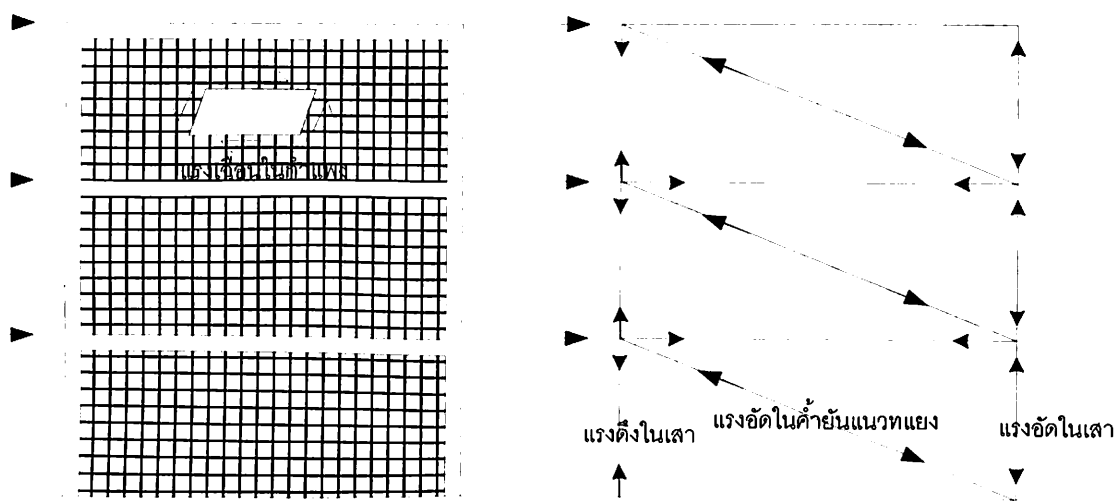


## บทที่ 2

### ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแผนการดำเนินงาน

#### 2.1 โครงอาคารผนังก่ออิฐ (Masonry-Infilled Frame)

โครงอาคารผนังก่ออิฐประกอบด้วย ระบบคานและเสาซึ่งอาจเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือ โครงสร้างเหล็กอย่างใดอย่างหนึ่ง และมีผนังก่ออิฐภายในโครงอาคาร ซึ่งเป็นระบบโครงอาคารที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไป ในกรณีการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว โครงสร้างระบบนี้ จะมีพฤติกรรมผสมระหว่างการรับแรงทางด้านข้างของโครงคาน-เสา และผนังก่ออิฐ โดยผนังก่ออิฐมีพฤติกรรมค้ำยันโครงอาคารจากกำลังต้านทานแรงเฉือนในระนาบของกำแพงและกำลังค้ำยันแนวทแยงมุมของกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อมีแรงกระทำทางด้านข้างต่อโครงอาคาร เสาและคานจะมีการโก่งตัวแบบโก่งดัดสองทางและมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ซึ่งจะเข้าไปพ้องผนังกำแพง ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นในระนาบกำแพง และเกิดแรงกดอัดตามแนวทแยงมุมของกำแพง ในขณะเดียวกัน เสาอาคารทางด้านรับแรงด้านข้างจะเกิดแรงดึงขึ้น และเสาอาคารด้านตรงข้ามจะเกิดแรงอัด



ก) พฤติกรรมแรงเฉือนในกำแพง

ข) พฤติกรรมแรงค้ำยันในระบบกำแพง-คาน

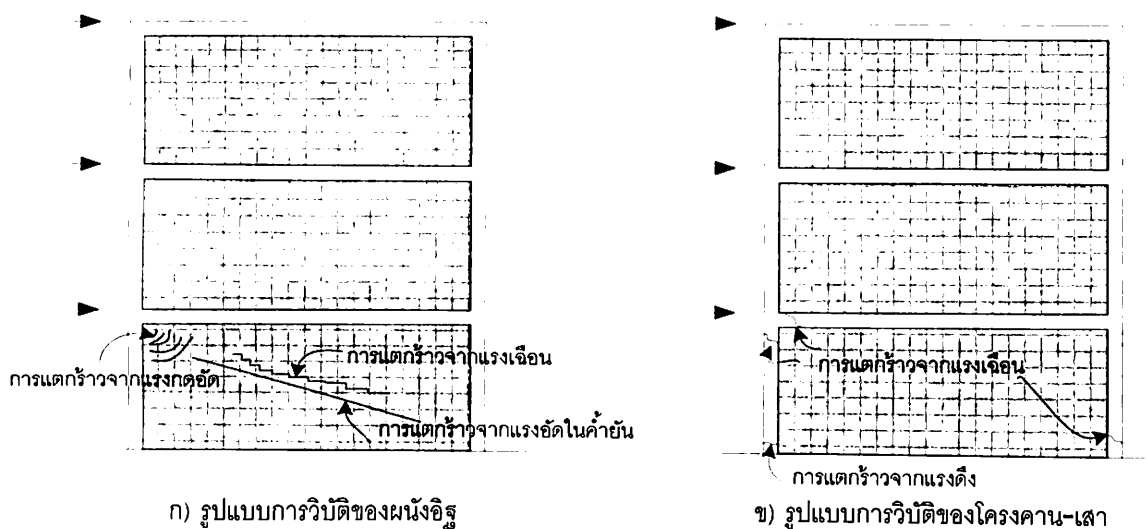
รูปที่ 2.1 พฤติกรรมรับแรงของโครงอาคารผนังก่อ ( ไพบูลย์ , 2561 )

#### 2.2 การวิบัติของโครงอาคารผนังอิฐก่อ

การวิบัติของผนังก่ออิฐอาจเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงร่วมกันระหว่าง โครงคาน-เสาและผนังอิฐ ดังนี้ การแตกร้าวรูปแบบชั้นบันไดบริเวณรอยต่อมอร์ตาร์ตามแนวปูนก่อระหว่าง ก่ออิฐเนื่องจากแรงเฉือนในระนาบของผนังอิฐ การแตกร้าวตามแนวทแยงของกำแพงอิฐเนื่องจากแรงอัดในค้ำยันเทียบเท่า (Equivalent strut) และ การแตกร้าวของผนังอิฐบริเวณมุมกำแพงเนื่องจากหน่วยแรงกดอัดที่มีค่าสูงในบริเวณมุมกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 2.2ก

สำหรับโครงอาคาร คาน-เสา ผลของแรงกระทำทางด้านข้าง ทำให้เสาเกิดแรงดึงด้านที่มีแรงมากระทำ อาจทำให้โคนเสาด้านนี้ เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงได้ ในขณะเดียวกัน โครงอาคารจะมีแรง

เฉือนที่บริเวณปลายคานและตำแหน่งปลายเสา ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณนี้ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2ข



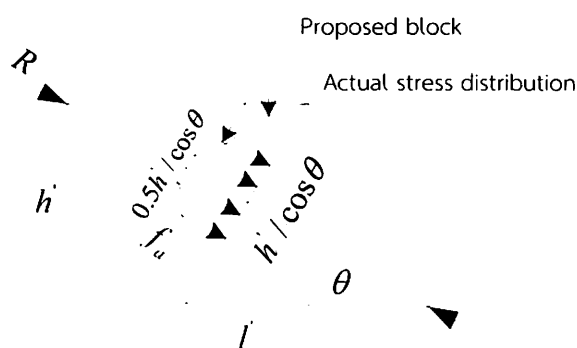
รูปที่ 2.2 รูปแบบการวิบัติของโครงอาคารผนังก่ออิฐ ( ไพบูลย์ , 2561 )

## 2.3 พฤติกรรมของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างและโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า

### 2.3.1 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง มีลักษณะเกิดจากการค้ำยันจากผนังอิฐก่อ เมื่อมีแรงดันด้านข้าง จะเกิดรอยแยก (Gap) ระหว่างโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กกับผนังอิฐก่อตรงบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของผนังอิฐก่อ เป็นสาเหตุทำให้เกิดแนวแรงอัดเป็นลักษณะแนวทแยงจากมุมด้านหนึ่งไปผิวมุมล่างของอีกด้านหนึ่ง ซึ่งพฤติกรรมลักษณะนี้สามารถจำลองโดยใช้การค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut)

กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) เป็นพฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเสนอโดย Saneinejad และ Hobbs (1995) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



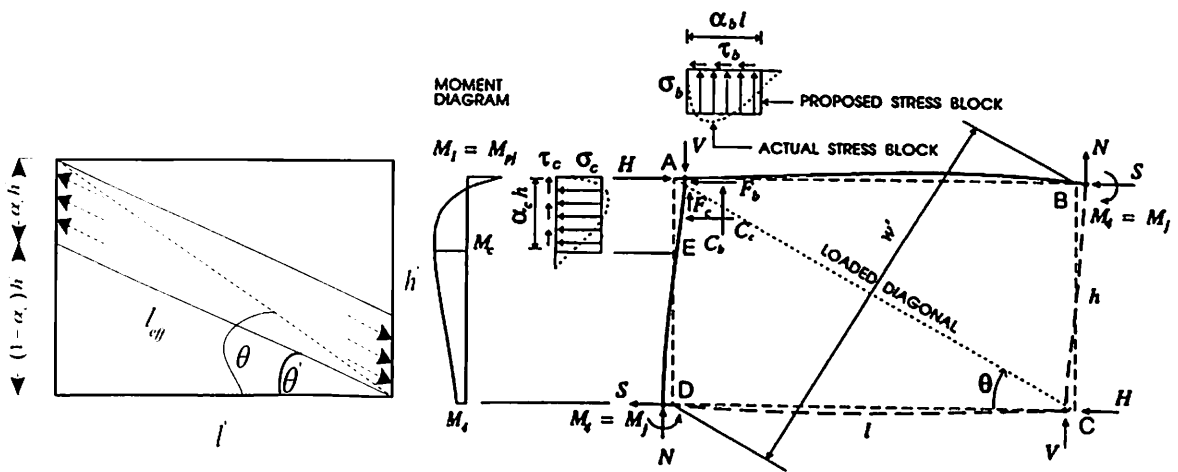
รูปที่ 2.3 กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Saneinejad และ Hobbs ,1995)

กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.1

$$R = R_{DC} = \frac{0.5h'tf_u}{\cos \theta} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $f_u = 0.6\phi f'_m$ ,  $\phi = 0.65$ ,  $\theta$  คือ มุมในแนวทแยงของผนังอิฐก่อ,  $t$  คือ ความหนาของผนังอิฐก่อ,  $h'$  คือ ความสูงของผนังอิฐก่อ และ  $f'_m$  คือกำลังรับแรงของปรีซึมอิฐก่อ

กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล เป็นกำลังต้านทานที่เกิดการวิบัติในลักษณะของการเฉือนของผนังอิฐก่อในทิศทางตรงกันข้ามและมีขนาดของแรงเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 พฤติกรรมดังกล่าวเสนอโดย Saneinejad และ Hobbs (1995) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล ดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Saneinejad และ Hobbs ,1995)

$$R_{ss} = \frac{\gamma v t l'}{1 - 0.45 \tan \theta'} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ ตัวคูณสำหรับกำลังแรงเฉือนประลัย,  $v$  คือ กำลังแรงเฉือนของผนังอิฐ สำหรับค่า  $\tan \theta'$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\tan \theta' = \frac{(1 - \alpha_c) h'}{l'} \quad (2.3)$$

สำหรับค่า  $\alpha_c$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.4 โดยการคำนวณค่าจะต้องไม่เกิน 0.4

$$\alpha_c = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{2M_{pi} + 2\beta_c M_{pc}}{\sigma_c t}} \quad (2.4)$$

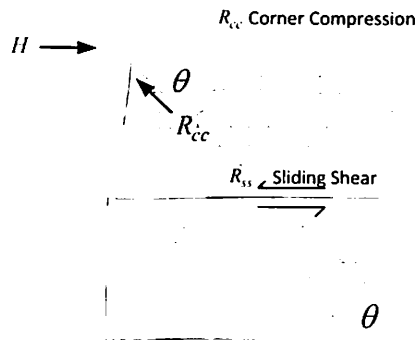
เมื่อ  $M_{pj}$  คือ ค่าโมเมนต์พลาสติกที่น้อยที่สุดระหว่าง  $M_{pc}$  และ  $M_{pb}$   
 $M_{pc}$  คือ ค่าโมเมนต์พลาสติกของเสา

สำหรับค่า  $\sigma_c$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$\sigma_c = \frac{f'_m}{\sqrt{1+3\mu^2 r^4}} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของโครงข้อแข็งและหน้าสัมผัสของผนังอิฐก่อ,  $r$  คืออัตราส่วนของโครงข้อแข็ง ( $r = h/l$ ),  $\beta_c, \beta_b$  คือ ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังของเสาและคาน ซึ่ง Saneinejad and Hobbs แนะนำให้ใช้ที่ 0.2, ค่าพารามิเตอร์  $h, l$  คือ ค่าระยะระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของความสูงและความยาวของโครงข้อแข็ง ตามลำดับ

กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) เนื่องจากแรงกดอัดที่มุมผนังอิฐก่อมีค่าสูงมาก ส่งผลให้เกิดการกดอัดด้วยแรงถ่ายเข้าสู่มุมของผนังอิฐก่อดังแสดงในรูปที่ 2.5 พฤติกรรมดังกล่าวเสนอโดย Saneinejad และ Hobbs (1995) กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) ดังสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.5 กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง

$$R_{cc} = \frac{(1-\alpha_c)\alpha_c t h \sigma_c + \alpha_b t l \tau_b}{\cos \theta} \quad (2.6)$$

สำหรับค่า  $\tau_b$ ,  $\sigma_b$  และ  $\alpha_b$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.7, 2.8 และ 2.9

$$\tau_b = \mu \sigma_b \quad (2.7)$$

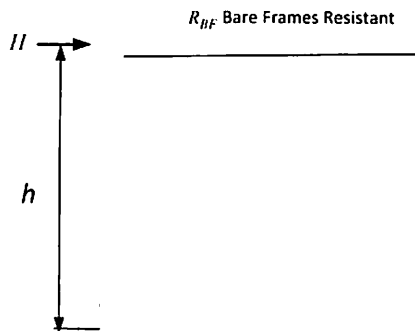
$$\sigma_b = \frac{f'_m}{\sqrt{1+3\mu^2}} \quad (2.8)$$

$$\alpha_b = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_b M_{pb}}{\sigma_b t}} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  คือ หน่วยแรงสัมผัสตั้งฉากของแรงกดอัดที่เสา,  $\sigma_b$  และ  $\tau_b$  คือ หน่วยแรงสัมผัสตั้งฉากของแรงกดอัดที่คานและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของคาน และ  $f'_m$  คือ กำลังรับแรงอัดของปรีซึมอิฐก่อ

### 2.3.2 พฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเปล่า (bare frame)

กำลังต้านทานของโครงข้อแข็งอาคารเปล่า (bare frame) เป็นพฤติกรรมของแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งจะไม่มีผนังเป็นตัวค้ำยันของโครงสร้าง ดังนั้น จึงไม่มีการพิจารณาผลของการวิบัติทั้ง 3 ลักษณะเข้ามาเกี่ยวข้อง จะคำนึงถึงผลของค่าโมเมนต์พลาสติกในเสา คานและโมเมนต์ที่จุดต่อระหว่างเสาและคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สำหรับกำลังต้านทานของโครงข้อแข็งอาคารเปล่าดังสมการที่ 2.10



รูปที่ 2.6 กำลังต้านทานของโครงข้อแข็งอาคารเปล่า

$$R_{BF} = \frac{2(M_{pc} + M_{pj})}{h} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $M_{pj}$  คือ ค่าโมเมนต์พลาสติกที่น้อยที่สุดระหว่าง  $M_{pc}$ ,  $M_{pb}$  และข้อต่อ,  $M_{pc}$  คือ ค่าโมเมนต์พลาสติกของเสา และ  $h$  คือ ค่าระยะระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของความสูงของข้อแข็ง

### 2.4 เฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement)

เฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement) เป็นวัสดุที่ประกอบกันระหว่างมอร์ต้าร์กับเหล็กเสริมโดยธรรมชาติซีเมนต์ เป็นวัสดุที่แข็งเปราะ เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับวัสดุที่มีคุณสมบัติในการกระจายแรง เช่น ลวด ตาข่าย (Wire Mesh) จะทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้นโดยลวดตาข่ายที่ใช้ทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ถึง 1.0 มิลลิเมตร และช่องว่างของตาข่าย 5 ถึง 25 มิลลิเมตร โดยมีสัดส่วนปริมาตรเหล็กต่อปริมาตรคอนกรีต ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 8 ความหนาของเฟอร์โรซีเมนต์อยู่ในช่วง 10 ถึง 40 มิลลิเมตร ระยะหุ้มคอนกรีตใช้ 1.5 ถึง 2 มิลลิเมตร โดยมอร์ต้าร์จะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำและมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติ) ขนาดประมาณ 5 ถึง 7 มิลลิเมตร เฟอร์โรซีเมนต์ใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความบางได้ แต่มีความทนทานเท่ากับคอนกรีตเสริมเหล็กเพราะมีพฤติกรรมเป็นวัสดุยืดหยุ่นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Elastic) ทำให้มีช่วงยืดหยุ่นกว้างกว่าคอนกรีตทั่วไป การกระจายตัวของลวดตาข่ายและ

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของคอนกรีต (Specific Surface) ส่งผลให้มีคุณสมบัติด้านการแตกร้าวดี

## 2.5 วัสดุที่ใช้ทำเฟอร์โรซีเมนต์

### 1) มอร์ตาร์ (Mortar)

มอร์ตาร์ คือ ส่วนผสมที่เกิดจากการนำเอาซีเมนต์ ทรายและน้ำ ผสมกันในอัตราส่วนตามมาตรฐานโดยทั่วไปมอร์ตาร์จะมีอัตราส่วน 1 ต่อ 2.75 โดยเป็นปูนซีเมนต์ ต่อทรายซึ่งเป็นอัตราส่วนสำหรับงานก่อและงานฉาบผนัง อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) มีความสำคัญต่อความสามารถทำงานได้ (Workability) ของมอร์ตาร์ สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทำเฟอร์โรซีเมนต์นิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 Ordinary Portland Cement (Type 1) ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ใช้ในงานโครงสร้างและมีการพัฒนากำลังที่ดี

### 2) ทราย (Sand)

สำหรับงานก่อสร้างโดยทั่วไปหรืองานโครงสร้างที่ต้องการกำลังรับแรงที่ดีจำเป็นต้องมีส่วนผสมของวัสดุมวลรวมละเอียดเป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต วัสดุมวลรวมละเอียดที่ผสมกับซีเมนต์จะต้องมีขนาดคละที่ดี (Well-Graded Sand) เพื่อไม่ทำให้ส่วนผสมของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตเกิดการแยกตัวระหว่างมวลรวมในระหว่างการเท ในงานเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์จึงจำเป็นต้องเลือกใช้มวลรวมละเอียดที่มีขนาดคละที่ดีเหมาะสม เมื่อทำการฉาบจะไม่ทำให้ส่วนผสมของมอร์ตาร์เกิดการแยก และหดตัวที่มีผลต่อกำลังและพื้นผิวโดยตรง

### 3) เหล็กเสริม (Reinforcing Rods)

วัตถุประสงค์ของการใช้เหล็กเสริมในงานเฟอร์โรซีเมนต์เพื่อ ทำให้โครงสร้างเกิดความแข็งแรง เนื่องจากเหล็กเสริมจะทำหน้าที่ในการรับแรงดึงเมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตจึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยปกติจะแบ่งเหล็กเสริมเป็นสองประเภท คือ

เหล็กกลมผิวเรียบ(Round Bar) SR24 มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 2400 ksc. (กก./ตร.ซม.) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ เช่น RB6 (หมายถึง Round Bar ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.), RB9, RB12, RB15, RB19, RB25 เนื่องจากผิวเหล็กที่มีลักษณะกลมเรียบจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตไม่ดีจึงต้องมีการงอเพื่อที่จะสามารถถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เหล็กข้อย้อย(Deformed Bar) SD30, SD40, SD50 มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 3000, 4000, 5000 ksc.ตามลำดับ โดยปกติจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เช่น DB12(หมายถึง Deformed Bar ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง12มม.), DB16, DB20, DB25, DB28, DB32 ผิวของเหล็กเส้นจะมีลักษณะเป็นปล้องเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้เหล็กกับคอนกรีตมากขึ้นการเลือกใช้ชนิดของเหล็กเส้นข้อย้อย SD30, SD40, และ SD50 ขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างเป็นสำคัญ ลักษณะของเหล็กเส้นข้อย้อยที่ดี ต้องมีระยะปล้องที่เท่ากันและสม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น ไม่มีสนิมรอยตำหนิ ไม่มีรอยปริและแตกร้า ความยาวโดยปกติที่ขายกันในท้องตลาด คือ 10 เมตร แต่อาจจะสั่งพิเศษ เช่น 12 เมตร หรือมากกว่านั้นก็ต้องสั่งทำพิเศษ

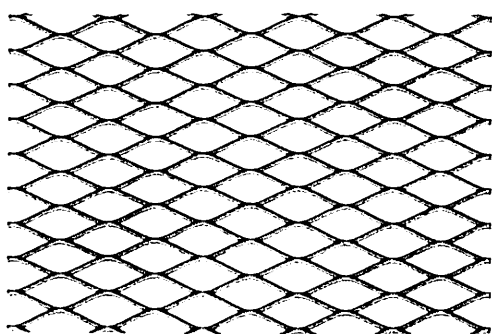
แต่ที่นิยมใช้ในงานเฟอร์โรซีเมนต์ได้แก่เหล็กกลมผิวเรียบ(Round Bar) เนื่องจากการใช้เหล็กเส้นกลมจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทำงานได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับการใช้เหล็กข้อย้อยและในงานผนังการเสริมควรจะใช้เหล็กขนาดไม่เกิน 6 มม. เพราะต้องคำนึงถึงความหนาของชั้นในการฉาบสำหรับผนังที่เสริม

ด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ ถ้าขนาดเหล็กที่เสริมมีขนาดใหญ่เกินไปก็ไม่เหมาะสมที่จะใช้ เนื่องจากในสภาพความเป็นจริงในงานผนัง โดยปกติความหนาของผนังจะอยู่ประมาณ 10 เซนติเมตร แต่เมื่อทำการเสริมด้วยเฟอร์โรซีเมนต์จะทำให้ความหนาของตัวผนังเพิ่มขึ้นถ้าหากใช้เหล็กที่มีขนาดใหญ่การฉาบจะต้องมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเพื่อปกปิดเหล็กเสริมในตัวผนังอิฐก่อดังนั้นควรใช้เหล็กเสริมไม่เกิน 6 มม.

#### 4) ลวดตาข่าย (Wire Mesh)

สำหรับงานเฟอร์โรซีเมนต์สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการใช้ลวดตาข่ายชนิดต่างๆ ในการเสริมเข้าไปในโครงสร้างเพื่อเป็นตัวยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างเดิมกับโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์ให้เกิดความแข็งแรงและทำหน้าที่ในการกระจายแรงทั่วหน้าตัด การใช้ลวดตาข่ายจำเป็นต้องเสริมทั้งสองด้านเพื่อให้เกิดการกระจายแรงที่สม่ำเสมอสามารถรับแรงดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับลวดตาข่ายที่นิยมใช้ในการเสริมกำลังได้แก่ Hexagonal Wire Mesh, Welded Wire Mesh, Woven Mesh, Expanded Metal Mesh และ Watson Mesh ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันทั้งทางด้านตัววัสดุและคุณสมบัติ ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของตัวเฟอร์โรซีเมนต์โดยตรงยกตัวอย่างเช่น

ตะแกรงเหล็กฉีก เป็นแผ่นโลหะทำให้เป็นรูในลักษณะดึงออกและยึดเป็นรูปตาข่ายสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดหรือรูปร่างอื่น โดยมีทุกจุดต่อของรูยึดต่ออย่างแข็งแรงตลอดหน้าตัด การผลิตตะแกรงเหล็กฉีกไม่ใช้การเชื่อมหรือการเจาะรู ตะแกรงเหล็กฉีกจึงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทุกรูและตลอดทั้งแผ่นจึงมีความแข็งแรงสูงยากที่จะทำให้ขาดหรือหลุดจากกันดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งก็จะมีแตกต่างจากลวดชนิด Hexagonal Wire Mesh และลวดชนิดอื่นๆดังที่ได้กล่าว ความแข็งแรงจึงขึ้นอยู่กับตัวของวัสดุเป็นสำคัญ ดังนั้นการรับแรงเมื่อนำไปใช้ในการเสริมเฟอร์โรซีเมนต์จึงให้กำลังรับแรงที่ได้แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 ตะแกรงเหล็กฉีก (Expanded Metal Mesh)

#### 5) ลวดผูก (Tying Wire)

การยึดเหล็กเสริมกับตัวของลวดตาข่ายเข้าด้วยกันสามารถใช้ลวดผูกขนาด 1.5 มม. ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปผูกยึดเป็นช่วงๆเพื่อไม่ให้ลวดตาข่ายเกิดการเคลื่อนที่และสามารถเข้ารูปได้เป็นอย่างดี

#### 6) น้ำ (Water)

ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต คุณภาพของน้ำมีความสำคัญมากเพราะสิ่งเจือปนต่างๆในน้ำอาจมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่นเวลาการแข็งตัว กำลังอัดทำให้สีของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ และอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมด้วยเหตุนี้การเลือกน้ำที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับผสมหรือบ่มคอนกรีตจึงจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ

น้ำที่ใช้ในงานเฟอร์โรซีเมนต์เป็นสิ่งจำเป็นในส่วนผสมของมอร์ตาร์หรืองานคอนกรีตการใช้น้ำที่มีสิ่งเจือปนมากเกินไปจะมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพสะอาดปราศจากสิ่งเจือปนที่มีผลต่อกำลังของมอร์ตาร์โดยตรง

## 2.6 การเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยใช้ตะแกรงเหล็กฉีก

วิธีการเสริมกำลังด้วยวิธี เฟอร์โรซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีการที่เสริมกำลังได้ง่าย รวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างได้เป็นอย่างดี วิธีการออกแบบโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์เป็นไปตามมาตรฐาน ACI549 โดยกำลังต้านทานแรงเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$V_s = \eta v_f A_v f_y \quad (2.11)$$

เมื่อ  $V_s$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของผนังเสริมกำลัง,  $\eta$  คือ ตัวคูณประสิทธิภาพของวัสดุเสริมกำลังในทิศทางแรงกระทำที่พิจารณา,  $A_v$  คือ พื้นที่หน้าตัดของปูนมอร์ตาร์ฉาบผิว,  $f_y$  คือ กำลังครากของวัสดุเสริมกำลัง,  $v_f$  คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรกับวัสดุเสริมกำลังและปริมาตรของเฟอร์โรซีเมนต์ คำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$v_f = \frac{V_{me}}{V_c} \quad (2.12)$$

สำหรับ  $V_{me}$  และ  $V_c$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$V_{me} = NW_m A_v \quad (2.13)$$

$$V_c = \gamma_m t_f A_v \quad (2.14)$$

เมื่อ  $V_{me}$  คือ ปริมาตรของวัสดุเสริมกำลัง,  $V_c$  คือ ปริมาตรของเฟอร์โรซีเมนต์,  $N$  คือ จำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กฉีก,  $W_m$  คือ หน่วยน้ำหนักของตะแกรงเสริมกำลังต่อพื้นที่แผ่นตะแกรง,  $\gamma_m$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุเสริมกำลัง,  $t_f$  คือ ความหนาของเฟอร์โรซีเมนต์,  $A_v$  คือ พื้นที่หน้าตัดของปูนมอร์ตาร์ฉาบผิว,  $V_s$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของผนังเสริมกำลัง

## 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคและวิธีการเสริมกำลังผนังอิฐก่อที่ได้ทำการวิจัยมาในอดีตที่ผ่านมา เป็นการปรับปรุงการเสริมกำลังเฉพาะที่ให้กับผนังอิฐก่อทั้งที่เป็นผนังอิฐก่อเต็มและผนังอิฐก่อที่มีช่องเปิดเพื่อทำให้ตัวของผนังมีพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีความสามารถในการรับกำลังที่ตีขึ้นประกออบกับการที่ทำให้ตัวโครงสร้างของผนังมีความเหนียว (Ductility) เพื่อให้สามารถต้านทานต่อแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวได้ และทนต่อการโยกไหวภายใต้แรงกระทำในลักษณะกลับไปมาได้ (Cyclic) อย่างมีประสิทธิภาพ



### 2.7.1 ผลงานวิจัยเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อ

โดยงานวิจัยในอดีตที่น่าสนใจเกี่ยวกับการเสริมกำลังผนังอิฐก่อ มีเทคนิควิธีการเสริมกำลังหลายวิธีการซึ่งได้มีการนำเสนอ ดังนี้

Taghdi และคณะ (2000) ได้นำเสนอเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยใช้เหล็กแผ่นตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวอย่างขนาดเท่าของจริงจำนวน 7 ตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบ ซึ่งแต่ละตัวอย่างมีขนาด 1800x1800 mm. โดยใช้ชื่อตัวอย่างคือ 9 , 9R , 10, 10R, 11 , 11R และ 11RP ตัวอย่าง 9 คือตัวอย่างผนังอิฐก่อใช้อิฐขนาด 200x400 mm. ความหนา 200 mm. ตัวอย่าง 10 คือตัวอย่างอิฐก่อที่มีการเสริมเหล็กยื่นในผนังบางส่วน ตัวอย่าง 11 เป็นตัวอย่างที่เสริมเหล็ก #3 ความหนา 100 mm. สำหรับตัวอย่างที่มีตัวอักษร R และ RP คือการเสริมกำลังโดยใช้เหล็กแผ่นในลักษณะของการเสริมเหล็กแผ่นในรูปแบบแนวทแยงและการเสริมในแนวตั้ง การทดสอบจะให้เกิดครากในแนวตั้งซึ่งเป็นแรงในแนวแกนขนาด 100 kN และแรงกระทำทางด้านข้าง จากการศึกษา ได้ผลการทดสอบหลังเสริมกำลังพบว่า รูปแบบของกราฟแบบวัฏจักร มีพฤติกรรมที่ดีกว่าก่อนเสริมกำลังไม่ว่าจะเป็นผนัง 9 ,10, 11 ต่างมีค่าของกำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด พฤติกรรมของตัวอย่างมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะของกราฟมีความกว้างและขยายออกทางด้านข้างดีกว่าก่อนเสริมกำลังเป็นการสลายพลังงานที่ดี รูปแบบการวิบัติหลังเสริมพบว่าตัวอย่างเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนตามแนวทแยง แผ่นเหล็กเกิดการโก่งเดาะมีการหลุดของสลักที่ยึดระหว่างผนังกับแผ่นเหล็ก

Ghobarah และ Galal (2004) ได้นำเสนอการรับแรงในระนาบของผนังอิฐก่อที่มีช่องเปิดการศึกษาเป็นการใช้วัสดุ CFRP เสริมกำลัง ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยมีขนาด 6 x 2.8 x 0.19 m. อิฐที่ใช้เป็นอิฐบล็อกขนาด 390 x 190 x 190 mm. ตัวอย่างถูกติดตั้งแผ่น CFRP ขนาด 50 mm. ในลักษณะทั้งแนวตั้งและแนวนอนโดยมีสมอซึ่งทำหน้าที่ยึดที่ปลายและทุกระยะ 150 mm. ของแผ่น CFRP จากการศึกษาเป็นการศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐที่มีช่องเปิดในแต่ละกรณี ตัวอย่างถูกกระทำภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง พบว่าการที่มีช่องเปิดของตัวอย่างที่ทดสอบมีช่องเปิดที่กว้างซึ่งทำให้พื้นที่ของผนังอิฐลดลงส่งผลต่อพฤติกรรมรับแรงโดยตรงของตัวผนัง โดยเฉพาะตัวอย่าง Wall 4 ให้กำลังและความเหนียวของโครงสร้างต่ำกว่าตัวอย่างทดสอบอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ลักษณะการวิบัติเกิดจากแรงเฉือนและแรงดัดโดยวิบัติ จากมุมของผนังจนถึงขอบของช่องเปิด แผ่น CFRPเกิดการหลุดจากผนังพร้อมกับสมอยึดที่โครงสร้าง

Elgawady และคณะ (2005) ได้นำเสนอเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยใช้ Fiber Reinforce Polymer (FRP) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีอยู่ 2 รูปแบบคือ รูปแบบของผนังแบบยาวและรูปแบบผนังแบบสั้น การเสริมกำลังจะใช้ FRP หลายแบบซึ่งประกอบด้วย Glass FRP ในรูปแบบการหุ้มและ Carbon FRP ในรูปแบบแผ่น ตัวอย่างที่ทดสอบในรูปแบบของผนังแบบยาวมีทั้งหมด 3 ตัวอย่างโดยมีตัวอย่าง L1-REFE เป็นตัวอย่างควบคุม L1-WRAP-G-F เป็นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย Glass FRPแบบหุ้มผิวหน้าของตัวอย่างและ L1-WRAP-G-X เป็นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย Glass FRP ในรูปแบบตามแนวทแยงและมีแผ่น Carbon FRP แบบแผ่นติดไว้ที่ระหว่างคานล่างและคานบนของตัวอย่างและถูกยึดด้วยสลัก สำหรับตัวอย่างที่ทดสอบในรูปแบบของผนังแบบสั้นมีทั้งหมด 3 ตัวอย่างโดยมี ตัวอย่าง S1-REFE เป็นตัวอย่างควบคุม S1-LAMI-C-X เป็นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย Carbon FRP ในรูปแบบตามแนวทแยงและ S1-WRAP-G-F เป็นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย Glass FRP ในรูปแบบหุ้มผิวหน้าของตัวอย่างและมีแผ่น Carbon FRP แบบแผ่นติดไว้ที่ระหว่างคานล่างและคานบนของตัวอย่างและถูกยึดด้วยสลัก รูปแบบการ

ทดสอบจะให้โหลดกระทำในแนวแรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง ซึ่งจากการทดสอบ ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และการเคลื่อนตัวด้านข้างก่อนเสริมและหลังเสริมกำลัง จากผลทดสอบหลังเสริมกำลังพบว่าตัวอย่างผนัง L1-WRAP-G-F มีกำลังรับแรงที่ดีกว่าผนัง L1-RERE ซึ่งเป็นผนังควบคุม กราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมแสดงถึงการสลายพลังงานของโครงสร้างที่ต่ำ เนื่องจากกราฟที่ได้จากการทดสอบยังมีความแคบของกราฟ แสดงถึงความเหนียวของโครงสร้างที่น้อย ส่วนตัวอย่าง L1-WRAP-G-X เป็นตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย Glass FRP ในรูปแบบตามแนวทแยงและมีแผ่น Carbon FRP แบบแผ่นติดไว้ที่ระหว่างคานล่างและคานบนของตัวอย่าง พบว่ากำลังที่ได้และความเหนียวของโครงสร้างไม่มีความแตกต่างกับตัวอย่างควบคุม สำหรับตัวอย่างผนัง S1-WRAP-G-F เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมจะได้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นแต่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมแสดงถึงความเหนียวของโครงสร้างที่ต่ำรวมถึงตัวอย่าง S1-LAMI-C-X ซึ่งจากกราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร ที่แสดงทำให้สรุปได้ว่าตัวอย่างมีการพัฒนากำลังและความเหนียวของโครงสร้างผนังใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม รูปแบบการวิบัติเกิดจากแรงเฉือนในระนาบของตัวอย่าง การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึง การที่ใช้วัสดุ FRP ในการเสริมกำลังผนังไม่ทำให้คุณสมบัติของผนังอิฐก่อเปลี่ยนไปมากนักโดยเฉพาะในด้านความเหนียวของโครงสร้างซึ่งโครงสร้างที่ต้านทานแผ่นดินไหวในการออกแบบเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึง

Paquette และ Bruneau (2005) ได้นำเสนอพฤติกรรมผนังอิฐก่อที่มีช่องเปิด รูปแบบการศึกษาเป็นการศึกษา ผนังอิฐก่อที่มีช่องหน้าต่างและช่องประตูรวมกันในตัวอย่างการทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างขนาดใหญ่ โดยมีรูปแบบของการเสริมกำลังผนังอิฐด้วย TYFO Fiberglass ชนิดแผ่น การเสริมกำลังจะเสริมในแนวตั้ง ปูนที่ใช้ก่ออิฐเป็น mortar ประเภท O และตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีอยู่ 2 ด้านโดยมีโครงข้อแข็ง ชนิดไม้ในการยึดโครงสร้างของผนังอิฐ การยึดโครงสร้างต่อกันด้วย สมอยึดขนาด 19 mm. และมีแผ่นเหล็กขนาด 150 x 150 x 6 mm. ประกอบทั้ง 2 ด้าน การทดสอบจะกระทำภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง จากการศึกษพบว่า การเสริมกำลังด้วย TYFO Fiberglass ทำให้กำลังรับแรงมีค่าสูงขึ้นกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการเสริม แต่พฤติกรรมด้านความเหนียวของตัวอย่างที่ทำการเสริมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณาจาก กราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร ซึ่งกราฟอยู่ในช่วงแคบ การสลายพลังงานไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

Elgawady และคณะ (2006) ได้นำเสนอเทคนิคการซ่อมแซมผนังอิฐก่อโดยใช้คอนกรีตพ่น (Shotcrete) สำหรับการทดสอบจะใช้ตัวอย่างขนาดครึ่งหนึ่งของตัวอย่างจริงในการศึกษาใช้ตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างประกอบด้วย S2-RERE-ST ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม S2-1SHOT-ST เป็นตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตพ่นด้านเดียวด้วยความหนา 40 mm. และ S2-2SHOT-ST เป็นตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตพ่นทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบโดยมีความหนาด้านละ 20 mm. รวมความหนาทั้งสองด้านของผนัง 40 mm. อิฐที่ใช้เป็นอิฐดินเหนียวขนาด 150 x 75 x 95 mm. มีกำลังรับแรงอัด 14.8 MPa สำหรับตัวอย่างใช้เหล็กตะแกรงขนาด 4 mm. ระยะห่างของตะแกรง 100 mm. เสริมผนังอิฐก่อ การทดสอบกระทำภายใต้แรงกระทำในแนวแกนขนาด 30 kN และให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบไป-กลับ จากการศึกษได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการเคลื่อนที่ของตัวอย่างในรูปแบบของกราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่าง S2-1SHOT-ST มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่ค่าความเหนียวลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนตัวอย่าง S2-2SHOT-ST มีค่ากำลังและค่าความเหนียวของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม การสลายพลังงานดูได้จากกราฟแรงกระทำแบบวัฏ

จักร ซึ่งมีความกว้างแสดงถึงการสลายพลังงานที่ดี การวิบัติของตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบ Toe Crushing โดยจะวิบัติของส่วนฐานของตัวอย่าง มีการแยกตัวระหว่างอิฐกับปูนก่อ

Altin และคณะ (2007) ได้นำเสนอเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อในรูปแบบของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ CFRP เสริมในแนวทแยงโครงสร้าง CFRP ที่ใช้มีความกว้างของแผ่น 3 ขนาดได้แก่ 200 , 300 และ 400 mm. ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างใช้ตัวเลข 1-10 แทนตัวอย่างผนัง ตัวอย่างที่ 1 เป็นตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่ 2, 5 และ 8 ใช้ CFRP ขนาด 200 mm. ติดตั้งในแนวทแยง ตัวอย่างที่ 3, 6 และ 9 ใช้ CFRP ขนาด 300 mm. ติดตั้งในแนวทแยง และ ตัวอย่างที่ 4, 7 และ 10 ใช้ CFRP ขนาด 300 mm. ติดตั้งในแนวทแยง ตัวอย่าง 2,3 และ 4 ติดตั้ง CFRP ทั้ง 2 ด้านของผนัง ตัวอย่าง 5,6 และ 7 ติดตั้ง CFRP ด้านนอกของผนังโดยมี CFRP Anchorage ยึดในส่วนของเสา และ ตัวอย่าง 8 , 9 และ 10 ติดตั้ง CFRP ด้านในโครงสร้างของผนังโดยมี CFRP Anchorage ยึดในส่วนของเสา การทดสอบภายใต้แรงกระทำในแนวตั้ง และใช้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างพบว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP มีกำลังรับแรงที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมการใช้แผ่น CFRP ขนาด 400 mm. ให้กำลังรับแรงสูงสุด การเสริมกำลังทั้ง 2 ด้านของตัวอย่างผนังมีกำลังรับแรงดีกว่าการเสริมด้านเดียว ทั้งการเสริมภายนอกและภายในของโครงสร้าง ความเหนียวของโครงสร้างเมื่อใช้แผ่น CFRP พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งพิจารณาจากรูปแบบ แรงกระทำแบบวิฎจักรอยู่ในช่วงแคบ

Anil และ Altin (2007) ได้ทำการศึกษาการแทนที่ของผนังคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างข้อแข็ง ตัวอย่างที่ทดสอบเป็นตัวอย่างที่มีการเสริมผนังในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กในลักษณะต่างๆกันทั้งหมด 9 ตัวอย่างการทดสอบ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบเป็นตัวอย่างขนาด 1/3 ของตัวอย่างจริง โดยขั้นตอนการออกแบบได้จำลองการออกแบบในลักษณะของ เสาอ่อนและคานแข็ง จากการศึกษาพบว่า ผนัง SPECIMEN-1 ซึ่งเป็นโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยไม่มีผนังในโครงสร้างมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างได้กำลังน้อยกว่าผนัง SPECIMEN-2-9 แต่เมื่อมีการแทนที่ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าไปในโครงสร้างข้อแข็งในลักษณะต่างๆดังที่ได้กล่าวข้างต้นพบว่า SPECIMEN-2 ถึง 9 มีกำลังรับแรงสูงขึ้นในช่วง การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นไม่เกิน 2 % หลังจากนั้นพฤติกรรมการรับแรงก็จะกลับไปเหมือน SPECIMEN-1 ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อผนังที่แทนที่บางส่วนเกิดการวิบัติส่วนที่จะรับแรงต่อคือ โครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะการสลายพลังงานเมื่อเทียบกับโครงข้อแข็งที่ไม่มีผนังพบว่าการรับแรงกระทำแบบวิฎจักร อยู่ในช่วงแคบแสดงถึงการสลายพลังงานของโครงสร้างที่ไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับโครงข้อแข็งซึ่งไม่มีผนัง ค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง (Stiffness) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ  $l_w/h_w$  ถ้ามีค่าสูงแสดงถึงค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น SPECIMEN-2 มีค่า  $l_w/h_w = 1.73$  และ SPECIMEN-4 มีค่า  $l_w/h_w = 0.43$  ได้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง 68.4 kN/mm และ 6.9 kN/mm ตามลำดับ

Voon และ Ingham (2008) ได้นำเสนอกำลังรับแรงในระนาบผนังอิฐก่อที่มีช่องเปิดโดยใช้เหล็กเสริมกำลัง ตัวอย่างที่ทดสอบเป็นผนังที่มีช่องเปิดในรูปแบบที่แตกต่างกัน 8 ตัวอย่างการทดสอบเหล็กที่ใช้เสริมกำลังเป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาด D16 และ D12 และมีเหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมขนาด R6 mm. ปูนที่ใช้เป็นปูนที่มีอัตราส่วน 1:4 โดยเป็นซีเมนต์ 1 ส่วนและทราย 4 ส่วน การทดสอบกระทำภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่า ผนังอิฐก่อ Wall 1-5 ซึ่งเป็นผนังอิฐก่อที่มีช่อง

เปิดความกว้างเท่ากันขนาด 600 mm. แต่ความยาวของช่องเปิดจะต่างกันออกไป พบว่ากำลังของตัวผนังอิฐก่อถ้ามีช่องเปิดยิ่งกว้าง ซึ่งก็หมายความว่า ช่องเปิดมีพื้นที่มากขึ้นแสดงถึงกำลังของผนังที่ได้ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างผนัง ในรูปของกราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร สำหรับผนัง Wall 6-8 ซึ่งเป็นผนังที่มีช่องเปิดของผนังค่าแนวโน้มของกำลังที่ได้เหมือนกับตัวอย่าง Wall 1-5 เนื่องจาก Wall 6 มีพื้นที่ช่องช่องเปิดน้อยที่สุดทำให้กำลังเมื่อเปรียบเทียบกับ Wall 7 และ Wall 8 จึงได้กำลังรับแรงสูงสุดการเสริมเหล็กที่ตัวอย่างผนังด้านล่างของช่องเปิดจากตัวอย่าง Wall 4 และ Wall 5 ซึ่งมีช่องเปิดที่เท่ากัน แต่แตกต่างกันตรงที่ การเสริมเหล็กใต้ช่องเปิดโดยที่ Wall 4 จะเสริมเหล็กมากกว่า Wall 5 พบว่ากำลังที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างผนัง ในรูปของกราฟแรงกระทำแบบวัฏจักรและตัวอย่าง Wall 7-8 ก็เช่นเดียวกัน การวิบัติของตัวอย่างผนังเกิดจากแรงเฉือนในหน้าตัดตามแนวทแยงของตัวผนังเข้ามาสู่ช่องเปิด

Santa-Maria และ Alcaino (2010) ได้นำเสนอเทคนิคการซ่อมแซมผนังอิฐก่อโดยใช้ Fiber Reinforce Polymer (FRP) การวิจัยได้ทำตัวอย่างผนังอิฐก่อ ซึ่งมีขนาด 1975x2400x140 mm. ใน 2 รูปแบบคือ รูปแบบ SRM และ NSRM ความแตกต่างระหว่าง 2 รูปแบบ SRM จะมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนระหว่าง ปลายของตัวผนังอิฐก่อ ตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมด 13 ตัวอย่างรูปแบบของการเสริมกำลังและการซ่อมแซมใช้ Cabon fiber sheets การเสริมแบบทั้งแนวทแยง 2 แผ่น และแนวนอนจำนวน 3 แผ่น จากการศึกษาเป็นการทดสอบภายใต้แรงกระทำในแนวตั้งขนาด 98 kN และใช้แรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง สำหรับการทดสอบช่วงแรกเป็นการเสริมกำลังให้กับผนังจนเกิดการแตกร้าวของตัวผนังอิฐก่อจึงหยุดการกระทำของแรงในช่วงแรก และช่วงสองเป็นการซ่อมแซมตัวอย่างที่เกิดการแตกร้าวจากแรงเฉือนด้วย CFRP เหมือนกับช่วงแรกและให้โหลดกระทำอีกรอบจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ จากการทดสอบพบว่าการซ่อมแซมผนังหลังจากเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือนด้วย CFRP ทำให้ตัวอย่างที่ทดสอบมีกำลังและการสลายพลังงานที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมโดยในรูปแบบการเสริม CFRP แบบแนวทแยงให้กำลังสูงสุด การซ่อมแซมตัวอย่างยังคงมีความสามารถรับแรงและการสลายพลังงานที่ดี

Papanicolaou และคณะ (2010) ได้นำเสนอเทคนิคการเสริมกำลังภายนอกโครงสร้างโดยใช้ การหุ้มโครงสร้างด้วยวัสดุแบบทอ (Textile) ตัวอย่างการทดสอบใช้ตัวอย่างการทดสอบขนาดกลางใช้วัสดุก่อ 2 แบบคือ อิฐดินเผาชนิดกลางและอิฐบล็อก วัสดุแบบทอ (Textile) ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย Cabon fiber , Basalt fiber , Bitument-coated E-glass fiber , Bitument-coated polyester fiber และ Polypropylene net โดยมีคุณสมบัติของแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน วัสดุจะถูกติดตั้งที่ผิวนอกของโครงสร้างโดยมี วัสดุเชื่อมประสานได้แก่ mortar , Fiber-reinforce motar , Low -strength mortar และ Epoxy resin ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ตัวอย่างมีทั้งติดตั้งด้านเดียว และสองด้านของโครงสร้างผนังอิฐก่อ การทดสอบตัวอย่างจะกระทำภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำกลับไป-มาด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างช่วงกลางของโครงสร้างพบว่า การใช้วัสดุแบบทอ (Textile) ในการเสริมกำลังของผนังอิฐก่อทำให้มีกำลังรับแรงและพฤติกรรมความเหนียวของโครงสร้างสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม การเสริมกำลังด้วย Cabon fiber มีพฤติกรรมการรับแรงและความเหนียวดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั้งหมด การวิบัติของตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน โดยจะเริ่มแตกหลุดออกมาของวัสดุเชื่อมประสาน การติดตั้งวัสดุทั้ง 2 ด้านให้กำลังดีกว่าการติดตั้งแบบด้านเดียว

Harajli และคณะ (2010) ได้นำเสนอเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยใช้ระบบ TMS (Textile-Mortar System) ตัวอย่างทดสอบใช้ตัวอย่างผนังอิฐก่อขนาด 1.2x1.0 m. หนา 100 mm. อิฐที่ใช้ในงานวิจัยมีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ Brick , Sandstone และ Concrete hollow block สำหรับวัสดุ Textile ประกอบด้วย Uncoated Basalt , Coated Basalt , Bitumen Coated E-Glass และ wire mesh ตัวอย่างถูกติดตั้งด้วยการใช้ mortar 3 ชนิด ได้แก่ High strength , Normal strength และ TYFO 1:1 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ 9 , 5.5 และ 36 Mpa ตามลำดับ การทดสอบตัวอย่างกระทำด้วยรูปแบบการทดสอบแบบ Static load และ Cyclic load โดยการทดสอบ static จะกระทำกับตัวอย่างที่ใช้อิฐ Brick และ Concrete hollow block ส่วนการทดสอบแบบ Dynamic จะกระทำกับตัวอย่าง Brick และ Sandstone จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง Concrete hollow block ที่ใช้วัสดุ Textile ชนิด E-Glass ใช้ High strength mortar เป็นตัวเชื่อมประสานให้กำลังรับแรงดีที่สุดภายใต้แรงกระทำแบบ Static load จากการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบ Cyclic load ของตัวอย่างทดสอบพบว่าวัสดุ Fiber Textile ทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการรับแรงและค่าความเหนียวของโครงสร้างที่ดี ดูได้จากพฤติกรรมของแรงกระทำแบบวัฏจักร ที่มีความกว้างของกราฟแสดงถึงการสลายพลังงาน สำหรับ Steel Wire Mesh มีพฤติกรรมการรับแรงที่สูงกว่าวัสดุ Textile ทั้ง 3 แต่รูปแบบการสลายพลังงานไม่ดีเท่าที่ควร การวิบัติของตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดจากระนาบภายนอก โดยจะเริ่มแตกหลุดออกมาของวัสดุเชื่อมประสาน

Ozsayin และคณะ(2011) ได้ทำการศึกษาผลของการเสริมกำลังภายหลังด้วยแผ่น CFRP ของโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อซึ่งเป็นอิฐแบบมีรูกลวง ในการศึกษาได้ทำการทดสอบทั้งหมด 36 ตัวอย่างที่เป็นผนังอิฐก่อแบบรูกลวงภายใต้แรงกระทำแบบแรงอัดตามแนวแกนและแรงดิ่งในแนวทแยงก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากผลการทดสอบให้ผลของกำลังรับแรงในแนวแกนและแรงดิ่งในแนวทแยงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลัง และในการทดสอบตัวอย่างเสริมกำลังในผนังอิฐก่อแบบรูกลวงด้วยแผ่น CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร รวมทั้งได้ทำการวิเคราะห์จำลองโมเดลด้วยโปรแกรม IDARC2D ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองแบบไม่เชิงเส้น ผลการจำลองให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบแสดงถึงการสร้างแบบจำลองมีความถูกต้องในการจำลองค่าการณแรงที่เกิดขึ้น

Mohammadi และคณะ (2011) ได้นำเสนอวิธีการทดสอบเพื่อปรับปรุงความเหนียวให้กับโครงสร้างข้อแข็ง ในการทดสอบจะใช้ 6 ตัวอย่างและมีขนาด 2/3 ของขนาดจริง โดยมีการทดสอบ 3 วิธีการ โดยวิธีการที่ 1 เป็นการทดสอบผนังโดยมีช่องเปิดที่มุมทั้ง 2 ของโครงข้อแข็งเพื่อดูพฤติกรรมความเหนียวของผนัง โดยใช้ตัวอย่าง 2 ตัวอย่างคือ SP1 และ CL-SP1 โดยที่ SP1 คือตัวอย่างที่ไม่มีช่องเปิดที่มุม และ CL-SP1 คือตัวอย่างที่มีช่องเปิดที่มุม ตัวอย่างจะใช้โครงข้อแข็งขนาด 2000x2860 มม.วิธีที่ 2 เป็นการตัดโครงข้อแข็ง เพื่อศึกษาผลของความเหนียวของโครงสร้าง โดยตัวอย่างที่ใช้ 2 ตัวอย่างคือ SP2 และ CF-SP2 โดยที่ตัวอย่าง SP2 คือตัวอย่างที่ไม่มีการตัดโครงข้อแข็ง CF-SP2 คือตัวอย่างที่มีการตัดโครงข้อแข็ง วิธีที่ 3 เป็นการตัดชิ้นส่วนของผนังออกเป็น 3 ช่วงเพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างโดยในผนังจะมีแผ่นเหล็กขนาด 2850x200x2 มม.อยู่ในผนังที่ช่วงระยะ 1/3 และ 2/3 ของผนังเพื่อศึกษาผลของความเหนียวของโครงสร้าง โดยตัวอย่างที่ใช้ 2 ตัวอย่างคือ SP3 และ SF-SP3 โดยที่ตัวอย่าง SP3 คือตัวอย่างที่ไม่มีการแบ่งช่วงการเคลื่อนตัว SF-SP3 คือตัวอย่างที่มีการแบ่งช่วงการเคลื่อนตัวออกเป็น 2 ช่วง การทดสอบจะกระทำภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างทั้ง 2 ทิศทางโดยมีการติดตั้งที่ปลายของโครงข้อแข็งทั้ง 2 ข้าง จากการทดสอบทั้ง 3 วิธีการพบว่าทุกวิธีการที่ทำการทดสอบจะได้กำลังที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมทั้งหมดดังแสดงความสัมพันธ์ของกราฟแรงกระทำแบบวัฏจักรสำหรับตัวอย่าง CL-SP1 จะให้ค่าความ

เหนียวของโครงสร้างที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง SP1 แต่อีก 2 วิธีให้ค่าความเหนียวของโครงสร้างที่ลดลง รวมถึงการสลายพลังงาน

Tasnimi และ Mohebkah (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของผนังในโครงข้อแข็งเหล็ก ซึ่งมีช่องเปิด ในการศึกษาใช้ตัวอย่างที่ทำการทดสอบจำนวน 6 ตัวอย่างซึ่งเป็นตัวอย่างขนาดใหญ่ โดยมี ตัวอย่าง BF เป็นตัวอย่างที่มีโครงข้อแข็งเหล็กอย่างเดียว ตัวอย่าง SW เป็นตัวอย่างผนังทึบ ส่วนตัวอย่าง SW1-SW4 เป็นตัวอย่างที่มีช่องเปิดดังแสดงในภาพประกอบที่ 14 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างได้ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างทั้ง 2 ทิศทาง และมีการป้องกันการเกิดแรงนอกระนาบของตัวผนัง จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างในรูปของ กราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร พบว่าตัวอย่าง BF มีความสามารถรับกำลังได้ต่ำสุด ส่วนตัวอย่าง SW ซึ่งเป็น ตัวอย่างผนังทึบพบว่า กำลังรับแรงที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแต่ค่าของความเหนียวของโครงสร้างยัง เท่าเดิม เนื่องจากเมื่อเกิดการวิบัติของผนังในโครงข้อแข็ง โครงข้อแข็งยังมีความสามารถรับกำลังได้จนถึง การวิบัติของตัวโครงสร้างเอง ตัวอย่าง SW1-SW2 ก็ให้กำลังที่ดีกว่าตัวอย่าง SW เช่นกันแต่ค่าของกำลังก็ ขึ้นอยู่กับช่องเปิดด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่ยังมีช่องเปิดกว้างมากกำลังการรับแรงก็จะค่อยๆลดลงตามขนาด ของช่องเปิด

Ismail และคณะ (2011) ได้นำเสนอเทคนิคการเสริมกำลังรับแรงเฉือนในแนวทแยงให้กับ ผนังอิฐก่อโดยใช้ Twisted stainless steel reinforcement (TSNSM) ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทั้งหมด 17 ตัวอย่างแบ่งรูปแบบผนังออกเป็น 2 แบบโดยทั้ง 2 แบบมีขนาดเท่ากันแตกต่างกันที่ความหนา 110 และ 220 mm. สำหรับผนังแบบที่ 1 และผนังแบบที่ 2 ตามลำดับ รูปแบบการเสริมกำลังจะใช้ stainless steel ชนิดเกลียวในการเสริมผนังอิฐก่อในรูปแบบต่างๆ โดยมีขนาด 6 และ 10 mm. ใช้ปูนก่อผนังอัตราส่วน ซีเมนต์:ปูนขาว:ทราย ที่ 1:1:6 จากการทดสอบจะกระทำภายใต้แรงกระทำในแนวแกนสำหรับตัวอย่างผนัง แบบที่ 1 และแรงกระทำทางด้านข้างสำหรับตัวอย่างแบบที่ 2 จากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังผนังด้วย TSNSM ในแนวนอนดังแสดงในตัวอย่าง W1S-7 และ W1S-8 ให้กำลังรับแรงเฉือนในแนวทแยงที่ลดลงเมื่อ เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม การเสริมเหล็กในแนวตั้งให้กำลังรับแรงที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุมทั้งที่ให้แรง กระทำตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างของตัวอย่าง การวิบัติจะเกิดจากแรงเฉือนโดยเริ่มจากมุม ของตัวผนังอิฐก่อ

Ayoub Dehghani และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษา การเสริมกำลังของโครงสร้างข้อแข็ง คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตผสมซีเมนต์ (ECC) ซึ่งใช้เป็นวัสดุในการฉาบผิวผนังอิฐก่อ ในการ ทดสอบเป็นการทดสอบตัวอย่างขนาด  $\frac{1}{2}$  ของตัวอย่างจริง จำนวน 3 ตัวอย่างได้แก่ โครงข้อแข็งเปล้า (BF) โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วยผนังอิฐก่อภายใน (IF) และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วย ผนังอิฐก่อภายในเสริมกำลังด้วยการฉาบผิวด้วยวัสดุคอมโพสิตผสมซีเมนต์ (IF-DL15) การทดสอบภายใต้ แรงกระทำด้านข้าง ซึ่งจะให้ค่าแรงในแกนที่เสาขนาด 300 kN และใช้เครื่องไฮดรอลิกส์ขนาด 1000 kN การให้แรงเป็นไปตาม FEMA461 จากการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตผสมซีเมนต์ (ECC) หนา 15 mm ให้ค่ากำลังที่ได้สูงกว่าตัวอย่าง โครงข้อแข็งเปล้า (BF) และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริม เหล็กก่อด้วยผนังอิฐก่อภายใน (IF) แสดงให้เห็นถึงวัสดุ ECC ซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุเส้นใยไฟเบอร์ วัสดุปอซโซลานและวัสดุอื่นๆ ในส่วนผสมสามารถทำให้เกิดความเหนียวและความยืดหยุ่นที่ดีทำให้กำลังที่ ได้สูงกว่าตัวอย่าง BF เท่ากับ 175% และ IF เท่ากับ 86% ลักษณะการวิบัติเกิดจากแรงเฉือนในผนัง ช่วงแรก และส่งผลต่อการวิบัติแบบแรงเฉือนที่เสา

Gulseren Erol และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษา การเสริมกำลังของโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) ในการทดสอบเป็นการทดสอบตัวอย่างขนาด  $\frac{1}{2}$  ของตัวอย่างจริง จำนวน 5 ตัวอย่างได้แก่ ตัวอย่างโครงข้อแข็งเปล่า ตัวอย่างโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วยผนังอิฐก่อภายใน (Specimen N1) ตัวอย่างโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วยผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วย CFRP ในแนวทแยง และมีการเสริมปิดบริเวณจุดต่อเสาและคาน โดยมีการปิดฉาบด้วย epoxy (Specimen N2) ตัวอย่างโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วยผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วย CFRP ในแนวทแยง โดยไม่มีการเสริมปิดบริเวณจุดต่อเสาและคานมีการปิดฉาบด้วย epoxy (Specimen N3) ตัวอย่างโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อด้วยผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วย CFRP ในแนวทแยง และมีการเสริมปิดบริเวณจุดต่อเสาและคาน โดยไม่มีการปิดฉาบด้วย epoxy (Specimen N4) การทดสอบภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างและแรงกระทำตามแนวแกน ผลการทดสอบพบว่า Specimen N2 ให้ค่ากำลังรับแรงกระทำสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างทั้งหมด การเสริมกำลังด้วย CFRP ในแนวทแยงและบริเวณจุดต่อมีการปิดฉาบด้วย epoxy ให้ค่ากำลังที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีการฉาบปิดตัวอย่างด้วย epoxy สำหรับตัวอย่าง Specimen N3 เนื่องจากมีการเสริมกำลังเฉพาะในทิศทางแนวทแยงและเสริมปิดที่มุมผนังทั้ง 4 มุม ให้ค่ากำลังรับแรงสูงกว่าตัวอย่าง Specimen N4 เนื่องจากผลของการฉาบปิดด้วย epoxy มีผลต่อกำลังรับแรงของ CFRP

### 2.7.2 ผลงานวิจัยเทคนิคการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก (Expanded Metal)

โดยงานวิจัยในอดีตที่น่าสนใจเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกยังมีการวิจัยที่น้อยเนื่องจากเป็นวัสดุใหม่โดยมีการวิจัยดังนี้

Kazemi และ Morshed (2005) ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีการเสริมด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยตะแกรงเหล็กฉีกซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกัน 2 ชนิดในการเสริมกำลังและมีขนาดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในภาพประกอบที่ 16 ตัวอย่างในการวิจัยมีทั้งหมด 6 ตัวอย่างโดยมีตัวอย่าง C1 และ C2, C3 เป็นตัวอย่างควบคุมเสริมเหล็กขนาด 16 มม. 4 เส้นและมีเหล็กปลอก 6 มม. ระยะห่าง 260 กับ 130 มม. ตามลำดับ ตัวอย่าง C1-SC เป็นตัวอย่างที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กฉีก ชนิดที่ 1 เสริม 1 ชั้น ตัวอย่าง C2-SF เป็นตัวอย่างที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กฉีก ชนิดที่ 2 เสริม 2 ชั้นตัวอย่าง C3-SF เป็นตัวอย่างที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กฉีก ชนิดที่ 2 เสริม 1 ชั้น และตัวอย่าง C3-STเป็นตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กตะแกรง 8 มม. @ 90 มม. ทุกตัวอย่างใช้มอร์ตาร์ในการเสริมกำลัง 30 Mpa จากการทดสอบตัวอย่างภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างพบว่าตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกทุกตัวอย่างให้กำลังรับแรงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม การใช้ตะแกรงเหล็กฉีกชนิดที่ 1 ให้การเคลื่อนตัวด้านข้างมากกว่าการใช้ตะแกรงเหล็กฉีกชนิดที่ 2 เนื่องจากผลของความหนาของตัววัสดุ จากความสัมพันธ์ในรูปของกราฟแรงกระทำแบบวัฏจักร พบว่ามีการสลายพลังงานที่ดีและมีค่าความเหนียวของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น

Teixeira และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อแรงเฉือนของแผ่นตะแกรงเหล็กฉีก โดยในการศึกษาได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อการรับแรงเฉือนที่มีผลต่อตะแกรงเหล็กฉีกดังนี้ ชนิดของแผ่นตะแกรงเหล็กฉีก มุมของการวางแผ่นตะแกรงเหล็กฉีกที่ 0 องศา และทิศทาง 90 องศา และขนาดของตะแกรงเหล็กฉีก ในการทดสอบในงานวิจัยได้ใช้ตะแกรงเหล็กฉีก 2 แบบ ได้แก่ แผ่นตะแกรงเหล็กฉีกมาตรฐาน (EMS) และแผ่นตะแกรงเหล็กฉีกแบบแบนเรียบ (EMF) โดยจะแบ่งตะแกรงเหล็กฉีกออกเป็น 3 ประเภทคือ A ,B และ C แผ่นตะแกรงเหล็กฉีกทั้ง 2 แบบ จะถูกทดสอบโดยการวางแนวของแผ่นในทิศทาง

0 องศา และทิศทาง 90 องศา รวมถึงพิจารณาช่องของจำนวนตะแกรงที่แตกต่างกัน ซึ่งในตะแกรงระบบ EMS และ EMF จะใช้จำนวนช่องแนวนอน  $N_c$  ในทิศทาง 0 องศา เท่ากับ 8 , 12 และ 16 ช่อง ส่วนจำนวนช่องแนวตั้ง  $N_r$  เท่ากับ 10, 12,14,15,16,18,20,21,24 และ 28 ส่วนตะแกรงระบบ EMS และ EMF จะใช้จำนวนช่องแนวนอน  $N_c$  ในทิศทาง 90 องศา เท่ากับ 16 ,24 และ 32 ช่อง ส่วนจำนวนช่องแนวตั้ง  $N_r$  เท่ากับ 4,6,8,9,12 และ 16 ช่อง ในการให้โหลดกระทำจะควบคุมการให้โหลด 50 ครั้ง จากการทดสอบได้ผลสรุปดังนี้ ความสูงของแผ่นตะแกรงทั้ง 2 แบบ มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น รูปแบบประเภทของตะแกรงเหล็กฉีก A ,B และ C ให้ค่ากำลังรับแรงของตะแกรงเหล็กฉีกที่แตกต่างกันโดยชนิด C จะให้ค่ากำลังรับแรงสูงสุด สำหรับทิศทางการวางแนวของตะแกรงเหล็กฉีกสำหรับแบบ EMS พบว่าการวางแนวทิศทาง 0 องศา จะให้ค่ากำลังรับแรงสูงกว่าการวางแนวในทิศทาง 90 องศา แต่การวางแนวของตะแกรงเหล็กฉีกสำหรับแบบ EMF พบว่าการวางแนวทิศทาง 90 องศา จะให้ค่ากำลังรับแรงสูงกว่าการวางแนวในทิศทาง 0 องศา จำนวนช่องของตะแกรงเหล็กฉีกมีผลต่อกำลังรับแรงเมื่อจำนวนช่องเพิ่มขึ้นมีผลต่อกำลังรับแรงที่ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงสูงสุดพบว่าตะแกรงระบบ EMF จะให้ค่ากำลังรับแรงสูงกว่าระบบ EMS

### 2.7.3 ผลงานวิจัยการวิเคราะห์จำลองโครงสร้างข้อแข็ง

Saneinejad และ Hobbs (1995) ได้ทำการศึกษาการออกแบบไม่เชิงเส้นสำหรับผนังอิฐก่อในโครงสร้างข้อแข็ง ในการศึกษาใช้วิธีการวิเคราะห์และออกแบบสำหรับโครงสร้างข้อแข็งเหล็กซึ่งในโครงสร้างข้อแข็งจะเป็นคอนกรีตหรือผนังอิฐก่อเพื่อวิเคราะห์แรงภายในแบบ nonlinear finite element (NLFE) สำหรับพฤติกรรมของผนังอิฐก่อในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นมีข้อจำกัดด้านความเหนียวขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ วิธีการหาค่ากำลังและค่าสติฟเนสของโครงสร้างข้อแข็งผนังอิฐก่อรวมถึงการแตกร้าวจากการวิบัติในรูปแบบต่างๆ สามารถคำนวณค่าที่ได้จากสมการสำหรับการวิบัติของผนังอิฐก่อเป็นกรณีไป แต่ก็ยังอยู่บนพื้นฐานของแรงค้ำยันเทียบเท่า

Madan และคณะ (1997) ได้ทำการวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองโมเดลของผนังอิฐก่อสำหรับโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กของแรงค้ำยันเทียบเท่า ในการจำลองได้ทำการควบคุมค่าพารามิเตอร์ได้แก่ ค่าสติฟเนส แรงทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง รวมถึงค่าพารามิเตอร์คงที่ต่างๆ การสร้างแบบจำลองโดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม IDARC2D โดยจำลองจากโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น โดยที่ชั้น 1 และ 3 ไม่มีผนังอิฐก่อเป็นส่วนโครงสร้างข้อแข็งเปล่า ส่วนชั้น 2 จะก่อด้วยผนังอิฐก่อ จากผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยโปรแกรม IDARC2D พบว่าผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้ง 3 ชั้น แสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบได้อย่างแม่นยำ

Aslam และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาการรับแรงแผ่นดินไหวสำหรับโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับผนังอิฐก่อที่ทำให้เสถียรเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนจะเกิดขึ้นกับพฤติกรรมของโครงสร้างข้อแข็งและผนังอิฐก่อ การวิเคราะห์ผลจากการเกิดแผ่นดินไหวจะวิเคราะห์แบบไดนามิกไม่เชิงเส้นของแบบจำลองโครงสร้างข้อแข็ง 2 มิติซึ่งประกอบด้วย หน้าตัดไฟเบอร์สำหรับแรงในแนวแกนและโมเมนต์ การแตกร้าวของผนังและผลของการวิบัติเนื่องจากผลของผนังต่อการเกิดแรงเฉือนที่เสถียร สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถรูปแบบซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างข้อแข็งเปล่า โครงสร้างข้อแข็งผนังอิฐก่อและโครงสร้างข้อแข็งที่มีผนังอิฐก่อบางส่วนในโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์แสดงการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่เสถียรที่ได้จากแบบจำลองและเกิดแรงเฉือนต่อโครงสร้างของเสา



Mohyeddin และคณะ(2017) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แบบจำลองค้ำยันเทียบเท่าโดยใช้วิธี finite element (FE) โดยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองการค้ำยันเทียบเท่ากับการศึกษาอื่นๆ เช่น El-Dakhkhni , Mainstone ,Paulay and Priestley เป็นต้น ซึ่งการศึกษาเป็นการจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น โดยได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโครงข้อแข็งผนังอิฐก่อ จากการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองค้ำยันเทียบเท่าโดยใช้วิธี finite element (FE) ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการค้ำยันแบบอื่นๆพบว่าแบบจำลองทั่วไปจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกันโดยส่วนใหญ่ แต่จะมีผลการทดสอบที่แตกต่างกันอย่างเช่นของ Holmes , Stafford Smitht , Mainstone ,Paulay and Priestley แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองค้ำยันเทียบเท่าโดยใช้วิธีการ finite element (FE) สามารถใช้ในการจำลองได้เป็นอย่างดี

Yekrangnia และ Mohammadi (2017) ได้ทำการศึกษารูปแบบการจำลองค้ำยันสำหรับผนังอิฐก่อในโครงข้อแข็งเหล็ก การสร้างแบบจำลองโมเดลของการค้ำยันสำหรับผนังอิฐก่อเพื่อต้านทานโมเมนต์ของโครงข้อแข็งเหล็ก รูปแบบการจำลองโมเดลที่น่าเสนอจะขึ้นอยู่กับผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการทาง finite element (FE) การศึกษาได้มีการเปรียบเทียบผลของรูปแบบการวิเคราะห์และการจำลองโมเดลอื่นๆ ได้แก่ ASCE ของระบบคานกับเสา และของ El-Dakhkhni ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของโครงข้อแข็ง โดยการจำลองโมเดลด้วยวิธี finite element (FE) เปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งให้ผลของการจำลองได้เป็นอย่างดี

## 2.8 สรุปผลการทบทวนวรรณกรรม

จากผลการวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาการเสริมกำลังผนังก่ออิฐในโครงข้อแข็งโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งใช้ตะแกรงเหล็กฉีกในการเสริมกำลัง เนื่องจากโครงสร้างอาคารที่มีผนังก่ออิฐจะมีส่วนช่วยในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างได้ สำหรับอาคารเรียน โดยทั่วไปจะมีรูปแบบผังอาคารเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีการแบ่งกันด้วยผนังก่ออิฐแบ่งห้องเป็นส่วนๆ และมีทางเดินแคบและยาวไปตามอาคารเรียน มีการทำช่องเปิดที่ผนังก่ออิฐเพื่อติดตั้งประตูและหน้าต่างไปตามความยาวของอาคาร และมีการจัดวางลักษณะเสาอาคารให้มีด้านแคบอยู่ในทิศทางตามยาวของอาคาร ทำให้โครงสร้างอาคาร มีความอ่อนแอในทิศทางด้านยาวของอาคาร ดังนั้นการใช้เสริมกำลังผนังก่ออิฐจึงมีส่วนช่วยในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่สำคัญ ทั้งนี้การเสริมกำลังผนังก่ออิฐ โดยการใช้เฟอร์โรซีเมนต์ จะไม่กีดขวางการใช้ประโยชน์ของพื้นที่อาคาร และมีขั้นตอนการก่อสร้างที่ง่ายกว่าการเสริมกำลังด้วยโครงค้ำยันแบบโครงยึดตั้งไร้การโก่งเดาะ (Buckling Restrain Braced Frame) รวมถึงค่าใช้จ่ายที่ทำการเสริมกำลังที่ไม่สูงมากนัก

## 2.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในห้องปฏิบัติการโดยทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้งหมด โดยในขั้นตอนนี้จะมีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของผนังอิฐก่อที่มีการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกภายใต้มาตรฐาน ASTM E519-07 เพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนของผนังอิฐก่อ โดยในขั้นตอนการทดสอบได้เลือกตะแกรง เหล็กฉีก 4 ชนิด

รวมถึงการทดสอบปรีซีมอิฐก่อที่มีการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกภายใต้มาตรฐาน ASTM C1314-07 เพื่อเป็นตัวเลือกในการใช้วัสดุที่ดีที่สุดต่อไปในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดสอบโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเสริมและหลังเสริมกำลังโดยเลือกตะแกรงเหล็กฉีกที่ให้กำลังที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 1 มาทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ผลการทดสอบและนำผลการทดสอบที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินกำลังจะใช้ทฤษฎีการวิบัติของผนังอิฐก่อภายในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ลักษณะได้แก่ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวทแยง (Diagonal Compression Resistance) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบเลื่อนไถล (Sliding Shear Resistance) และ กำลังต้านทานแรงกดอัดที่มุมผนัง (Corner Compression Resistance) ส่วนในเรื่องการออกแบบโครงสร้างเฟอร์โรซีเมนต์เป็นไปตามมาตรฐาน ACI549

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างแบบจำลองโมเดลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้ด้วยโปรแกรม RUAUMOKO ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรแบบไม่เชิงเส้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีในการสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักร (hysteretic)