Effects of Openings on Structural Behavior of Masonry Infilled RC Moment Resisting Frames

1,* 2

1

2

Corresponding author; E mail address srechai@eng.buu.ac.th

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาผลกระทบของรูปแบบ ขนาด และตำแหน่งของช่องเปิด รวมไปถึงแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของโครงต้านแรงดัด โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่ายแบบ 2 มิติ ทำการวิเคราะห์โครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่มี 1 ชั้นและ 1 ช่วงเสา โดยการวิเคราะห์โครงสร้างรูปแบบสถิติไม่เชิงเส้นภายใต้แรงในแนวราบร่วมกับแรงคงที่ในแนวดิ่ง จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการลดลงของกำลังต้านทานและสติฟเนสของผนังอิฐมีความสัมพัน

ในการออกแบบโครงสร้างในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยใช้ค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut) แทนผนังอิฐก่อในแบบจำลอง ตามวิธีการที่แนะนำโดย มยผ. 1301/1302-61 [2] ได้แนะนำวิธีการที่เหมาะสมซึ่งสามารถนำไปใช้กับผนังอิฐก่อที่ไม่มีช่องเปิด ในกรณีที่ผนังมีช่องเปิดจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในผนังเพื่อจัดวางและกำหนดคุณสมบัติของค้ำยันให้สอดคล้องกับลักษณะช่องเปิด

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากรณีที่ผนังมีช่องเปิด สติฟเนสและกำลังต้านทานแรงของผนังจะลดลง อีกทั้งรูปแบบความเสียหายอาจมีลักษณะแตกต่างจากผนังที่ไม่มีช่องเปิด ส่งผลให้การวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังมีความซับซ้อนขึ้น โดยมีหลายปัจจัยที่สามารถส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของผนังเช่น อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง ตำแหน่งของช่องเปิด อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของผนัง และการเสริมเหล็กบริเวณรอบช่องเปิด [3-6] มาตรฐานการออกแบบและงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะพิจารณาผลกระทบของช่องเปิดในผนังด้วย 2 วิธีการ คือ การสร้างแบบจำลองโดยใช้ชิ้นส่วนรับแรงอัดหลายชิ้นล้อมรอบช่องเปิด และการสร้างแบบจำลองโดยใช้ชิ้นส่วนรับแรงอัดชิ้นเดียวร่วมกับการใช้สัมประสิทธิ์ตัวคูณลด (Reduction Factor) เพื่อปรับลดค่าสติฟเนสและกำลังต้านทานของชิ้นส่วนรับแรงอัดเทียบเท่า [5-6] ซึ่งวิธีการนี้จะมีความสะดวกในการนำไปใช้งานมากกว่าวิธีการแรก และมีงานวิจัยจำนวนมากได้เสนอสมการสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดไว้ [3-5, 7-12] อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวมักจะมีความคลาดเคลื่อนสูงหากนำไปใช้กับผนังอิฐก่อที่มีคุณสมบัติทางกลและรายละเอียดการก่อสร้างที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะผนังอิฐก่อที่ใช้ในประเทศไทย เนื่องจากมีการเสริมความแข็งแรงรอบช่องเปิดด้วยเสาเอ็นและคานทับหลังรวมไปถึงการฉาบผนังด้วยมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมากกับผนังอิฐก่อในประเทศอื่นๆ ที่ส่วนใหญ่จะฉาบผิวหน้าผนังด้วยมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดต่ำและความหนาน้อย รวมไปถึงไม่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเสาเอ็นหรือคานทับหลัง

ด้วยสาเหตุดังกล่าวงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบและขนาดของช่องเปิดต่อ สติฟเนสและกำลังต้านทานในระนาบของผนัง แรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด และพัฒนาสมการสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดของผนังที่มีช่องเปิด โดยใช้รูปแบบและขนาดของช่องเปิดจากการสำรวจข้อมูลอาคาร ร่วมกับแบบจำลองที่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นและการแตกร้าวของวัสดุรวมไปถึงความไม่ต่อเนื่องระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด และทำการวิเคราะห์โดยวิธีสถิตย์แบบไร้เชิงเส้น

2.

2.1

Chen และ Liu [7] ได้ทบทวนงานวิจัยและมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องจำนวนมากเพื่อรวบรวมสมการที่ใช้ในการคำนวนค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลด (R_F) สำหรับผนังอิฐที่มีช่องเปิด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลด

ผู้แต่ง	สมการ
Durrani และ Luo [8]	(1) $R_F = 1-\left(\frac{A_d}{H_w \times L_w}\right)^2$ โดยที่ $A_d = H_w \times L_w - \frac{[R\sin(2\theta) - R_o \sin(\theta+\theta_o)]^2}{2\sin(2\theta)}$ $R_o = \sqrt{H_o^2 + L_o^2}$ and $R = \sqrt{{H_w}^2 + {L_w}^2}$
Al-Chaar และคณะ [5]	(1) $R_F = 1+0.6\left(\frac{A_o}{A_w}\right)^2 - 1.6\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$
Mondal และ Jain [3]	(1) $R_F = 1-2.6\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$
NZSEE 2006 [9]	(3) $R_F = 1+1.5\left(\frac{L_o}{L_w}\right)$
Tasnimi และ Mohebkhah [10]	(2) $R_F = 1+1.49\left(\frac{A_o}{A_w}\right)^2 - 2.238\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$
Asteris และคณะ [4]	(1) $R_F = 1-2\left(\frac{A_o}{A_w}\right)^{0.54} + \left(\frac{A_o}{A_w}\right)^{1.14}$
Mohammadi และ Nikfar [11]	(1) $R_F = 1+1.1163\left(\frac{A_o}{A_w}\right)^2 - 1.6534\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$ (2) $R_F = 1-1.05\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$
Su และคณะ [12]	(1) $R_F = 0.97-1.14\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$ (2) $R_F = 1.0-1.69\left(\frac{A_o}{A_w}\right)$

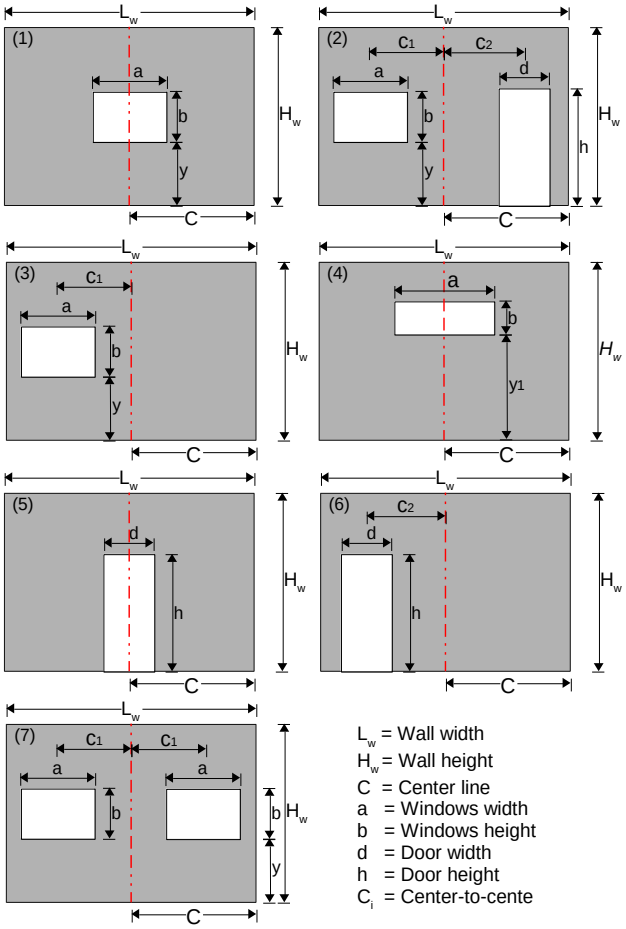
หมายเหตุ: (1) ใช้สำหรับลดค่าสติฟเนส (2) ใช้สำหรับลดค่ากำลัง และ (3) ใช้สำหรับลดค่าสติฟเนสและกำลัง

โดยที่ H_w และ L_w คือความสูงและความกว้างของผนัง H_O และ L_O คือความสูงและความกว้างของช่องเปิด θ และ θ_o คือมุมในแนวทแยงของผนังและช่องเปิด A_o และ A_w คือพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ทั้งหมดของผนัง

2.2

การศึกษาวิจัยนี้ได้ดำเนินการรวบรวมและสำรวจข้อมูลที่จำเป็น เช่น คุณสมบัติทางกลของผนังอิฐก่อ รูปแบบช่องเปิด อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (Opening Ratio) อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของผนัง (Aspect Ratio) ระยะเยื้องศูนย์ของช่องเปิดวัดจากแนวกึ่งกลางของความกว้างผนัง (Opening Eccentricity) จากข้อมูลที่รวบรวมได้พบว่าคุณสมบัติทางกลที่สำคัญของอิฐก่อ เช่น กำลังอัดสูงสุดของปริซึมอิฐก่อ (f'_m) มีค่าอยู่ในช่วง 3 ถึง 10 MPa และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ (E_m

ภายใต้แรงแผ่นดินไหว จำนวนทั้งสิ้น 126 อาคาร จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าผนังอิฐมีความสูงอยู่ในช่วง 2 ถึง 4 เมตร ความกว้างอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 6.5 เมตร และมีอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูง (L_w/H_w) อยู่ในช่วง 0.75 ถึง 2.50 โดยผนังที่มีความสูงในช่วง 2.3 ถึง 3.0 เมตร และผนังที่มีความกว้างอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 5.0 เมตร มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 70 และ 85 ของผนังทั้งหมดตามลำดับ ผนังที่มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงในช่วง 1 ถึง 2 มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 75 ของผนังทั้งหมด และสามารถจำแนกรูปแบบช่องเปิดในผนังที่พบได้บ่อยจำนวน 7 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยพบว่ารูปแบบดังกล่าวคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 91 ของผนังทั้งหมดที่ทำการสำรวจ



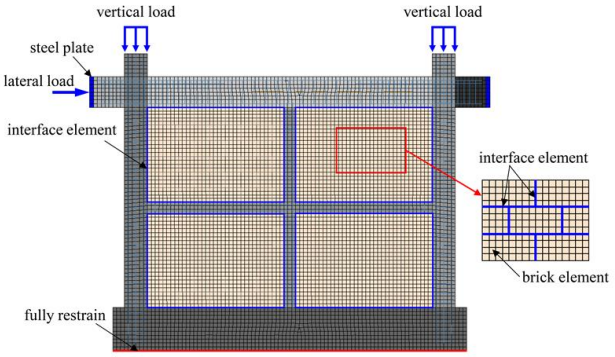
รูปแบบช่องเปิดจากการสำรวจแบบก่อสร้างอาคาร

3.

โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อเป็นระบบโครงสร้างที่มีความซับซ้อน อันเป็นผลมาจากความไร้เชิงเส้นของวัสดุ (Material Nonlinearity) และความไม่ต่อเนื่องระหว่างผนังอิฐและโครงต้านแรงดัด (Wall-Frame Discontinuity) ที่ผ่านมามีการพัฒนาแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองและให้ผลการวิเคราะห์ในระดับที่แตกต่างกัน [14] ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมและวิธีการสอบเทียบแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้

3.1

ผนังอิฐก่อในประเทศไทยโดยปกติจะมีการฉาบผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยปูนฉาบที่มีกำลังอัดสูงและมีความหนาประมาณ 1 ถึง 2 ซม. ส่งผลให้ผนังมีคุณสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางไม่แตกต่างกันมากนัก ที่สำคัญลักษณะการแตกร้าวตามแนวปูนก่อนั้นพบได้น้อย จากการสำรวจความเสียหายของอาคารจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวและการศึกษาวิจัยโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่ารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังอิฐส่วนใหญ่เป็นการแตกร้าวในแนวทแยงและการวิบัติด้วยความเค้นอัดบริเวณมุม [1, 15-16] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของช่องเปิดในผนังอิฐซึ่งอาจส่งผลให้รูปแบบความเสียหายของผนังเปลี่ยนไป เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและลดความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลอง ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของผนังอิฐแบบ 2D-Simplified-Micro Model ดังแสดงในรูปที่ 2 แบบจำลองนี้จะใช้วิธีรวมคุณสมบัติทางกลของอิฐ ปูนก่อและปูนฉาบเข้าด้วยกัน (Lumped Mechanical Property) และจำลองให้เป็นเอลิเมนต์เดียวกัน จากนั้นจะใช้เอลิเมนต์ที่ไม่มีความหนา (Interface Element) เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเอลิเมนต์เหล่านั้นเพื่อจำลองพฤติกรรมของจุดต่อระหว่างอิฐและปูนก่อ ในการศึกษานี้ใช้เอลิเมนต์ 8-nodes quadrilateral และ 6-node triangular isoparametric plane stress แบบที่มี 3×3 และ 4 integration points สำหรับจำลองชิ้นส่วนที่เป็นคอนกรีตและอิฐก่อ 6-nodes interface แบบ 3 integration points สำหรับจำลองจุดต่อในผนังอิฐและจุดต่อระหว่างผนังอิฐกับโครงต้านแรงดัด และใช้ไลน์เอลิเมนต์ประเภท Bonded Embedded Reinforcement สำหรับจำลองเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DIANA FEA [17] ในการสร้างแบบจำลอง



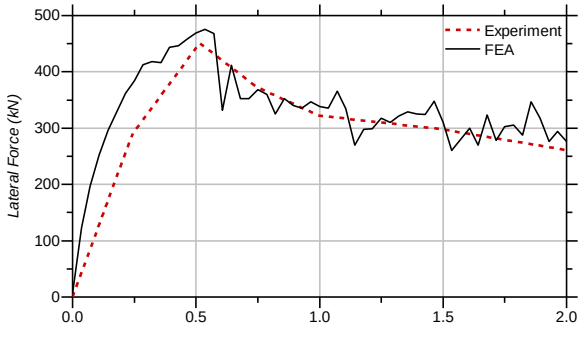
แบบจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

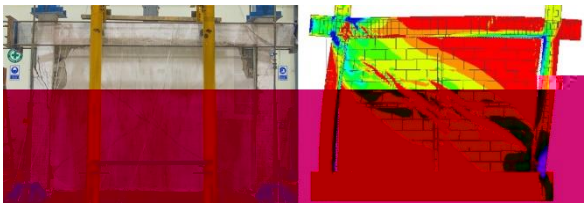
แบบจำลองคุณสมบัติวัสดุ (Material Constitutive Model) สำหรับคอนกรีตและผนังอิฐก่อจะใช้แบบจำลอง Isotropic Smeared Crack แบบ Total Strain Based Crack Model ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมโดยรวมภายหลังการแตกร้าวของวัสดุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยกำหนดให้ทิศทางของการแตกร้าวสามารถเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของความเครียดหลัก (Rotating Crack Orientation) และกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดเป็นฟังค์ชั่นผสมแบบเชิงเส้นกับพาราโบลิค ความเค้นดึงและความเครียดกำหนดให้เป็น

ฟังค์ชั่นผสมแบบเชิงเส้นกับเอกซ์โพเนนเชียล ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดข้างต้นสามารถกำหนดโดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) กำลังอัดและกำลังดึงสูงสุด (f'_c และ f'_t) พลังงานแตกร้าวอัดและดึง (G_c และ G_f) คุณสมบัติข้างต้นของคอนกรีตและอิฐก่อบางส่วนสามารถรวบรวมจากผลการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และบางส่วนจะใช้วิธีการประมาณค่าโดยใช้สมการที่แนะนำโดยมาตรฐาน CEB-FIP [18] และ ACI318-14 [19] รวมไปถึงค่าที่แนะนำโดย Lourenco [14] ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดต้องทำการสอบเทียบด้วยผลการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม จุดต่อในผนังอิฐและจุดต่อระหว่างผนังอิฐและโครงต้านแรงดัด (W- และ WF-Interface Material) จะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Lourenco [14] ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมการแตกร้าว การเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือน และความเสียหายจากการบดอัด (Combined Cracking-Shearing-Crushing) คุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมจะประมาณค่าจากการสอบเทียบด้วยผลการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ เหล็กเสริมในคอนกรีตจะใช้แบบจำลอง Menegotto-Pinto โดยจะไม่พิจารณาผลของการเลื่อนหลุดระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต (Bond Slip)

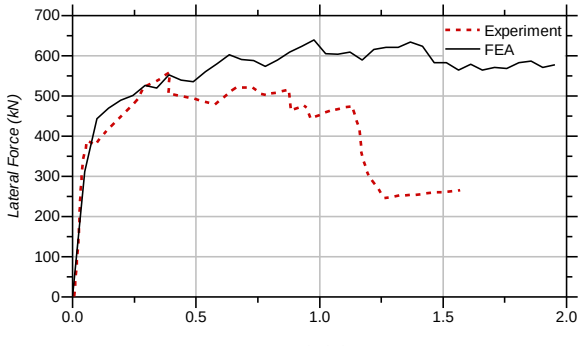
3.2

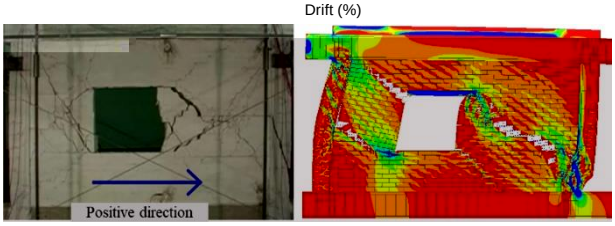
การสอบเทียบแบบจำลองด้วยผลการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อทั้งแบบที่มีและไม่มีช่องเปิดภายใต้แรงผลักด้านข้างโดยใช้แบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างและแบบจำลองวัสดุดังที่อธิบายในหัวข้อก่อนหน้า และกำหนดให้แรงผลักด้านข้างกระทำที่กึ่งกลางของความลึกคาน กำหนดให้จุดรองรับที่ฐานเป็นแบบยึดแน่น (Fully Restrained) ให้แรงกระทำโดยการกำหนดระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้การวิเคราะห์แบบสถิตย์อินอิลาสติกไร้เชิงเส้น (Statics Nonlinear Inelastic Analysis) กรณีผนังที่ไม่มีช่องเปิดจะสอบเทียบแบบจำลองด้วยผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Wararuksajja และคณะ [16] (ตัวอย่าง WS2) ซึ่งได้ทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงสลับทิศทาง โดยใช้โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลาง ใช้คอนกรีตบล็อคสำหรับก่อผนังและฉาบผิวหน้าทั้งสองด้าน รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในงานวิจัยของ Wararuksajja และคณะ [16] และรูปที่ 5 กรณีผนังที่มีช่องเปิดจะสอบเทียบแบบจำลองด้วยผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Stavridis [20] (ตัวอย่าง CU2) ซึ่งได้ทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงสลับทิศทาง โดยใช้โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัด ใช้คอนกรีตบล็อคสำหรับก่อผนังโดยไม่มีการฉาบผิวหน้า ผนังมีช่องเปิดขนาด 0.91×0.75 ม. มีพื้นที่ช่องเปิดประมาณร้อยละ 10 ของพื้นที่ผนังทั้งหมด รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในงานวิจัยของ Stavridis [20] คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองทั้งสองกรณีแสดงในตารางที่ 2 ถึง 5 จากการสอบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีพบว่าแบบจำลองที่ใช้ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ ทั้งในด้านความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างและรูปแบบการแตกร้าวและความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังอิฐดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 อย่างไรก็ตามกำลังต้านทานสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจะมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบทั้งสองกรณี เนื่องจากผลของการให้แรงแบบสลับทิศทางที่ใช้ในการทดสอบ ตัวอย่าง CU2 เมื่อกำลังต้านทานแรงเลยจุดสูงสุดไปแล้วการเสื่อมถอยที่ได้จากการวิเคราะห์จะช้ากว่าผลการทดสอบเนื่องจากแบบจำลองประเภทนี้จะไม่สามารถจำลองการวิบัติของเสาเนื่องจากแรงเฉือนได้อย่างสมบูรณ์





3 ผลสอบเทียบแบบจำลองกรณีผนังไม่มีช่องเปิด (WS2)





4 ผลสอบเทียบแบบจำลองกรณีผนังมีช่องเปิด (CU2)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติของวัสดุ	ตัวอย่างทดสอบ				
	WS2			CU2	
	คาน	เสา	เสาเอ็น	คาน	เสา
กำลังอัดสูงสุด (MPa)	19.4	19.52	10.4	19.0	19.0
กำลังดึงสูงสุด (MPa)	1.94	1.95	1.0	1.9	1.9
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	20902	20956	15318	20675	20675
พลังงานแตกร้าวอัด (N/m)	21993	22022	19093	21870	21870
พลังงานแตกร้าวดึง (N/m)	125	125	111	124	124
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติของวัสดุ	ตัวอย่างทดสอบ				
	WS2		CU2		
	RB9	DB16	#2	#3	#4
กำลังที่จุดคราก (MPa)	308	579	400	600	500
โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	200	200	200	200	200
สเตรนฮาร์เดนนิง	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติของวัสดุ	ตัวอย่างทดสอบ	
	WS2	CU2
กำลังอัดสูงสุด (MPa)	7.7	24.30
กำลังดึงสูงสุด (MPa)	0.77	1.72
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	4877	15795
พลังงานแตกร้าวอัด (N/m)	5390	23323
พลังงานแตกร้าวดึง (N/m)	105	130
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	0.2

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกลของจุดต่อที่ใช้ในแบบจำลอง

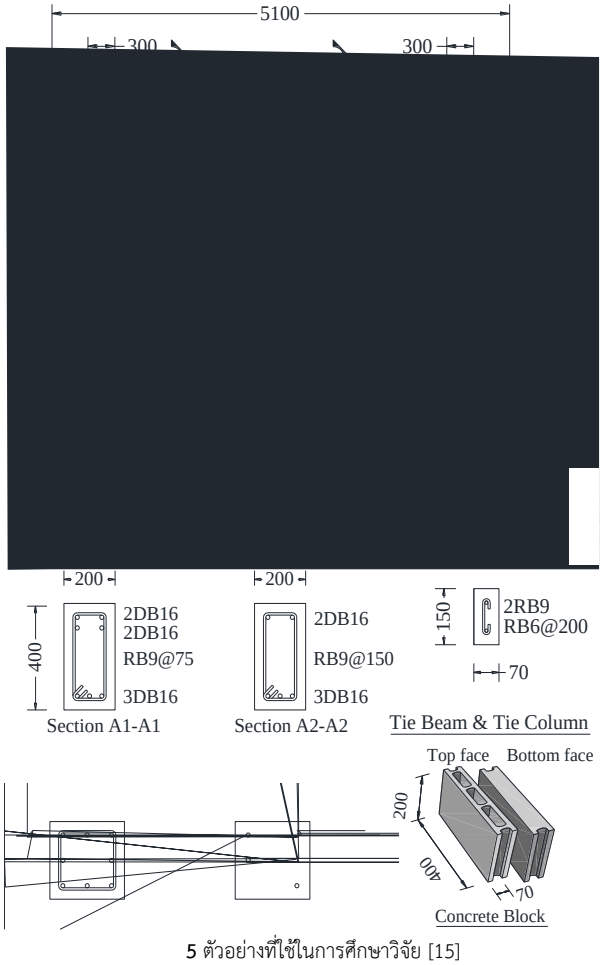
คุณสมบัติของวัสดุ	ตัวอย่างทดสอบ			
	WS2		CU2	
	WI	WFI	WI	WFI
สติฟเนสตั้งฉาก (N/m^3)	4.88E+12	2.44E+11	1.63E+12	1.63E+11
สติฟเนสการเฉือน (N/m^3)	1.95E+12	2.44E+10	6.40E+11	1.63E+10
แรงยึดเหนี่ยว (MPa)	1.155	0.01155	0.92	0.0092
มุมเสียดทาน (deg)	30	30	38	38
มุมเสียดทานคงค้าง (deg)	25	25	35	35
มุมขยายตัว (deg)	0.3	0.3	0	0
หน่วยแรงโอบรัด (MPa)	-0.77	-0.77	-0.92	-0.92
สัมประสิทธิ์การเสื่อมถอย	2	2	2	2
กำลังดึงสูงสุด (MPa)	0.77	0.0077	0.92	0.0092
พลังงานแตกร้าวดึง (N/m)	112	20	105	20
พลังงานแตกร้าวเฉือน (N/m)	2000	2000	2000	2000
กำลังอัดสูงสุด (MPa)	10.61	7.70	9.20	9.20
พลังงานแตกร้าวอัด (N/m)	7427	5390	14720	14720
ตัวประกอบควบคุมการลากเฉือน	1	1	1	1
การเคลื่อนตัวพลาสติกสัมพัทธ์	0.003	0.006	0.003	0.006

4.

การศึกษาผลกระทบของช่องเปิดต่อพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ จะพิจารณาผลกระทบของรูปแบบและขนาดของช่องเปิดต่อพฤติกรรมโดยรวม (Global) และพฤติกรรมเฉพาะที่ (Local) ของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา รวมไปถึงกำลังต้านทานแรงด้านข้างที่ลดลงของผนังอิฐก่อ ในส่วนนี้จะนำเสนอรายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้และผลที่ได้จากการศึกษาวิจัย

4.1

ในการศึกษาวิจัยนี้กำหนดให้โครงต้านแรงดัดและผนังอิฐก่อมีขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กรวมไปถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยของ Wararuksajja และคณะ [16] ดังแสดงในรูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบมีขนาดความกว้างและความสูงของผนัง 3.7 และ 2.6 เมตร ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของผนัง 1.42 และค่ากำลังอัดสูงสุดของอิฐก่อ 7.7 MPa เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สำคัญสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการสำรวจข้อมูลดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2 โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจำนวนทั้งสิ้น 34 ตัวอย่าง ด้วยรูปแบบช่องเปิดทั้งหมดที่ได้จากการสำรวจข้อมูล ซึ่งจะใช้อักษรย่อ OP ตามด้วยหมายเลขของรูปแบบ ในกรณีที่มี อักษร R หมายถึงจะให้แรงผลักกระทำในทิศทางจากขวาไปซ้าย โดยกำหนดให้แรงกระทำที่ปลายของคานด้านขวา และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อผนัง (A_O/A_w) ดังแสดงในตารางที่ 6 ช่องเปิดทั้งหมดจะกำหนดให้มีเสาเอ็นและคานทับหลังล้อมรอบ ตามมาตรฐานที่ใช้ก่อผนังอิฐในทางปฏิบัติ โดยใช้แบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้าง คุณสมบัติทางกลของวัสดุและวิธีการวิเคราะห์ดังอธิบายในหัวข้อ 3.2



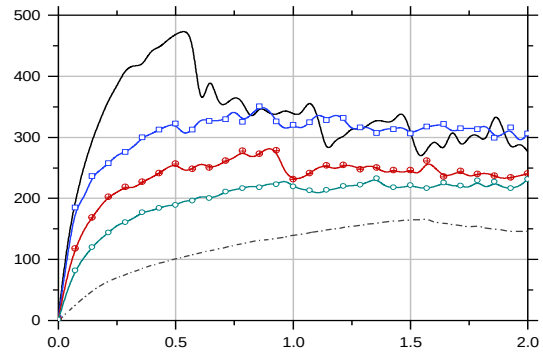
5 ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย [15]

ตารางที่ 6 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อผนัง

รูปแบบช่องเปิด	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อผนังทั้งหมด (A_O/A_W)			
OP1	0.10	0.20	0.29	0.42
OP2	0.22	0.30	0.38	-
OP3	0.10	0.20	0.29	-
OP4	0.05	0.10	0.15	0.25
OP5	0.15	0.25	0.37	0.50
OP6	0.15	0.25	0.37	-
OP7	0.11	0.19	0.30	-

4.2

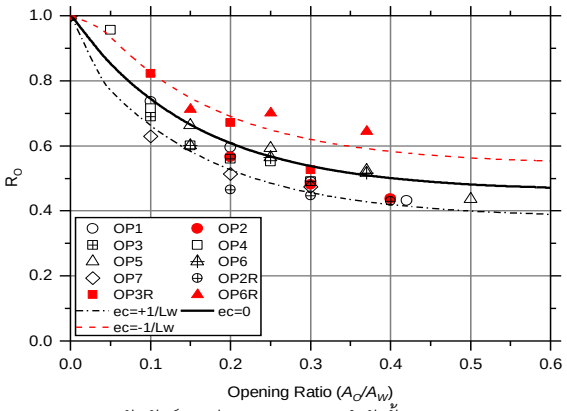
จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพบว่าช่องเปิดส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างและสติฟเนสของผนังอิฐอย่างมีนัย รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างที่มีช่องเปิดรูปแบบที่ 1 (OP1) จากรูปพบว่าเมื่อมีช่องเปิดในผนังกำลังต้านทานแรงสูงสุดและสติฟเนสของโครงสร้างทั้งระบบจะลดลงในขณะที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง ณ ตำแหน่งที่โครงสร้างมีกำลังต้านทานแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยสัมพันธ์กับขนาดของช่องเปิด เมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อผนังมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 กำลังสูงสุดทั้งระบบของโครงสร้างจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 75 ของผนังที่ไม่มีช่องเปิด และเมื่อพื้นที่ช่องเปิดมีขนาดเพิ่มขึ้นกำลังสูงสุดของโครงสร้างจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ที่อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อผนังมีค่าประมาณร้อยละ 40 กำลังสูงสุดทั้งระบบของโครงสร้างจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 45 ของผนังที่ไม่มีช่องเปิดและมีค่าสูงกว่าโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง (BF) ประมาณ 1.2 เท่า อย่างไรก็ตามในกรณีที่ผนังมีช่องเปิดเมื่อเลยจุดที่โครงสร้างมีกำลังสูงสุดไปแล้วกำลังต้านทานแรงด้านข้างจะลดลงในอัตราที่ช้ากว่าผนังที่ไม่มีช่องเปิด



6 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างที่มีช่องเปิด (OP1)

ในกรณีช่องเปิดรูปแบบอื่นๆ พบว่ามีพฤติกรรมในลักษณะคล้ายกับรูปแบบที่ 1 อย่างไรก็ตามที่ A_O/A_w มีค่าเท่ากันอัตราการลดลงของกำลังต้านทานแรงสูงสุดจะแตกต่างกันในแต่ละรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7 การเยื้องศูนย์ของช่องเปิด (e_C) เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการลดลงของกำลังต้านทานของผนัง ในกรณีช่องเปิดเยื้องไปทางด้านรับแรง (e_C มีค่าบวก) จะส่งผลให้กำลังลดลงมากกว่าช่องเปิดที่ไม่มีการเยื้องศูนย์และเยื้องไปทางด้านที่ไม่รับแรง (e_C มีค่าลบ) ยกเว้นในบางกรณีซึ่งมีปัจจัยอื่นเข้ามามีผลกระทบด้วย เช่น ตำแหน่งและขนาดของช่องเปิดไปขัดขวางการเกิดแถบความเค้นอัดตามแนวทแยงในผนัง (Diagonal Compression Zone) ส่งผลให้มีกำลังต้านทานต่ำ โดยการกำหนดให้กำลังต้านทานแรงสูงสุดของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังที่ไม่มีช่องเปิดมีค่าเท่ากับ 1 จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังทั้งระบบของโครงสร้าง (R_O) ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear Regression Analysis) ดังสมการที่ (1) ซึ่งมีความสอดคล้องกับข้อมูลในระดับดีดังแสดงในรูปที่ 7 และมีค่า R^2 = 0.97

$$R_O = 0.46 - 0.3e_c + 0.54e^{\left(-6.53\left(A_O/A_w\right)\right)} \quad (1)$$



7 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของกำลังทั้งระบบและ A_O/A_w

4.3

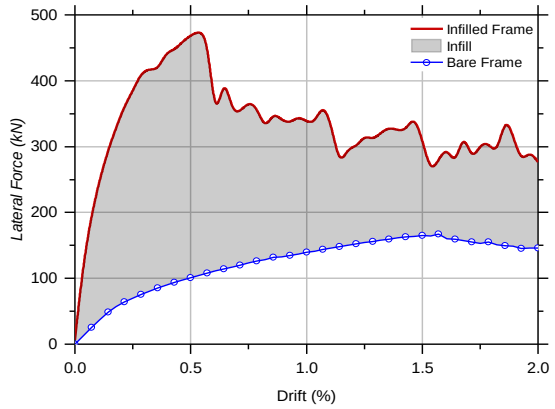
ผลกระทบของช่องเปิดต่อสติฟเนสและกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ เนื่องจากเป็นค่าที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองผนังโดยใช้ชิ้นส่วนรับแรงอัดเทียบเท่า เพื่อศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้วิธีการประเมินกำลังต้านทานแรงสุทธิของผนัง (C_{inf}) โดยการหักลบกำลังต้านทานแรงของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐ (Infilled Frame) ด้วยกำลังต้านทานแรงของโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐ (Bare Frame) ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้าน (Drift) ที่สอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 8 วิธีการนี้จะให้ค่าโดยประมาณเท่านั้น เนื่องจากพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดภายใต้แรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐจะมีความแตกต่างจากโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีช่องเปิดในผนังอิฐก่อ กำลังต้านทานสูงสุดและสติฟเนสของผนังจะลดลง และมีปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการลดลงในลักษณะเช่นเดียวกับกำลังต้านทานของทั้งระบบ ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของผนัง สติฟเนสเริ่มต้น (Initial Stiffness) ของผนังอิฐสามารถหาได้จากความชันของเส้นที่ลากเชื่อมระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดที่การเคลื่อนตัวมีค่าร้อยละ 0.1 ของความสูง (0.1% Drift) ในช่วงดังกล่าวพฤติกรรมของโครงสร้างส่วนใหญ่ยังคงเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เนื่องจากผนังยังไม่เกิดความเสียหาย

เช่นเดียวกับการลดลงของกำลังโดยรวมของทั้งระบบ จากพฤติกรรมการลดลงของกำลังต้านทานสูงสุดและสติฟเนสเริ่มต้นของผนังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดของกำลังและสติฟเนสเริ่มต้นของผนัง (R_F และ R_{IS})

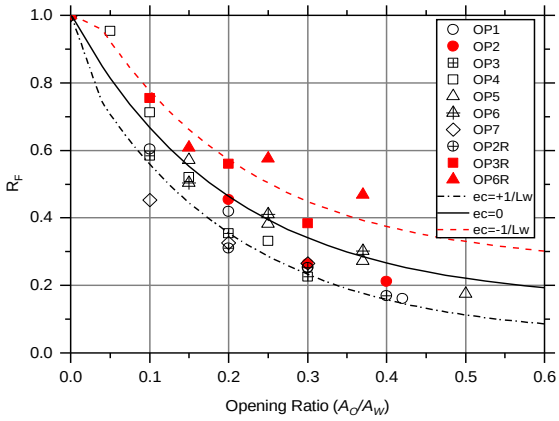
ได้โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบไร้เชิงเส้นดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับชุดข้อมูลในระดับดีโดยมีค่า R^2 = 0.97 และ R^2 = 0.91 ตามลำดับ

$$R_F = 0.15 - 0.4e_c + 0.85e^{\left(-5.02\left(A_O/A_w\right)\right)} \quad (2)$$

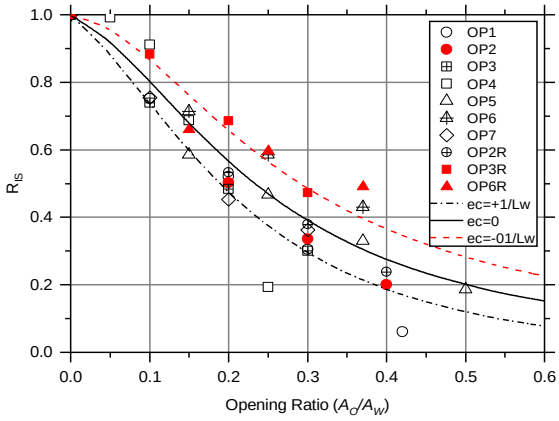
$$R_{IS} = \frac{1-3e_c\left(A_O/A_W\right)}{1+1.1\left(A_O/A_W\right)+13.7\left(A_O/A_W\right)^2} \quad (3)$$



8 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงต้านแรงดัดที่มีและไม่มีผนังอิฐ



ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของกำลังต้านทานของผนังและ A_O/A_w



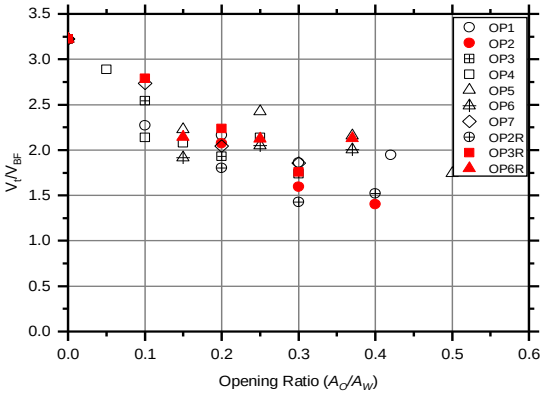
ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของสติฟเนสของผนังและ A_O/A_w

4.4

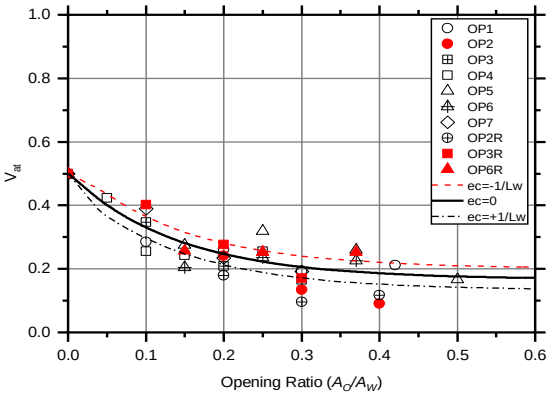
จากการศึกษาวิจัยในอดีตเป็นที่ทราบกันดีว่าภายใต้แรงกระทำด้านข้างผนังอิฐส่งผลกระทบอย่างมากต่อแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงต้านแรงดัด ทั้งขนาดและรูปแบบการกระจายตัวของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดจะมีความแตกต่างจากโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐ โดยเฉพาะเมื่อผนังเกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัดบริเวณมุมที่รับแรง จะส่งผลให้แรงเฉือนในเสาบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างมากและอาจนำไปสู่การวิบัติของเสาในรูปแบบเสาสั้น (Captive Column Failure) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่ไม่พึงประสงค์และอาจก่อให้เกิดการพังถล่มของอาคาร (Completely Collapse) ในกรณีที่ผนังมีช่องเปิดพบว่าค่าแรงเฉือนในเสาบริเวณเดียวกันจะมีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับผนังที่ไม่มีช่องเปิด อย่างไรก็ตามขนาดของแรงเฉือนดังกล่าวยังมีค่าที่สูงกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดการวิบัติของเสาเนื่องจากแรงเฉือนได้หากเสาดังกล่าวไม่ได้รับการออกแบบให้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนอย่างเพียงพอ รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณปลายเสาที่ติดกับท้องคานของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐเทียบกับโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐ (V_t/V_{BF}) และค่า A_O/A_W จากรูปดังกล่าวพบว่ากรณีที่ผนังไม่มีช่องเปิดแรงเฉือนที่เกิดในเสามีค่าสูงกว่าโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐประมาณ 3.2 เท่า และกรณีที่ผนังมีช่องเปิดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงกว่าโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังประมาณ 1.4 ถึง 2.8 เท่าโดยแปลผันตามขนาดและรูปแบบของช่องเปิด เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้สร้างแบบจำลองผนังอิฐด้วยค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่า และสามารถประเมินค่าแรงเฉือนในเสาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐก่อ ในการศึกษาวิจัยนี้จึงประเมินค่าแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวโดยการหักลบค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงต้านแรงดัดที่มีผนังด้วยค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง (V_{IF}-V_{BF}) จากนั้นนำค่าที่ได้หารด้วยกำลังต้านแรงด้านข้างสูงสุดของผนังที่ไม่มีช่องเปิด จะได้ค่าแรงเฉือนปกติ (Normalized Shear Force) ที่เพิ่มขึ้นในเสาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐก่อ (V_a) รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นบริเวณปลายเสาด้านบนจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐ (V_{at}) และ A_O/A_W จากรูปพบว่ากรณีที่ผนังไม่มีช่องเปิดแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของกำลังต้านแรงด้านข้างสูงสุดของผนังที่ไม่มีช่องเปิด กรณีผนังมีช่องเปิดค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 เท่า สำหรับการออกแบบและประเมินสมรรถนะของเสาโดยปกติจะใช้ค่าแรงเฉือนที่ตำแหน่งหน้าตัดวิกฤต (Critical Section) โดยวัดจากจุดต่อเสาคานออกมาเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดเสา (d) รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 1d (วัดจากท้องคาน) อันเนื่องมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐ (V_{ad}) และ A_O/A_W จากรูปพบว่ากรณีที่ผนังไม่มีช่องเปิดแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 0.37 เท่าของกำลังต้านแรงด้านข้างสูงสุดของผนังที่ไม่มีช่องเปิด กรณีผนังมีช่องเปิดค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.36 เท่า โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบไร้เชิงเส้นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดของแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นในเสาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐ (V_{at} และ V_{ad}) สามารถหาได้ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับชุดข้อมูลในระดับดีโดยมีค่า R^2 = 0.90

$$V_{at} = 0.17 - 0.13e_c + 0.33e^{\left(-7.16\left(A_O/A_w\right)\right)} \quad (4)$$

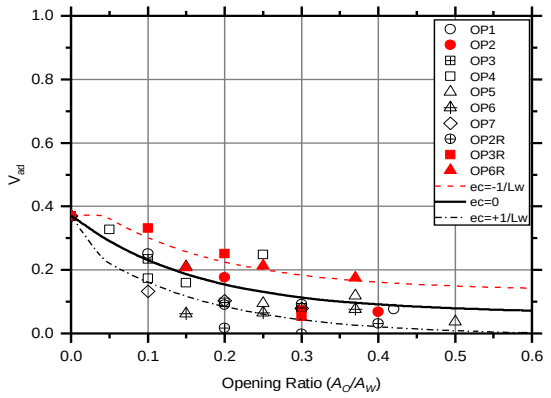
$$V_{ad} = 0.07 - 0.26e_c + 0.31e^{\left(-6.15\left(A_O/A_w\right)\right)} \quad (5)$$



ความสัมพันธ์ระหว่าง V_I/V_{BF} และ A_O/A_W

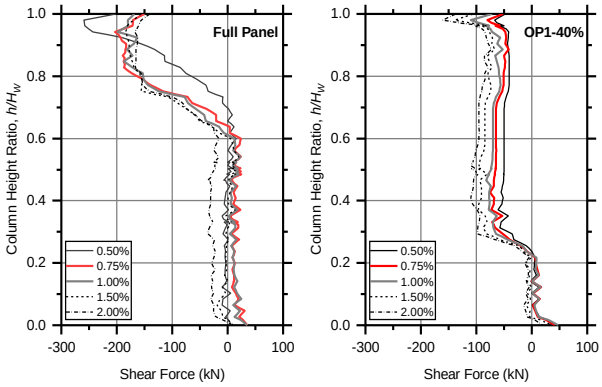


2 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{at} และ A_O/A_W



3 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ad} และ A_O/A_W

ดังที่อธิบายไว้ข้างต้นแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดส่งผลกระทบต่อรูปแบบการกระจายตัวของแรงเฉือน (Shear Distribution) ที่เกิดขึ้นในเสา รูปที่ 14 แสดงตัวอย่างไดอะแกรมของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อกรณีที่ไม่มีและมีช่องเปิดในผนังรูปแบบที่ 1 ขนาดของพื้นที่ช่องเปิดต่อผนังประมาณร้อยละ 40 (OP1-40%) ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างต่างๆ จากรูปพบว่ากรณีที่ผนังไม่มีช่องเปิดค่าแรงเฉือนจะเริ่มเพิ่มขึ้นที่ความสูงของเสาประมาณ 0.7 เท่าของความสูงผนัง (h/H_w = 0.7) เมื่อผนังเกิดความเสียหายบริเวณมุมเนื่องจากหน่วยแรงอัด (0.75% drift) ค่าแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดที่บริเวณ h/H_w = 0.8 ไปจนถึงปลายเสาด้านบน ส่งผลให้เสาเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน กรณีของผนังที่มีช่องเปิดพบว่าค่าแรงเฉือนจะเริ่มเพิ่มขึ้นที่ความสูง h/H_w = 0.3 ซึ่งเป็นผลมาจากผนังอิฐส่วนที่อยู่ต่ำกว่าช่องเปิดทำหน้าที่เสมือนค้ำยัน ยันเสาบริเวณดังกล่าวไว้ แรงปฏิสัมพันธ์จากค้ำยันดังกล่าวส่งผลให้ค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้น จากรูปแบบของผังแรงเฉือนที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าเสามีความเสี่ยงที่จะได้รับความเสียหายและเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนตลอดความยาวตั้งแต่ h/H_w = 0.3 จนถึงปลายเสาด้านบน ดังนั้นในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องกำหนดรายละเอียดในการเสริมเหล็กต้านแรงเฉือนให้เหมาะสมตลอดช่วงความยาวเสาดังกล่าว



4 ไดอะแกรมของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของตัวอย่างที่ผนังไม่มีช่องเปิดและ OP1-40%

5.

หัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการเบื้องต้นสำหรับนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการวิเคราะห์โครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อโดยใช้ค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่าแบบร่วมศูนย์ที่แนะนำโดย มยผ. 1301/1302-61 [2] ภาคผนวก ง ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้สำหรับผนังอิฐที่ไม่มีช่องเปิด โดยกำหนดให้ค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่ามีความหนาและคุณสมบัติทางกลเท่ากับคุณสมบัติของผนังอิฐก่อ ความกว้างเทียบเท่าของค้ำยัน (a) สามารถหาได้จากสมการที่ (6) และ (7)

$$a = 0.175\left(\lambda_1 h_{col}\right)^{-0.4} r_{\text{inf}} \tag{6}$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_m t_{\text{inf}} \sin(2\theta)}{4E_c I_{col} H_w}\right]^{0.25} \tag{7}$$

โดยที่ h_{col} และ H_w คือค่าความสูงของเสาและผนังตามลำดับ E_m และ E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผนังและคอนกรีต t_{inf} และ r_{inf} คือความหนาและความยาวของผนังในแนวทแยง θ คือค่ามุมระหว่างแนวทแยงของผนังและแนวราบ λ_1 คือสติฟเนสสัมพัทธ์ระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด กำลังต้านทานแรงอัดและสติฟเนสตามแนวแกนของค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่า (C_{inf} และ K_{inf}) สามารถหาได้จากสมการที่ (8) และ (9)

$$C_{\text{inf}} = at_{\text{inf}} f'_m \tag{8}$$

$$K_{\text{inf}} = \frac{at_{\text{inf}} E_m}{r_{\text{inf}}} \tag{9}$$

โดยที่ f'_m คือกำลังอัดสูงสุดของผนังอิฐ

สำหรับการจำลองค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่าของผนังอิฐที่มีช่องเปิดสามารถประเมินคุณสมบัติของค้ำยันได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดกำลังและสติฟเนส (R_F และ R_{IS}) คูณด้วยค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (8)

และ (9) ตามลำดับ สำหรับการประเมินค่าแรงเฉือนในเสาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ของผนังอิฐก่อที่ตำแหน่งปลายเสาและหน้าตัดวิกฤต สามารถหาได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดของแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นในเสาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังอิฐ (V_{at} และ V_{ad}) คูณด้วยค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (8) ตามลำดับ โดยการนำค่าแรงเฉือนที่คำนวณได้ไปรวมกับค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาจากการวิเคราะห์โครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อโดยใช้ค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่าแบบร่วมศูนย์ จะสามารถพิจารณาผลของแรงเฉือนทั้งหมดในการออกแบบได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อโดยการใช้แบบจำลองค้ำยันรับแรงอัดเทียบเท่าแบบเยื้องศูนย์ตามคำแนะนำของ มยผ. 1301/1302-61 [2] ซึ่งสามารถลดความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองลงอย่างมาก

6.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินผลกระทบของรูปแบบและขนาดของช่องเปิดต่อพฤติกรรมโดยรวมและพฤติกรรมเฉพาะที่ของโครงสร้าง การลดลงของสติฟเนสและกำลังต้านทานของผนัง เพื่อพัฒนาสมการสำหรับประเมินค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองของผนังอิฐที่มีช่องเปิด โดยใช้รูปแบบและขนาดของช่องเปิดที่ได้จากการสำรวจข้อมูลอาคาร และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ที่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นและการแตกร้าวของวัสดุรวมไปถึงความไม่ต่อเนื่องระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัด และทำการวิเคราะห์โดยวิธีสถิตย์แบบไร้เชิงเส้น จากผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นสำคัญดังนี้

- การมีช่องเปิดในผนังอิฐส่งผลให้กำลังต้านทานและสติฟเนส รวมไปถึงแรงเฉือนในเสาอันเนื่องมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังลดลงในลักษณะแบบไร้เชิงเส้น โดยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงที่สำคัญคือ ขนาด รูปแบบและตำแหน่งของช่องเปิด
- การมีช่องเปิดในผนังอิฐส่งผลให้การกระจายตัวของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของโครงต้านแรงดัดเปลี่ยนแปลงรูปแบบ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าและรูปแบบการกระจายตัวของแรงเฉือนที่เกิดขึ้น
- อัตราการลดลงของกำลังต้านทานและสติฟเนสของผนัง แรงเฉือนในเสาของโครงต้านแรงดัดอันเนื่องมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผนังที่มีช่องเปิด สามารถประเมินได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดที่เหมาะสมร่วมกับวิธีการประเมินคุณสมบัติของผนังที่ไม่มีช่องเปิดตามคำแนะนำของมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาทั้งหมดที่นำเสนอในบทความนี้เป็นเพียงผลที่ได้จากการศึกษาเฉพาะกรณี จึงขาดข้อมูลและปัจจัยที่สำคัญอีกหลายประการที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของผนัง เช่น คุณสมบัติทางกลของผนังอิฐและอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของผนังที่แตกต่างออกไป โดยคณะผู้วิจัยกำลังทำการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังกล่าวเพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ดังนั้นการนำข้อมูลที่นำเสนอในบทความนี้ไปใช้งานควรใช้ควบคู่กับการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อตรวจสอบผลที่ได้ด้วย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกสว.) ภายใต้โครงการการออกแบบและการเสริมกำลังอาคารที่ใช้ผนังอิฐก่อเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย ตามสัญญาเลขที่ RDG6130022 ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย ข้อมูลและผลการศึกษาทั้งหมดที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้เป็นความคิดเห็นของคณะผู้วิจัยทั้งสิ้น ไม่มีความเกี่ยวข้องใดๆ กับหน่วยงานผู้ให้ทุน

[1] Lukkunaprasit, P., Ruangrassamee, A., Boonyatee, T., Chintanapakdee, C., Jankaew, K., Thanasisathit, N. and Chandrangsu, T. (2016). Performance of Structures in the Mw 6.1 Mae Lao Earthquake in Thailand on May 5, 2014 and Implications for Future Construction. Journal of Earthquake Engineering, 20(2), pp. 219-242.

[2] มยผ. 1301/1302. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง

[3] Mondal, G. and Jain, S.K. (2008). Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening. Earthq. Spectra, 24(3), pp. 701-723

[4] Asteris, P.G., Giannopoulos, I.P., Chrysostomou, C.Z. (2012). Modeling of infilled frames with openings. Open Constr Build Technol J, 6(1-M6), pp. 81–91

[5] Al-Chaar, G., Lamb, G.E., Issa, M.A. (2003). Effect of openings on structural performance of unreinforced masonry infilled frames. ACI, 211: pp. 247–61

[6] Decanini, L.D., Liberatore, L. and Mollaioli, F. (2014). Strength and stiffness reduction factors for infilled frames with openings. Earthq. Eng. Eng. Vib. 13(3), pp. 437-454.

[7] Chen, X. and Liu, Y. (2015). Numerical study of in-plane behaviour and strength of concrete masonry infills with openings. Engineering Structures, 82, pp. 226-235.

[8] Durrani A.J., Luo Y.H. (1994). Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. Proceedings of National Center for Earthquake Engineering. Technical report NCEER-94-0004, 1–8, 1994. National Center for Earthquake Engineering Research, San Francisco, California.

[9] New Zealand Society for Civil Engineering (2006). Assessment and improvement of the structural performance of buildings in earthquakes.

[10] Tasnimi A.A, Mohebkhah A. (2011). Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches. Eng Struct, 33(3), pp. 968–980.

[11] Mohammadi M, Nikfar F. (2013). Strength and stiffness of masonry infilled frames with central openings, based on experimental results. J Struct Eng., 139(6), pp. 974–84.

[12] Su, Q., Cai, G. and Cai, H. (2017). Seismic behaviour of full-scale hollow bricks-infilled RC frames under cyclic loads. Bull Earthquake Eng., 15, pp. 2981-3012.

[13] วรากร กาญจนภี (2559). สมบัติเชิงกลของผนังอิฐก่อและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[14] Lourenco, P.B., (1996). Computational strategies for masonry structures. Doctoral Dissertation, Universidade do Porto, Portugal.

[15] Srechai, J. and Lukkunaprasit, P. (2013). An innovative scheme for retrofitting masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 6(4), pp. 2770887 0 595.26 841.86 reWnBT/F4 12 Tf1 0 0 1 203.54 602.74 Tm0 g0 Gm91Tf1 BT/F4 12 Tf1 0 0 1 77.58 429