นนี้รับได้แสดงเทียบกับ P-M diagram จะเห็นได้ว่าค่าแรงประลัยที่เสาต้นนี้ต้องรับอยู่ภายใต้ P-M diagram ของเสาที่เสริมกำลังด้วยการพอกคอนกรีตที่ได้ออกแบบตามข้อกำหนดพื้นฐานที่ให้ไว้โดย มยผ. 1303-57 นั่นแสดงให้เห็นว่าเสาต้นนี้เมื่อทำการพอกคอนกรีตตามที่ได้ออกแบบไว้สามารถรับแรงประลัยดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย ทั้งนี้การวิเคราะห์ P-M diagram ดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าคอนกรีตที่พอกเข้าไปใหม่มีการยึดเกาะอย่างสมบูรณ์กับคอนกรีตเดิม ดังนั้นในการเสริมกำลังโดยการพอกคอนกรีต ผู้ที่ทำการเสริมกำลังจะต้องเตรียมผิวคอนกรีตเก่าก่อนที่จะมีการติดตั้งเหล็กเสริมใหม่และการพอกคอนกรีต โดยวิธีการเตรียมผิวนี้ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน มยผ. 1901-51




**รูปที่ 15 P-M diagram ของเสาก่อนที่จะมีการเสริมกำลังและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกคอนกรีต**

**ตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยการติดพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก**

คานคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารจอดรถที่มีขนาดหน้าตัด 250 มม. × 400 มม. เสริมเหล็กรับแรงดึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. จำนวน 3 เส้น เหล็กรับแรงอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จำนวน 2 เส้น และเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. วางที่ระยะห่าง 175 มม. ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยคอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 320 กก./ซม.$^2$ มีระยะหุ้มคอนกรีตเท่ากับ 25 มม. จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าคานต้องรับแรงดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยเท่ากับ 12.5 ตัน-เมตร. และ10 ตัน ตามลำดับ วิศวกรจะต้องตรวจสอบว่าคานสามารถรับแรงประลัยดังกล่าวได้หรือไม่ หากคานมีกำลังไม่เพียงพอจะต้องออกแบบการเสริมกำลังให้สามารถรับแรงประลัยดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย




**รูปที่ 16 ขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กในคานก่อนที่จะมีการเสริมกำลัง (หน่วย มม.)**

**(1)** ตรวจสอบกำลังรับแรงดัดประลัยของหน้าตัดคานก่อนที่จะมีการเสริมกำลัง

$d = 400-25-9-10 = 356$ มม.

$d' = 25+9+6 = 40$ มม.

$A_s = 3\times\pi\times(20^2/4) = 942$ มม.$^2$

$A_s' = 2\times\pi\times(12^2/4) = 226$ มม.$^2$

- สมมติให้เหล็กรับแรงดึงถึงจุดคราก และตรวจสอบว่าเหล็กรับแรงอัดถึงจุดครากหรือไม่ จาก

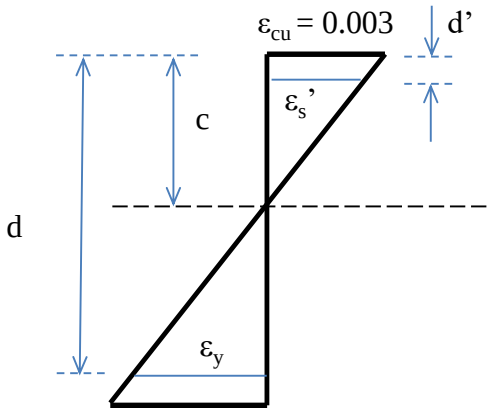
$$\rho-\rho' \geq 0.85\beta \frac{f_c'}{f_y}\left(d'/d\right)\left(6120/6120-f_y\right) \qquad (2)$$

$$\rho-\rho' = \frac{A_s-A_s'}{bd} = \frac{942-226}{250\times356} = 0.008$$

$$\beta = 0.85-0.05\frac{(f_c'-280)}{70} = 0.821$$

$$0.85\beta \frac{f_c'}{f_y}\left(d'/d\right)\left(6120/6120-f_y\right) = 0.0188$$

0.008 < 0.018 ดังนั้นเหล็กรับแรงอัดยังไม่ถึงจุดคราก




**รูปที่ 17 ความสอดคล้องของความเครียดบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนการเสริมกำลัง**

จากความสอดคล้องของความเครียดบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 17 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดได้ดังนี้

$$\varepsilon_s' = \frac{0.003}{c}(c-4) \qquad (3)$$

จากสมดุลย์ของแรงภายในหน้าตัด

$$0.85f_c'ab+A_s'f_s' = A_sf_y \qquad (4)$$

$0.85\times320\times(0.821c)\times25+2.26\times(2.04\times10^{6}\varepsilon_s') = 9.42\times4000$

แทนค่า $\varepsilon_s'$ จาก สมการที่ 3 ลงใน สมการที่ 4 จะได้ $c$ = 5.94 ซม.

แทนค่า $c$ ลงในสมการที่ 3 จะได้ $\varepsilon_s'$ = 0.00098 มม./มม.

$\therefore f_s' = 2.04\times10^{6}\times0.00098 = 1{,}999$ กก./ซม.$^2$

- ตรวจสอบว่าเหล็กรับแรงดึงถึงจุดครากเป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานไว้หรือไม่จาก

$$\bar{\rho}_b = \rho_b + \rho' \frac{f_s'}{f_y} \quad (5)$$

โดยที่ $$\rho_b = 0.85\beta \frac{f_c'}{f_y}\left(\frac{6120}{6120+f_y}\right) \quad (6)$$

$$\therefore \rho_b = 0.0338$$

แทนค่า $\rho_b$ ลงในสมการที่ 5 จะได้

$$\bar{\rho}_b = 0.0338 + \frac{226}{250\times356}\times\left(\frac{1999}{4000}\right)$$

$$\bar{\rho}_b = 0.035$$

$$\therefore \rho = \frac{942}{250\times356} = 0.01 < \bar{\rho}_b$$

ดังนั้นเหล็กรับแรงดึงครากตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

เมื่อเหล็กรับแรงดึงถึงจุดคราก แต่เหล็กรับแรงอัดไม่ถึงจุดคราก สามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดัดได้ตามสมการที่ 7

$$\phi M_n = \phi\left[0.85f_c'ab\left(d-\frac{a}{2}\right)+A_s'\left(f_s'-0.85f_c'\right)\left(d-d'\right)\right] \quad (7)$$

$$\therefore \phi M_n = 0.9\left[0.85\times320\times4.88\times25\left(35.6-\frac{4.88}{2}\right)+2.26\left(1999-0.85\times320\right)\left(35.6-4\right)\right]$$

$\phi M_n$= 11 ตัน-เมตร จะเห็นได้ว่าหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมมีกำลังรับแรงดัดไม่เพียงพอ วิศวกรผู้ออกแบบจึงต้องออกแบบการเสริมกำลัง ในตัวอย่างนี้ขอยกตัวอย่างการคำนวณออกแบบการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก

(2) การออกแบบการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก

การออกแบบในส่วนนี้จะอ้างอิงถึงข้อกำหนดและสมการการออกแบบตามที่ได้ให้ไว้ใน ACI 440.2R และใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนความหนา 1.4 มม. ที่มีความกว้างต่อ 1 แผ่นเท่ากับ 50 มม. และมีสมบัติทางกลดังต่อไปนี้

โมดูลัสยืดหยุ่น = 300,000 เมกาปาสกาล

ความเค้นประลัย = 1,300 เมกาปาสกาล

ความเครียดประลัย = 0.45%

วิศวกรผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงผลกระทบของสภาพแวดล้อมในระยะยาวที่อาจส่งผลให้ความเค้นประลัยและความเครียดประลัยของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าลดลง โดยการปรับลดค่าดังกล่าวด้วยตัวคูณปรับลดค่าเนื่องจากผลของสภาพแวดล้อม ($c_E$) โดยค่า $c_E$ ขึ้นกับลักษณะของสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างตั้งอยู่ และชนิดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 2 จากตัวอย่างนี้ลักษณะสภาพแวดล้อมของโครงสร้างอาคารจอดรถ จะเป็นแบบภายนอกอาคาร และเลือกใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดคาร์บอน $c_E$ จะมีค่าเท่ากับ 0.85

ดังนั้น

ความเค้นประลัยออกแบบ $f_{fu}$ = 0.85×1,300 = 1,105 เมกาปาสกาล

ความเครียดประลัยออกแบบ $\varepsilon_{fu}$= 0.85×0.0045 = 0.0038มม./มม.

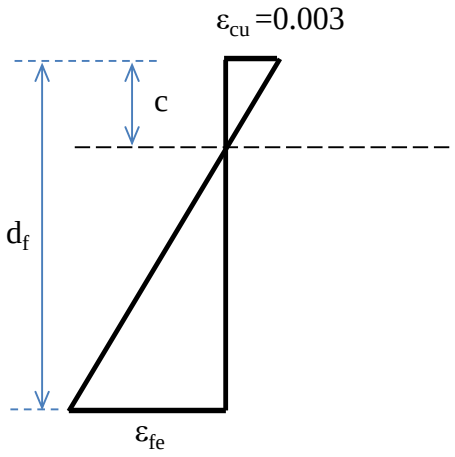
- เพื่อป้องกันการวิบัติจากการหลุดร่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ACI 440.2R แนะนำให้จำกัดค่าความเครียดในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่ให้มีค่าเกิน $\varepsilon_{fd}$ ที่คำนวณจากสมการที่ 8

$$\varepsilon_{fd} = 0.41\sqrt{f_c' / nE_f t_f} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \qquad (8)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41\sqrt{31.38 / 1\times300,000\times1.4} \leq 0.9\times0.0038 \text{ มม./มม.}$$

$\varepsilon_{fd}$ =0.0035>0.0034 ดังนั้น $\varepsilon_{fd}$ = 0.0034 มม./มม.

จากรูปที่ 18 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและตำแหน่งบนหน้าตัดได้ดังสมการที่ 9 โดยสมมติให้คอนกรีตเกิดการแตกบดอัด (Crushing) ที่ความเครียดเท่ากับ 0.003 มม./มม.




**รูปที่ 18 ความสอดคล้องของความเครียดบนหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเสริมกำลัง**

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \le \varepsilon_{fd} \quad (9)$$

โดยที่ $\varepsilon_{fe}$ คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$\varepsilon_{cu}$ คือ ค่าความเครียดของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตแตกบดอัด (Crushing strain)

$\varepsilon_{bi}$ คือ ค่าความเครียดที่ผิวล่างของคานตั้งต้นก่อนที่จะมีการเสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะมีการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก ควรที่จะทำการลดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งในคอนกรีตและเหล็กเสริมลงให้น้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยการให้แรงกระทำในทิศตรงข้ามกับแรงที่โครงสร้างจะต้องรับในสภาวะปกติ ดังนั้นค่า $\varepsilon_{bi}$ ในตัวอย่างนี้จึงอนุโลมว่ามีค่าเท่ากับศูนย์

อย่างไรก็ตามในการคำนวณค่า $\varepsilon_{fe}$ วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนวณค่า $c$ จากหลักการสมดุลย์ของแรงภายใน และความสอดคล้องของความเครียดในแต่ละตำแหน่งบนหน้าตัด ดังแสดงในสมการที่ 10 และ 11

$$0.85f'_c(\beta c)b + A'_s E\varepsilon_s = A_s f_y + b_f t_f E_f \varepsilon_{fe} \quad (10)$$

โดยที่ $E_f$, $b_f$ และ $t_f$ คือโมดูลัสยืดหยุ่น, ความกว้าง และความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ตามลำดับ

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_y (c-d')/(d-c) \quad (11)$$

ในเบื้องต้นสมมติเลือกใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จำนวน 1 แผ่น ที่มีความหนา 1.4 มม. และความกว้าง 50 มม.

จากการแก้สมการที่ 10 และ 11 โดยที่ค่า $\varepsilon_y$ =4,000/(2.04×10$^6$)=0.00196 มม./มม. จะได้ค่า $c$ = 9.886 ซม. และ $\varepsilon_s'$ = 0.00045 มม./มม.

จากสมการที่ 9 สามารถคำนวณ $\varepsilon_{fe}$ ได้ดังนี้

$$\varepsilon_{fe} = 0.003\times(40-9.886) / 9.886$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.00914 > \varepsilon_{fd} (=0.0034)$$

$$\therefore \varepsilon_{fe} = 0.0034 \text{ มม./มม.}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าความเค้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย, $f_{fe}$=300,000×0.0034 = 1,020 เมกาปาสกาล = 10,401 กก./ซม.$^2$

จากสมการที่ 11 สามารถคำนวณได้ค่า $\varepsilon_s'$ = 0.00045 มม./มม. และ $f_s'$ = 918 กก./ซม.$^2$

กำลังต้านทานแรงดัดของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi M_n = \phi\left[0.85A_f f_{fe}\left(h-\frac{\beta_1 c}{2}\right)+A_s f_y\left(d-\frac{\beta_1 c}{2}\right)+A_s' f_s'\left(\frac{\beta_1 c}{2}-d'\right)\right] \quad (12)$$

$\therefore \phi M_n$ = 12,546 กก.-ม. หรือ 12.5 ตัน-ม. ซึ่งพียงพอสำหรับแรงดัดประลัยที่โจทย์ระบุ

(3) การตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนของคาน ($\phi V_n$)

กำลังรับแรงเฉือนจากคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}bd \quad (13)$$

$$V_c = 0.53\sqrt{320}\times 25\times 35.6 = 8{,}438 \text{ กก.}$$

$$V_s = A_v f_y \frac{d}{s} \quad (14)$$

$$V_s = 2\pi(0.9^2/4)\times 2400\times 35.6/17.5 = 6{,}212 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n = 0.85\times(8{,}438+6{,}212) \text{ กก.} = 12.45 \text{ ตัน}$$

จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของคานมีค่ามากกว่าแรงเฉือนประลัย (10 ตัน) จึงไม่ต้องออกแบบการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคาน

จากการคำนวณเพื่อออกแบบการเสริมกำลัง สรุปได้ว่าเลือกใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนขนาดกว้าง 50 มม. หนา 1.4 มม. ที่ด้านล่างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้คานมีกำลังรับแรงดัดขนาด 12.5 ตัน-ม. ตามที่ระบุ

**ภาคผนวก ข.**

**ตัวอย่างที่ 1 การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| สาเหตุความเสียหาย | เสาเข็มท่าเทียบเรือเกิดการแตกร้าวเนื่องจากเกิดอุบัติเหตุเรือบรรทุกสินค้าชนพื้นและดันให้เสาเข็มแตกร้าว | - |
| รูปแบบความเสียหาย | เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่เนื่องจากแรงเฉือนบริเวณหัวเสาเข็มใกล้ตำแหน่ง Pile Cap เดิม | |
| ความรุนแรงของความเสียหาย | ระดับ 4 | เสาเข็มสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักและรอยร้าวมีผลต่อความคงทนจากสภาพแวดล้อมที่ตั้งอยู่ในทะเล |
| สภาพแวดล้อม | ทะเล ประเภท 3ข (มยผ. 1332-55) | - |
| อายุการใช้งาน | ประมาณ 1 ปี | - |

**ตัวอย่างที่ 1 การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| หลักการเสริมกำลัง | - ทำการซ่อมแซมปิดรอยร้าวเพื่อป้องกันความชื้นซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตเป็นสาเหตุให้เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเป็นสนิม<br>- เสริมกำลังโครงสร้างหัวเสาเข็มที่แตกร้าวโดยการขยายหน้าตัดคอนกรีตรัดหัวเสาเข็ม | - |
| วิธีการเสริมกำลัง | - ซ่อมรอยร้าวด้วยวิธีฉีดอัดอีพอกซี<br>- เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัด | - |
| วัสดุ | - อุปกรณ์ฝังยึดคอนกรีตเพื่อใช้ยึดเหล็กเสริมใหม่กับคอนกรีตเดิม (anchorage rebar)<br>- สารเคลือบผิวเหล็กเสริมยับยั้งการเกิดสนิมและเพิ่มแรงยึดเกาะ<br>- อีพอกซีเรซินสำหรับซ่อมแซมประสานรอยร้าวองค์อาคารที่มีความทนต่อความชื้น<br>- คอนกรีตไม่หดตัวสำหรับเทหุ้มหน้าตัดเสาเข็มคอนกรีตเดิม | - |

**ตัวอย่างที่ 1 การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| ขั้นตอนการเสริมกำลัง | - ติดตั้งนั่งร้านชั่วคราว<br>- ทำการซ่อมแซมรอยร้าวของเสาเข็มด้วยวิธีการอัดฉีดอีพอกซีเรซินชนิดความหนืดต่ำ<br>- ทาเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมชนิดสังกะสีเพื่อป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดสนิม | <br>รูปที่ 1 การฉีดอีพอกซีเรซินซ่อมรอยร้าวและวางเหล็กเสริม |
| | - ติดตั้งไม้แบบให้แข็งแรง | <br>รูปที่ 2 ติดตั้งแบบไม้แล้วเสร็จ |
| | ผสมปูนเกราท์ชนิดไม่หดตัว (non-shrink concrete) โดยผสมปูนเกราท์กับน้ำในอัตราส่วนตามที่ผู้ผลิตกำหนดจากนั้นเทหินเกล็ดเพิ่มเติมและค่อยๆ ปัมพ์คอนกรีตเข้าแบบ | <br>รูปที่ 3 การผสมปูนเกราท์ชนิดไม่หดตัว (non-shrink concrete) |

**ตัวอย่างที่ 1 การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| | - หลังจากเทคอนกรีตประมาณ 7 วัน ทำการถอดไม้แบบและบ่มชื้นหรือบ่มด้วยน้ำยาบ่มจนกระทั่งคอนกรีตรับกำลังได้เต็มที่ | <br>รูปที่ 4 การถอดแบบ |
| | - ทาเคลือบผิวคอนกรีตด้วยวัสดุป้องกันความชื้น | <br>รูปที่ 5 สภาพหลังเสร็จสิ้นการเสริมกำลังหน้าตัด |
| การควบคุมคุณภาพ | - สมบัติวัสดุต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C881/C881M<br>- การผสมวัสดุต้องได้สัดส่วนถูกต้องตามคำแนะนำของผู้ผลิต<br>- พื้นผิวคอนกรีตเดิมต้องปราศจากฝุ่น คราบน้ำมัน หรือสารที่จะส่งผลกระทบต่อการยึดเกาะ<br>- ใช้แรงดันต่ำถึงปานกลางในการอัดฉีด<br>- ควรฉีดจากจุดต่ำสุดจนกระทั่งล้นรูระบายจึงขยับเปลี่ยนจุดอัดฉีดขึ้น<br>- คอนกรีตที่ใช้ต้องสามารถไหลเข้าแบบได้เอง สมบัติการหดตัวต่ำ ไม่แยกตัว<br>- บ่มคอนกรีตให้ได้อายุตามที่ระบุ | |

**ตัวอย่างที่ 1 การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัด (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด |
|---|---|
| ข้อควรระวัง | <u>การอัดอีพอกซี</u><br>- เหมาะกับการซ่อมรอยร้าวที่มีขนาด 0.3 ถึง 3.0 มม.<br>- ไม่เหมาะกับการซ่อมรอยร้าวที่ยังคงมีการขยายตัว เนื่องจากอีพอกซีเรซินมีค่าโมดูลัสของวัสดุสูง จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวซ้ำบริเวณที่ได้รับการซ่อมแซม<br>- ไม่เหมาะกับการใช้งานในที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอีพอกซีจะไม่แข็งตัว<br><u>การเทคอนกรีตหุ้มเสริมหน้าตัด</u><br>- ระยะหุ้มคอนกรีตต้องไม่น้อยกว่าข้อกำหนด<br>- ควรระวังบริเวณรอยต่อเนื่องจากจะเป็นจุดที่ความชื้นซึมผ่านได้ง่าย ตรวจสอบการทาเคลือบวัสดุกันความชื้น<br>- ควรคำนึงถึงรอยร้าวของวัสดุที่เทใหม่ จากการหดตัวแบบแห้ง<br>- ควรออกแบบโดยคำนึงถึงอายุการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลไว้ด้วย |

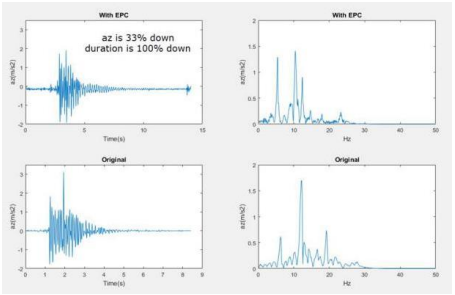
**ตัวอย่างที่ 2 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (External Post-Tensioning System)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| สาเหตุความเสียหาย | - สติฟเนสของแผ่นพื้นต่ำ<br>- ขาดการประเมินความสามารถใช้งานได้ | - |
| รูปแบบความเสียหาย | - เกิดการแอ่นตัวเกินกว่าข้อกำหนด<br>- การสั่นไหวมากทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกไม่ปลอดภัย<br>- เกิดรอยร้าวบนพื้นบริเวณรอบๆ เสา | - ผลการตรวจวัดการแอ่นตัวมากกว่ามาตรฐาน (มยผ. 1552-51)<br>- ผลการตรววัดด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง Accelerometer มีค่าสูง |
| ความรุนแรงของความเสียหาย | ระดับ 4 | - ความสามารถใช้งานได้ ไม่ผ่าน<br>- ความปลอดภัย ไม่ผ่าน |
| สภาพแวดล้อม | ประเภท 7 (มยผ. 1332-55) | - บริเวณที่จอดรถของอาคาร |
| อายุการใช้งาน | ไม่มีข้อมูล | - |
| หลักการเสริมกำลัง | - เสริมกำลังเพื่อเพิ่มสติฟเนสของแผ่นพื้นให้มากขึ้น<br>- ยกดีดแผ่นพื้นขึ้นเพื่อลดการแอ่นตัว<br>- ปรับความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้น | - |

**ตัวอย่างที่ 2 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (External Post-Tensioning System) (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| วิธีการเสริมกำลัง | - ทำการสำรวจการแอ่นตัวและรอยร้าวที่เกิดขึ้น<br>- หากเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรง ทำการสแกนเพื่อหาตำแหน่งลวดอัดแรงเดิม<br>- ทำการวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบการเสริมกำลังด้วยลวดแบบอัดแรงภายนอก<br>- ทำการตรวจวัดการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์วัดความเร่งก่อน/หลัง การเสริมกำลัง<br>- ทำการออกแบบสมอเหล็กยึดปลายลวดและอุปกรณ์ยึดฝังในคอนกรีต | <br>รูปที่ 1 การ scan หาตำแหน่งลวดอัดแรงเดิม |
| วัสดุ | - ลวดตีเกลียวคอนกรีตอัดแรง<br>- สมอเหล็กและอุปกรณ์ยึดปลายลวด<br>- เครื่องมือดึงลวดและอุปกรณ์สอบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงลวด | - |

**ตัวอย่างที่ 2 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (External Post-Tensioning System) (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| ขั้นตอนการเสริมกำลัง | - ทำการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสมอยึดปลายลวด<br>- เจาะคอนกรีตเพื่อฝังพุก<br>- ทำการติดตั้งสมอยึดปลายลวด<br>- ร้อยลวดตามแนวที่กำหนดไว้<br>- ทำการดึงปลายลวดโดยใช้แรงเป็นขั้นระดับที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ออกแบบไว้<br>- ในระหว่างที่ทำการดึงลวดต้องทำการตรวจวัดการยกตัวขึ้นของแผ่นพื้น การสั่นไหวที่ลดลง และหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในพื้นคอนกรีต | <br>รูปที่ 2 แผ่นสมอสำหรับกำหนดตำแหน่งและยึดลวดอัดแรงและร้อยลวดอัดแรงภายนอก<br> <br>รูปที่ 3 ภายหลังติดตั้งลวดอัดแรงภายนอกทั้งสองทิศทางแล้ว<br>  <br><br>รูปที่ 4 ผลการวัดการสั่นไหวก่อน (สองรูปล่าง) และหลัง (สองรูปบน) การเสริมกำลัง<br>รูปทางซ้าย : ช่วงเวลาการสั่นไหวลดลงหลังการเสริมกำลัง<br>รูปทางขวา : Amplitude ของการสั่นไหวลดลงหลังการเสริมกำลัง |

**ตัวอย่างที่ 2 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยระบบอัดแรงภายหลังภายนอก (External Post-Tensioning System) (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด |
|---|---|
| การควบคุมคุณภาพ | การเสริมกำลังดังกล่าวจำเป็นต้องอยู่ภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ เพราะระดับของการดึงลวดต้องใช้แรงสูงอาจเกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานและเกิดความเสียหายกับโครงสร้างได้ |
| ข้อควรระวัง | - ต้องคำนึงถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของโครงสร้างหลังจากอัดแรงเสริมภายนอก โดยเฉพาะหากความเหนียวของโครงสร้างมีความสำคัญ เช่น ในกรณีที่ต้องรับแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น<br>- ในระหว่างการติดตั้งต้องสังเกตพฤติกรรมโครงสร้างโดยตลอดเพื่อความปลอดภัย |

**ตัวอย่างที่ 3 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| สาเหตุความเสียหาย | โครงสร้างคานและเสาเสื่อมสภาพเนื่องจากมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี และต้องการให้โครงสร้างคานและเสารับน้ำหนักบรรทุกที่มากขึ้นได้ | - |
| รูปแบบความเสียหาย | เริ่มเกิดรอยร้าวเฉือนขนาดเล็กในโครงสร้างคาน | - |
| ความรุนแรงของความเสียหาย | ระดับ 2<br>ระดับ 3 | ความเสียหายจริงอยู่ในระดับ 2 แต่ต้องการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก จึงอยู่ในระดับ 3 ด้วย |
| สภาพแวดล้อม | ประเภท 7 (มยผ. 1332-55) | บริเวณที่จอดรถของอาคาร |
| อายุการใช้งาน | มากกว่า 20 ปี | - |
| หลักการเสริมกำลัง | ติดตั้งแผ่น CFRP เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของคาน และพันแผ่น CFRP โดยรอบเสาเพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและเพิ่มความเหนียวของเสา | - |
| วิธีการเสริมกำลัง | ซ่อมพื้นผิวและเสริมกำลังโครงสร้างด้วยแผ่น CFRP | - |

**ตัวอย่างที่ 3 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| วัสดุ | (1) แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)<br>(2) วัสดุฉาบแต่งผิวเรียบ (อีพอกซีเรซิน)<br>(3) วัสดุเชื่อมประสาน (อีพอกซีเรซิน) | - |
| ขั้นตอนการเสริมกำลัง | (1) ทำความสะอาดให้ปราศจากคราบไขและฝุ่นละออง ผิวคอนกรีตส่วนที่ขรุขระ ไม่สม่ำเสมอต้องทำการขัดให้เรียบด้วยเครื่องเจียร กำจัดรอยเปื้อน สี หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยว ในกรณีที่คอนกรีตมีรอยแตกร้าวกะเทาะหลุดร่อนเป็นโพรง จะต้องทำการซ่อมคอนกรีตให้เรียบร้อยก่อน | <br>รูปที่ 1 เตรียมพื้นผิวลบเหลี่ยมมุมต่างด้วยการขัดเจียรให้เรียบ |
| | (2) งานขัดเจียรลบมุมขอบแหลมคมชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตให้มีรัศมีไม่น้อยกว่า 2.5 ซม. เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างทำให้เสียแรงยึดเหนียวระหว่างคอนกรีต กับ CFRP และการฉีกขาดของเส้นใยที่ติดตั้งผ่านสันมุมที่แหลมคม และแต่งฉาบผิวบริเวณร่อง, ผิวหยาบหรือโพรงพรุน ตามดให้เรียบก่อนทำการติดตั้ง CFRP | <br>รูปที่ 2 ปรับสภาพพื้นผิวให้เรียบก่อนทำการติดตั้ง CFRP |

**ตัวอย่างที่ 3 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| | (3) ฉีดน้ำล้างทำความสะอาดอีกครั้ง แล้วเป่าให้แห้งเพื่อกำจัดเศษฝุ่นผงละอองออกให้หมด | <br>รูปที่ 3 ฉีดล้างทำความสะอาดพื้นผิว |
| | (4) ทำการติดตั้งแผ่น CFRP ให้ยึดติดกับโครงสร้างด้วยวัสดุเชื่อมประสานทาเคลือบผิวคอนกรีตและแผ่น CFRP โดยขั้นตอนการติดตั้งให้ทำตามกรรมวิธีที่ระบุไว้โดยผู้ผลิต | <br>รูปที่ 4 ติดตั้งแผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลังคาน |
| | (5) งานทาสีเคลือบผิวด้วยสีอีพอกซีทาสีรองพื้น 1 ชั้นและทาทับหน้า 2 ชั้น | <br>รูปที่ 5 ทาสีเคลือบพื้นผิวเสาและคานบริเวณที่ทำการติดตั้ง CFRP |

**ตัวอย่างที่ 3 การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก (ต่อ)**

| หัวข้อ | รายละเอียด |
|---|---|
| การควบคุมคุณภาพ | (1) ควบคุมคุณภาพวัสดุให้เป็นไปตามข้อแนะนำของผู้ผลิต<br>(2) ควบคุมคุณภาพการติดตั้ง CFRP ให้เป็นไปตามคู่มือการติดตั้ง |
| ข้อควรระวัง | (1) ถ้าเส้นใยต้องมีการหยุดขาดช่วงในทิศของเส้นใย ต้องทำการต่อทาบ โดยความยาวของการต่อทาบต้องไม่ต่ำกว่า 150 มม.<br>(2) ต้องมีการวิเคราะห์พฤติกรรมขององค์อาคารที่เปลี่ยนไปหลังการเสริมกำลังด้วยนอกจากกำลังรับน้ำหนัก เช่น ความเหนียวของโครงสร้าง |