

## การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวร่วมกับผนังอิฐก่อ CYCLIC TESTING OF SEISMICALLY DESIGNED RC FRAME WITH MASONRY INFILL WALL

ไตรรัตน์ สังข์มงคล<sup>1\*</sup>, วงศา วรารักษ์สังข์<sup>2</sup>, จริญญา ศรีชัย<sup>3</sup>, สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, จังหวัดชลบุรี, ประเทศไทย

\*Corresponding author address: trirat.connect@mail.kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

อาคารที่มีผนังอิฐก่อเป็นที่นิยมใช้กันในประเทศไทย ผนังอิฐก่อสามารถเพิ่มกำลังและความแข็งแรงด้านข้างให้กับโครงสร้างอาคาร แต่อย่างไรก็ตามปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้างนั้นอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายในรูปแบบการวิบัติจากการเฉือนที่เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายที่ทำให้โครงสร้างสูญเสียเสถียรภาพทั้งการรับแรงในแนวตั้งและด้านข้าง งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบความเหนียวจำกัด (Intermediate Reinforce Concrete Moment Frame) ที่ได้รับการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายจากแรงเฉือนที่เสี้ยนเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้าง ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเท่าอาคารจริงในห้องปฏิบัติการ ภายใต้แรงสลับทิศและแรงในแนวตั้ง จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการออกแบบที่ใช้ สามารถป้องกันการความเสียหายที่เสา และพบแต่รอยแตกร้าวเฉพาะในแนวนอนที่บริเวณปลายของเสาทั้งสองต้น ซึ่งเป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดจากแรงดัด ทำให้โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่มีความเหนียวและเป็นไปตามพฤติกรรมการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว โดยวิธีการออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เสริมกับวิธีการออกแบบที่มีกำหนดในมาตรฐานทั่วไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างได้

**คำสำคัญ:** การทดสอบภายใต้แรงสลับทิศ, การออกแบบโครงสร้าง, การออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหว, โครงสร้างแรงดัด, ผนังอิฐก่อ

### Abstract

Reinforce concrete frames with masonry infill walls are commonly used in many countries including Thailand. In general, the presence of masonry walls can increase the overall frame lateral strength. However, the infill-frame interaction can create an undesirable failure mode particularly the column shear failure which may lead to the loss of gravity load carrying capacity and frame stability. This research investigated the behavior of intermediate reinforced concrete moment frame with infill walls designed to prevent local shear damage in the columns due to infill-frame interaction. A full-scale reinforce concrete frame with infill wall was tested in the laboratory under both the vertical and increasing lateral loads. Based on the result of this test, it was found that, if properly designed, the damage due to shear at the ends of the columns can be prevented. The test showed that the cracks appeared only in the horizontal direction characteristics of the flexural cracks. This resulted in the ductile behavior of the frame, and was in line with the concept of earthquake resistant structure design. The design methods presented in this research can be supplemented with design methods that are defined in general standards. This will be useful in increasing the strength of the building frame.

**Keywords:** Building frame design, Cyclic Test, Masonry wall RC frame, Seismic Design

### 1. บทนำ

ผนังอิฐก่อเป็นส่วนสำคัญในการเป็นส่วนประกอบของอาคารจำนวนมากโดยเฉพาะอาคารที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต ทำให้พบว่าผนังอิฐก่อมีผลอย่างมากต่อผลตอบสนองของโครงสร้างจากแผ่นดินไหว ผนังอิฐก่อก่อนนั้นอาจมีทั้งผลดีและผลเสียต่อพฤติกรรมโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับลักษณะการวางตัวของผนังและกำลังวัสดุที่ใช้ พฤติกรรมของโครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อก่อนนั้นมีความซับซ้อนและขึ้นกับหลาย

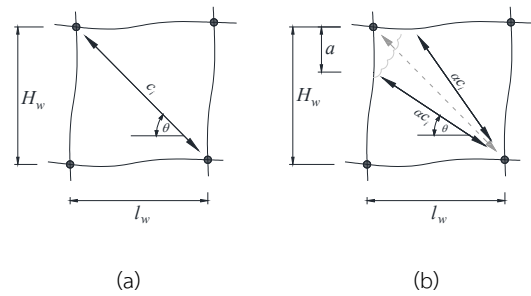
องค์ประกอบ โดยทั่วไปผนังอิฐก่อจะเพิ่มกำลังรับแรงด้านข้างให้กับโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้อาคารสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามผนังอิฐก่ออาจเพิ่มแรงภายในโครงสร้าง บางจุดให้มากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายเฉพาะที่ (Local Failure) หรือเสียหายทั้งอาคารได้ (Global Failure) ปัจจุบันได้มีการศึกษาเชิงการทดสอบจำนวนมากเพื่อประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ Wararuksajja และคณะ [1] จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา สรุป

ได้ว่ารูปแบบการวิบัติที่สำคัญและเกิดขึ้นบ่อยครั้งคือ การวิบัติจากแรงเฉือนที่เสาอันเนื่องมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงอาคารและผนังอิฐก่อ ทำให้เสาไม่สามารถรับแรงตามแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกได้ และในที่สุดจะเป็นผลให้อาคารเกิดการวิบัติ Moretti [2]

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของโครงอาคารด้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบความเหนียวจำกัด (Intermediate Reinforce Concrete Moment Frame) ที่ได้รับการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายจากแรงเฉือนที่เสาอันเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังอิฐก่อและโครงอาคาร ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเท่าอาคารจริงในห้องปฏิบัติการ ภายใต้แรงสลับทิศและแรงในแนวตั้ง วิธีการออกแบบที่ได้พัฒนาขึ้นมีข้อดีคือ สามารถใช้ได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนวิธีการออกแบบตามข้อกำหนดที่มีอยู่หรือตามขั้นตอนปฏิบัติ เพียงแต่ทำการตรวจสอบแรงเฉือนในเสาที่เพิ่มขึ้นจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงอาคารและผนังอิฐก่อ

## 2. พฤติกรรมและการเสียรูป

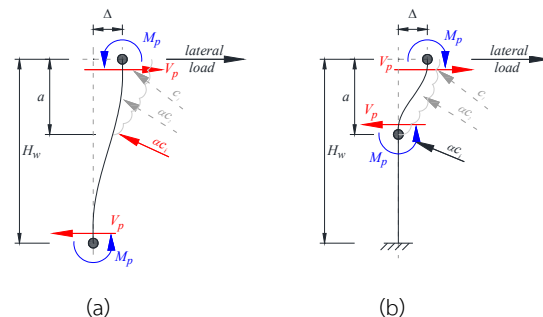
จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่าพฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงแผ่นดินไหวหรือแรงด้านข้างสามารถจำลองได้โดยใช้ค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่า (Equivalent Strut) ค้ำยันระหว่างจุดต่อของโครงอาคารดังรูปที่ 1(a) โดยกำลังรับแรงอัดของค้ำยัน ( $C_i$ ) จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบการวิบัติ (Failure Mode) ของผนังอิฐก่อ เช่น การเฉือนไสลด์ (Shear Sliding) หรือการอัดแตกที่มุมของผนัง (Corner Crushing) จากลักษณะการก่อสร้างผนังอิฐในประเทศไทยที่มีการฉาบผนังอิฐ และการใช้ปูนกาวที่มีกำลังสูงนั้น ส่งผลให้ผนังอิฐมีความแข็งแรงสูง จึงทำให้ความเสียหายในรูปแบบการอัดแตกที่มุมผนังอิฐเป็นรูปแบบที่จะเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ความเสียหายที่มุมของผนังอิฐนี้จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเสาและผนัง และทำให้ลักษณะการค้ำยันเปลี่ยนเป็นค้ำยันคู้ที่ค้ำเสาและคานบริเวณที่เกิดช่องเปิดดังรูปที่ 1(b) ในจุดนี้การค้ำของผนังอิฐจะส่งผลให้แรงเฉือนในเสาเพิ่มสูงขึ้น และอาจทำให้เสาเกิดความเสียหายในรูปแบบแรงเฉือนขึ้นได้ (Column Shear Failure) แต่หากกำลังรับแรงเฉือนของเสามีค่ามากกว่าแรงจากผนังอิฐ การอัดแตกของผนังอิฐจะกระจายตัวมากขึ้นตามแนวเสาโดยไม่เกิดการวิบัติจากแรงเฉือน ดังนั้นลักษณะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นของโครงอาคารที่มีผนังอิฐก่อขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของผนังอิฐก่อและกำลังรับแรงเฉือนของเสา



รูปที่ 1 พฤติกรรมผนังอิฐภายใต้แรงด้านข้าง (a) สถานะเริ่มต้น (b) หลังเกิดความเสียหายที่มุม

### 2.1. วิธีการออกแบบ

การออกแบบนี้เป็นการออกแบบป้องกันการเสียหายรูปแบบการเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาเนื่องจากผนังอิฐก่อโดยไม่พิจารณาผลกระทบของผนังที่ช่วยเพิ่มกำลังและสติฟเนส (Stiffness) ให้กับโครงอาคาร ในการออกแบบจะกำหนดให้ผนังและเสาเกิดความเสียหายขึ้นได้ 2 รูปแบบ ในกรณีที่เสามีความแข็งแรงเพียงพอผนังอิฐก่อจะถูกกดอัดให้เกิดความเสียหายกระจายตัวลงตามความสูงของเสาจนกระทั่งเกิดโมเมนต์พลาสติกที่ปลายทั้งสองด้านของเสาดังรูปที่ 2(a) ส่วนในกรณีที่ผนังอิฐมีความแข็งแรงมาก ผนังจะค้ำเสามีลักษณะเป็นเสาสั้น และเกิดโมเมนต์พลาสติกขึ้นที่บริเวณช่องเปิดดังรูปที่ 2(b)



รูปที่ 2 พฤติกรรมรูปแบบการเกิดกลไกการวิบัติ (Mechanism) สถานะเริ่มต้น (a) ผนังและเสา (b) เสาสั้นจากการค้ำของผนัง [1]

จากพฤติกรรมของเสาที่ได้กล่าวในข้างต้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) และ (2) สำหรับกรณีในรูป 2(a) และ 2(b) ตามลำดับ

$$V_a = \frac{2M_p}{H_w} + \frac{\alpha C_i \cos \theta (H_w - a)}{H_w} \quad (1)$$

$$V_b = \frac{2M_p}{a} \quad (2)$$

โดยที่  $C_i$  คือกำลังรับแรงอัดของค้ำยันเทียบเท่า  $M_p$  คือโมเมนต์พลาสติกของเสา,  $a$  คือความกว้างของช่องเปิดที่ผนังเกิดความเสียหาย,  $H_w$  คือความสูงของผนัง,  $\alpha$  คือค่าลดกำลังรับแรงอัดเทียบเท่าเนื่องจากผนังเกิดความเสียหาย และ  $\theta$  คือมุมระหว่างค้ำยันกับระนาบแนวราบ จากแรงเฉือนที่สามารถเกิดขึ้นกับเสาในสองกรณีดังกล่าว รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงจะหาได้จากแรงเฉือนที่น้อยที่สุดจากสมการที่ (1) และ สมการที่ (2)

$$V_u = \min(V_a, V_b) \quad (3)$$

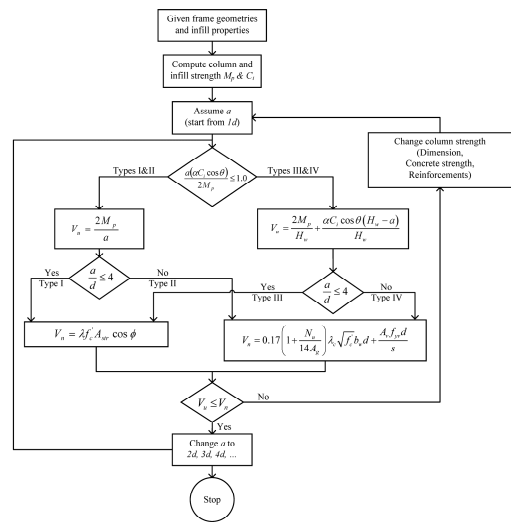
ตามพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างรับแผ่นดินไหวนั้นจะกำหนดให้มีลักษณะความเสียหายในรูปแบบที่มีความเหนียวดังนั้นลักษณะกลไกการวิบัติแบบแรกในรูปแบบ 2(a) จึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกว่าในการใช้งาน ดังนั้นจึงควรกำหนดให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นของกรณีแรกมีค่าน้อยกว่ากรณีที่สอง

$$\frac{2M_p}{H_w} + \frac{\alpha C_i \cos \theta (H_w - a)}{H_w} \leq \frac{2M_p}{a} \quad (4)$$

หรือ

$$\frac{\alpha(\alpha C_i \cos \theta)}{2M_p} \leq 1 \quad (5)$$

การออกแบบเสาเพื่อป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนจะทำได้โดยการกำหนดให้ ขนาดช่องเปิดมีค่าเริ่มต้นที่ค่าเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของเสา ( $d$ ) และทำการเปรียบเทียบค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสา จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนค่าขนาดความกว้างเป็นค่าต่างๆ ตามความสูงของเสาและทำการตรวจสอบแรงเฉือนในแต่ละค่าขนาดช่องเปิดจนครอบคลุมตลอดความยาวเสา การออกแบบป้องกันการเกิดการวิบัติแบบเฉือนของเสาขึ้นอยู่กับปริมาณแรงเฉือน (Shear Demand) และกำลังรับแรงเฉือน (Shear Capacity) ของเสา ขั้นตอนการออกแบบป้องกันการวิบัติแบบเฉือนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 รายละเอียดต่างๆ สามารถดูเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของWararuksajja และคณะ [1]



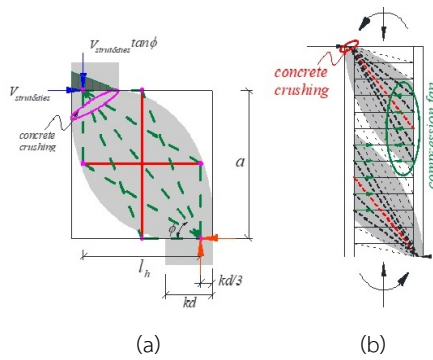
รูปที่ 3 แผนผังการออกแบบ [1]

### 3. กำลังรับแรงเฉือนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

การพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อกมีความแตกต่างจากโครงสร้างที่ไม่มีผนังอิฐก่อกมาก จากพฤติกรรมความเสียหายที่ได้กล่าวมา (รูปที่ 2) จะพบว่าขนาดช่องเปิด ( $a$ ) ส่งผลต่อปริมาณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสา นอกจากนั้นยังส่งผลต่ออัตราส่วนความยาวช่วงเฉือน ( $a/d$ ) ของเสา ซึ่งทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสามีค่าแตกต่างกัน สำหรับช่องเปิดขนาดเล็กที่อัตราส่วนความยาวช่วงเฉือนน้อยกว่า 4 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณจากแบบจำลอง Strut and Tie จะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากกว่า Moretti [2] ส่วนในกรณีช่องเปิดมีขนาดความกว้างมากขึ้นจนเมื่ออัตราส่วนความยาวช่วงเฉือนมีค่ามากกว่า 4 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสามารถหาได้โดยใช้สมการที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบทั่วไปได้ การประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสา จึงควรศึกษาและเลือกใช้สมการการประเมินกำลังอย่างเหมาะสม เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพ

#### 3.1 กำลังรับแรงเฉือนของเสาสั้น

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับกรณีที่ช่องเปิดมีขนาดเล็ก ที่ทำให้อัตราส่วนความยาวช่วงเฉือนน้อยกว่า 4 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณจากแบบจำลอง Strut and Tie จะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากกว่า



รูปที่ 4 แรงในเสาสั้น (a) bottle-shape strut (b) fan-shaped strut

ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสาโดย Hwang and Lee [3] ได้เสนอวิธีการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสาในแต่ละอัตราส่วนความยาวช่วงเฉือน ( $a/d$ ) ไว้ เมื่ออัตราส่วนความยาวช่วงเฉือนของเสาไม่เกิน 2 Strut รับแรงอัดในแนวทแยงของเสาจะมีลักษณะเป็นรูปทรงขวด (Bottle Shaped Strut) ดังในรูปที่ 4(a) ในกรณีนี้กำลังรับแรงเฉือนสามารถหาได้จาก

$$\phi V_{nc} = \lambda_s f'_c A_{str} \cos \varphi \quad (6)$$

โดยที่ค่า  $\varphi$  คือมุมของ Strut รับแรงอัดเมื่อวัดจากแนวนอน,  $\lambda_s$  คือค่าดัชนีเชิงเลข (Numerical Index) ของ Strut and Tie ซึ่งขึ้นกับปริมาณเหล็กยื่นในเสาเมื่อมุมของ Strut รับแรงอัดมีค่า  $\varphi$  น้อยกว่า  $45^\circ$  และปริมาณของเหล็กปลอกมีมุมของ Strut รับแรงอัดมีค่ามากกว่า  $45^\circ$ ,  $f'_c$  คือค่ากำลังอัดของคอนกรีตและ  $A_{str}$  คือพื้นที่หน้าตัดของ Strut รับแรงอัด

สำหรับกรณีที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความลึกมากกว่า 2 แต่ น้อยกว่า 4 Hwang and Weng [4] ได้แนะนำว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะหาได้จาก Strut and Tie ในรูปแบบ Fan-Shaped strut ดังรูป 4(b) ซึ่งในกรณีนี้ สูตรกำลังรับแรงเฉือนที่เหมาะสมสามารถในสูตรที่กำหนดในมาตรฐาน ASCE/SEI41-13 [5] ตามที่ระบุในสมการที่ (7)

$$\phi V_{nt} = \left( \frac{0.5\sqrt{f'_c}}{M/Vd} \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.5\sqrt{f'_c}A_g}} \right) 0.8A_g + \frac{A_{sv}f_{yv}d}{s} \quad (7)$$

โดยที่  $A_{sv}$  คือพื้นที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือน,  $f_{yv}$  คือกำลังคลากของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน,  $d$  คือความลึกประสิทธิภาพของเสา,  $N_u$  คือแรงในแนวตั้ง,  $A_g$  คือพื้นที่หน้าตัดของเสา,  $s$  คือระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกและ  $M/Vd$  คือค่าสัดส่วนของโมเมนต์กับแรงเฉือนในเสาคูณค่าความลึกประสิทธิภาพของเสา โดยค่าที่น้อยที่สุดจากสมการที่ (6) และสมการที่ (7) คือกำลังรับแรงเฉือนของเสา

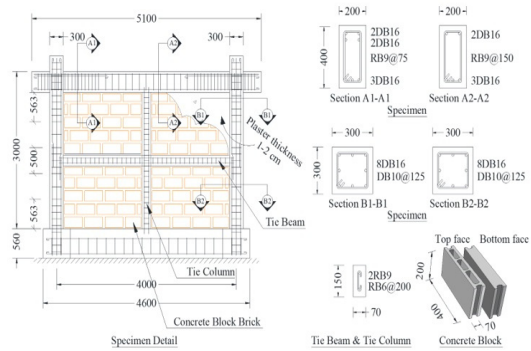
$$\phi V_n = \min(\phi V_{nc}, \phi V_{nt}) \quad (8)$$

#### 4. การทดสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนที่ได้เสนอมานี้ในข้างต้น โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

##### 4.1. ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบนี้เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเหนียวปานกลางที่ใช้ผนังอิฐก่อเป็นอิฐบล็อกและทำการฉาบด้วยมอร์ตาร์ทั้งสองด้าน โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างขนาดกว้าง 4 เมตร สูง 3 เมตร มีลักษณะดังรูปที่ 5 ในงานทดสอบนี้ได้ทดสอบสมบัติอิฐก่อในรูปแบบปริซึม (Prism Test) และวัสดุอื่นๆ ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องโดยมีค่าสมบัติต่างๆ สำหรับใช้ในการออกแบบและค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบในวันทดสอบจริงดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 รายละเอียดโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐ

##### 4.1. วิธีการทดสอบ

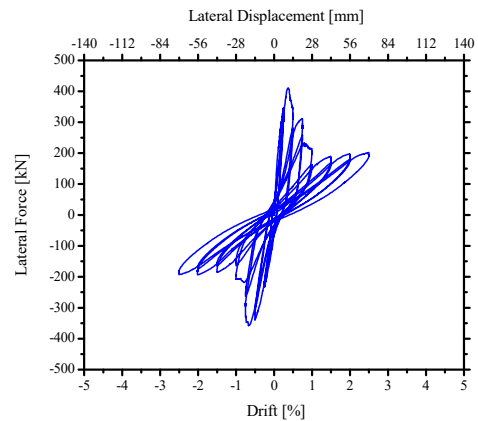
สำหรับการทดสอบนี้ได้ใช้วิธีการให้แรงแบบสลับทิศ (Cyclic Test) กระทำที่แนวศูนย์กลางของคาน โดยใช้การควบคุมค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Displacement Control) และให้แรงกระทำคงที่ในแนวตั้ง 350 kN ที่บริเวณด้านบนของเสาเพื่อจำลองน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งจากชั้นบนของอาคาร

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

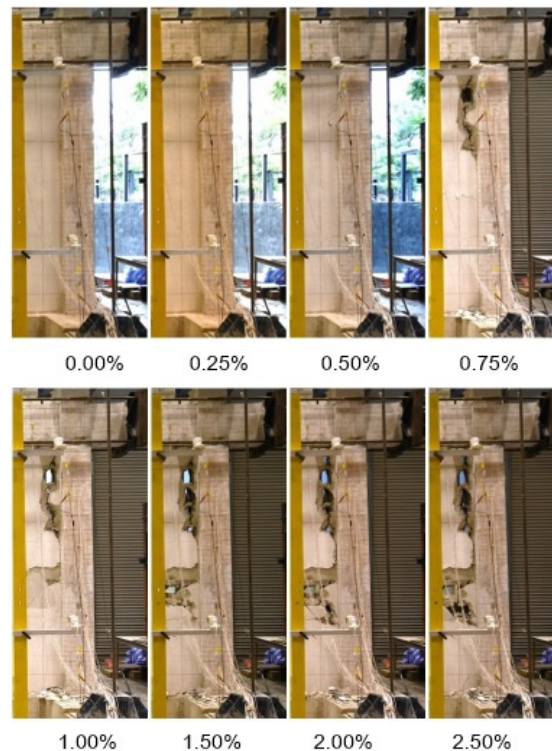
Properties	Design (MPa)	Tested date (MPa)
Yield strength of longitudinal bars of beam and column, (DB16)	550	577
Yield strength of transverse bars of column, (DB10)	550	573
Yield strength of transverse bars of beam, (DB10)	550	578
Compressive strength of concrete beam	24	29.4
Compressive strength of concrete column	24	30.1
Compressive strength of infill prism	5.67	5.67
Modulus of elastic of infill prism	5,103	5,103
Compressive strength of ties beam and column	15	14.2
Compressive strength of bed joints	15	15.1
Compressive strength of plaster	15	13

#### 4.2. ผลการทดสอบ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดันทันข้างและค่าการเสียรูปแสดงดังรูปที่ 6 ในช่วงแรกของการทดสอบตัวอย่างทดสอบมีสติเฟื่องสูงมาก เริ่มพบรอยแตกแรกในแนวทแยงขึ้นที่ระยะเคลื่อนตัว (Drift) ที่ 0.25% ค่าแรงดันทันด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 410 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 0.50% จากนั้นกำลังดันทันด้านข้างของตัวอย่างทดสอบจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากความเสียหายที่บริเวณมุมของผนังอิฐก่อ กำลังดันทันด้านข้างลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่ช่องว่างระหว่างเสาและผนังอิฐก่อกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดง Hysteretic Loop ของตัวอย่างทดสอบ

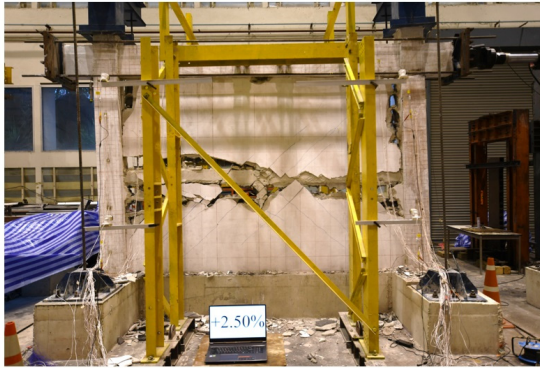


รูปที่ 7 ความเสียหายที่ระยะเคลื่อนตัวของโครงอาคาร

การทดสอบดำเนินจนกระทั่งค่าการเสียรูปเท่ากับ 1.00% ค่ากำลังรับแรงดันทันข้างมีค่าประมาณใกล้เคียงกับค่ากำลังของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีผนังอิฐก่อ เนื่องมาจากผนังอิฐก่อได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงและไม่ส่งผลต่อโครงอาคารอีกต่อไป ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทดสอบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 8 ผลการทดสอบพบว่าวิธีการออกแบบที่ใช้ สามารถป้องกันความเสียหายที่เสา และพบรอยแตกร้าวลักษณะในแนวนอนที่บริเวณปลายของเสาทั้งสองต้น ซึ่งเป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดจากแรงดันทันทำให้โครงอาคารนี้เป็นโครงอาคารที่มีความเหนียวและเป็นไป



ตามพฤติกรรมการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว



รูปที่ 8 ภาพรวมของตัวอย่างทดสอบ

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนในเสาของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากผนังอิฐก่อ วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้หลักการวิเคราะห์แบบพลาสติกของเสา (Plastic Analysis) ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบขนาดเท่าขนาดจริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาและผลการทดสอบพบว่าวิธีการออกแบบที่ใช้ สามารถป้องกันความเสียหายที่เสา และพบรอยแตกร้าวลักษณะในแนวนอนที่บริเวณปลายของเสาทั้งสองต้น ซึ่งเป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดจากแรงดัด ทำให้โครงอาคารนี้เป็นโครงอาคารที่มีความเหนียวและเป็นไปตามพฤติกรรมการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว

วิธีการออกแบบที่นำเสนอนี้สามารถใช้เสริมกับวิธีการออกแบบที่มีกำหนดในมาตรฐานทั่วไป ซึ่งจะประโยชน์ในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงอาคารได้ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของวัสดุรวมไปถึงความแข็งแรงของอิฐก่อ ปูนก่อ และปูนฉาบส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของวิธีการออกแบบที่นำเสนอนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ควรคำนึงถึงการกระจายตัวอย่างไม่สมมาตร (Irregularity) ผนังอิฐก่อในอาคารทั้งแนวราบและแนวตั้ง ที่อาจนำไปสู่ความเสียหายที่ไม่คาดคิดจากความไม่สมมาตรนี้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวระยะที่ 2 โครงการย่อย “การประเมินระดับความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารในประเทศไทยและการปรับปรุงอาคารให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวในระดับเหมาะสม”

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wararuksajja W., Srechai J., Leelataviwat S. (2020). Seismic design of RC moment-resisting frames with concrete block infill walls considering local infill-frame interactions. *Journal of Bulletin of Earthquake Engineering* **18**, 6445-6474. DOI: 10.1007/s10518-020-00942-9
- [2] Moretti M. (2007). Behaviour and ductility of reinforced concrete short columns using global truss model. *Journal of Engineering Structures* **29**(8), 2018-2029.
- [3] Hwang S.J., Lee H.J. (2002). Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model. *Journal of Structural Engineering* **128**(12), 1519-1526.
- [4] Hwang S.J., Weng P.W. (2019). Shear behaviour prediction of non-ductile reinforced concrete members under earthquake loading. *Proceedings of 20th International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake*, September 15-19, Taipei, Taiwan.
- [5] American Society of Civil Engineers. (2013). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. ASCE/SEI41, Reston, Virginia, USA.