

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิด  
บางส่วนเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก  
Seismic Analysis of Partial Opening Masonry Infilled Frame Strengthening with  
Ferrocement and Expanded Metal

ศักดิ์ดา ชมภูยงค์<sup>1</sup>

ไพบูรณ์ ปัญญาอะโป<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: sakda1263@gmail.com

<sup>2</sup>รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: phaiboon.pa@spu.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารเรียนที่มีการก่อผนังเพียงบางส่วน ซึ่งมีการติดตั้งหน้าต่างขนาดกว้าง และมีการเสริมกำลังเสา คานและผนังก่ออิฐด้วยเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก โดยเสนอแบบจำลองค้ำยันเทียบเท่าเพื่อการคำนวณกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิดบางส่วน โครงสร้างอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จำลองจากโครงสร้างชั้นล่างเพียงช่วงเดียว ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของอาคารเรียนตามแบบมาตรฐานกระทรวงศึกษาธิการขนาดความสูง 3 ชั้น และวิเคราะห์ด้วยวิธีการผลัดอาคารแบบวิฤกษ์กร ด้วยรูปแบบการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาขนาดของช่องเปิดร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนังก่ออิฐ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่ากำลังต้านทาน ค่าความเหนียว และค่าสตีเฟนสของโครงสร้างเสริมกำลังเทียบกับโครงสร้างเดิมมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 47.37%, 31.51% และ 103.61% ตามลำดับ โครงสร้างผนังก่ออิฐบางส่วนที่มีการเสริมกำลัง มีกำลังต้านทานแรงกระทำด้านข้างใกล้เคียงกับแบบจำลองที่นำเสนอ นอกจากนี้ ยังพบว่า ผนังส่วนบนมีค่าแรงต้านทานสูงกว่าผนังส่วนล่าง เนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างมีการถ่ายแรงเข้าสู่ผนังส่วนบนมากกว่าผนังส่วนล่าง การวิบัติของผนังส่วนบนจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากกว่าผนังส่วนล่าง

คำสำคัญ: ตะแกรงเหล็กฉีก, เฟอร์โรซีเมนต์, การเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหว, ผนังก่อที่มีช่องเปิด

### ABSTRACT

This paper presents the seismic analysis of partial opening masonry infilled frames with wide opening. The infilled frame which is composed of column, beam, and infill panel was strengthened with ferrocement and expanded metal. In this study, an equivalent strut model is proposed to calculate the seismic

capacity of the partial opening masonry infilled frame. A typical reinforced concrete frame which is a single span of the lower floor was selected from the 3stories standard school building according to Ministry of Education Thailand. Cyclic Pushover Analysis was conducted for the infilled frame with a laboratory type loading protocol. The infilled frame is composed of a wide opening located at the middle height of the frame with the opening size of 40% of the infill panel. It was found that the lateral strength, the displacement ductility and the initial stiffness of the infilled frames with strengthening were increased up to 47.37%, 2.43% and 103.61 % respectively, when they were compared with the existing frame. The proposed model predicted the lateral strength with a good accuracy when it was compared with the cyclic pushover analysis result. In addition, the strut force of the upper masonry panel was greater than that of the lower masonry panel due to the high lateral force transferring to the upper panel. This indicated that the upper masonry panel may experience greater damage than the lower panel.

**KEYWORDS:** expanded metal, ferrocement, strengthening, opening infilled frame.

## 1. บทนำ

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 ริกเตอร์ ศูนย์กกลางเกิดแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ได้สร้างความเสียหายให้กับอาคารบ้านเรือนของผู้ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่บริเวณนั้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอาคารเรียนที่สร้างตามแบบมาตรฐานของกระทรวงศึกษาธิการ และไม่ได้มีการออกแบบให้สามารถรองรับแรงแผ่นดินไหวได้ พบว่าอาคารเรียนซึ่งมีผนังก่ออิฐบางส่วนความสูงประมาณ 1.0 เมตรตลอดช่วงความยาวระหว่างเสา โดยมีช่องเปิดหน้าต่างบานกระจกมีความสูงจากผนังก่ออิฐถึงใต้ห้องคานประมาณ 2.5 เมตร ทำให้เสาที่ขนานด้วยผนังก่ออิฐบางส่วนมีความยาวลดลงจากปกติ จึงเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนบริเวณตำแหน่งที่อยู่เหนือผนังก่ออิฐ เนื่องจากพฤติกรรมการวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสาสั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการเสริมกำลังแก่โครงสร้าง โดยเฉพาะเสาที่ติดอยู่กับโครงอาคารที่มีผนังก่ออิฐไม่เต็มแผงที่เว้นช่องเปิด

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาพฤติกรรม โครงสร้างที่มีผนังช่องเปิด โดย Niyompanitpattana และ Warnitchai (2017) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของ โครงอาคารที่มีผนังช่องเปิดรูปแบบที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าผนังที่มีช่องเปิดตรงกลางจะมีกำลังต้านทานจากแรงค้ำยันสองแนว แบ่งออกเป็นสองส่วนจากช่องเปิด สำหรับแต่ละทิศทางการรับแรง ซึ่งแนวทแยงของแรงค้ำยัน จะมีแนวยาวจากมุมผนังบนลงมาถึงแนวผนังล่างทำมุมประมาณ 45 องศา Tasnimi และ Mohebkhah (2011) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงด้านข้างของ โครงอาคารเหล็กที่มีผนังอิฐก่อแบบช่องเปิด พบว่าผลของช่องเปิดมีผลต่อกำลังรับแรงโดยตรง ซึ่งพื้นที่ช่องเปิดที่มากขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงลดลงตามลำดับ เมื่อเทียบกับกำลังต้านทานของผนังทึบ ไซบูลย์และอนุชาติ (2556) ได้ศึกษาการใช้ตะแกรงเหล็กฉีกขนาดที่แตกต่างกันร่วมกับวิธีเฟอร์โรซีเมนต์เพื่อเสริมกำลังผนังก่ออิฐ ทำการเสริมกำลังให้แก่ผนังทั้งสองด้านแล้วจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อและกำลังรับแรงเฉือนของผนังอิฐ ผลการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังที่ผนังนั้น มีผลให้ผนังมีกำลังต้านทานที่เพิ่มขึ้นมากกว่ากว่าผนังที่ไม่ได้กำลัง

สูงถึงร้อยละ 53.10 อีกทั้งยังพบว่าการเลือกใช้ตะแกรงเหล็กฉีก No.22 เสริมกำลัง ให้ผลต่อกำลังต้านทานที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตะแกรงเหล็กฉีก No.23, XS-31 และ XS-32 Kazemi and Morshed (2005) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกร่วมกับวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ ทำการทดสอบภายใต้แรงผลักแบบวัฏจักร ผลการศึกษาพบว่าเสามีกำลังรับแรงเฉือนและค่าความเหนียวที่มากกว่าเสาที่ไม่ได้เสริมกำลังถึง 5.5 เท่า จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา การประยุกต์ใช้ตะแกรงเหล็กฉีกร่วมกับวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ในการเสริมกำลังนั้น ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษากำลังต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่มีการเสริมกำลัง โครงอาคารและผนังอิฐก่อแบบมีช่องเปิดบางส่วน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่อบางส่วนและมีการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- ก) เสนอวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิดบางส่วน ด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก
- ข) วิเคราะห์พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิดบางส่วน ด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีกด้วยวิธีการผลักแบบวัฏจักร

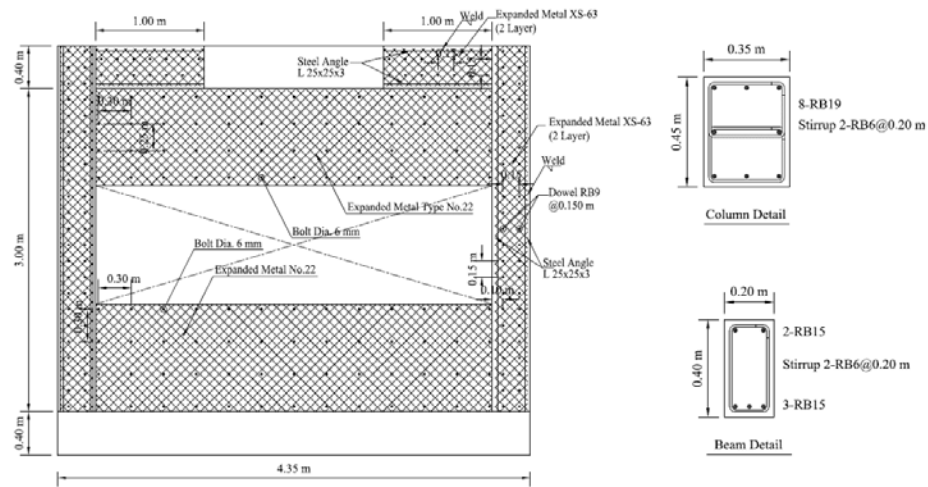
## 3. กรอบแนวคิดในการวิจัย

แบบโครงสร้างอาคารที่ใช้อ้างอิง เป็นอาคารเรียน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามแบบมาตรฐานของกระทรวงศึกษาธิการสูง 3 ชั้น โครงสร้างอาคารมีผนังอิฐก่อที่มีขนาดช่องเปิดประมาณ 40% ของพื้นที่ผนังก่ออิฐ ซึ่งถือว่าเป็นขนาดช่องเปิดหน้าต่างของอาคารเรียนทั่วไป การเสริมกำลังใช้เทคนิคเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก เสริมกำลังเสาคาน และผนังก่ออิฐ การคำนวณโครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิด ใช้แบบจำลองแรงค้ำยันเทียบเท่า (Equivalent Strut Model) และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองแรงค้ำยันเทียบเท่าและวิธีการผลักแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis)

## 4. วิธีดำเนินการวิจัย

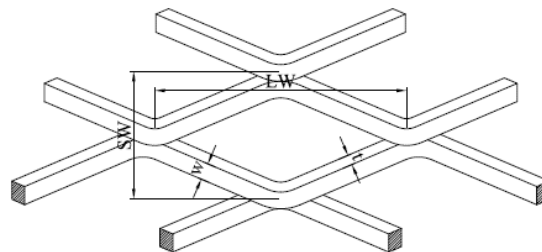
### 4.1 วิธีการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีผนังแบบมีช่องเปิดบางส่วน

การเสริมกำลังเสาและคาน ใช้ตะแกรงเหล็กฉีกขนาด XS-63 โดยใช้การเสริมกำลังโครงสร้างเปล่าที่เสนอโดย Panyakapo, P. และคณะ (2017) สำหรับการเสริมกำลังผนังอิฐมอญใช้ตะแกรงเหล็กฉีก No.22 จำนวนหนึ่งชั้น ยึดติดเข้ากับผนังทั้งสองด้านด้วยพุกขนาด 6 มม. ทูกระยะ 30 ซม. และยึดตะแกรงเหล็กฉีกเข้ากับเสาด้วยขนาดพุกและระยะการยึดแบบเดียวกัน หลังจากนั้นจึงทำการฉาบปิดด้วยปูนมอร์ตาร์หนา 1.5 ซม. แสดงในรูปแบบที่ 1



รูปที่ 1 แบบการเสริมกำลังเสา คานและผนังก่ออิฐของโครงสร้างอาคารต้นแบบ

โครงสร้างเสาคานใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัย ( $f_c'$ ) เท่ากับ 21.40 MPa ที่อายุ 28 วัน เหล็กเสริมคอนกรีต (Rebar) ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐาน TIS.20-2543 Grade SR24 ซึ่งมีค่ากำลังคราก ( $F_y$ ) ไม่น้อยกว่า 235 MPa และกำลังประลัย ( $F_u$ ) ไม่น้อยกว่า 385 MPa ตะแกรงเหล็กฉีก (Expanded Metal) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน JIS G3351 Standard ซึ่งมีค่า กำลังคราก ( $F_y$ ) และ ค่ากำลังประลัย ( $F_u$ ) เท่ากับ 340 MPa และ 400 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะของตะแกรงเหล็กฉีกตามมาตรฐาน JIS G 3351-1987 ชนิด EMS

ตารางที่ 1 ขนาดและคุณสมบัติของตะแกรงเหล็กฉีกตามมาตรฐาน JIS G 3351-1987 ชนิด EMS

ชนิดตะแกรงเหล็กฉีก	ช่วงความกว้างของรู (SW)	ช่วงความยาวของรู (LW)	ความหนา (t)	สัน (w)	น้ำหนักต่อแผ่น (ขนาดแผ่น 0.91x1.83 ม.)
	มม.	มม.	มม.	มม.	กก.
No.22	8.6	20	0.6	-	1.15
XS-63	34	76.2	4.5	4.5	16.12

กำลังอัดของปูนมอร์ต้าสำหรับงานเฟอร์โรซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน 1:4:0 มีค่าเท่ากับ 4.90 Mpa ที่อายุ 28 วัน [อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ 2555] กำลังรับแรงอัดปริซึม ( $f_m'$ ) ของผนังก่ออิฐที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กฉีกแต่ละ

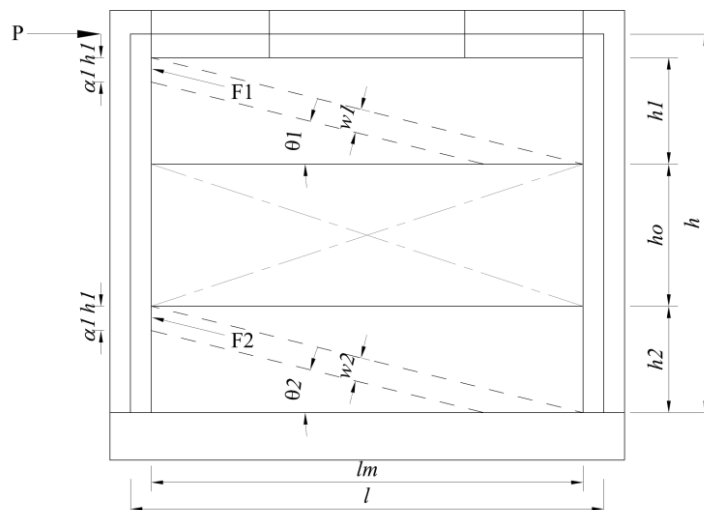
ชนิดได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1314-07 โดยควบคุมความหนาของการฉาบเฟอร์โรซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ซม. สัดส่วนของปูนก่อและฉาบใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราช 2 ส่วน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดปริซึม ( $f'_m$ ) ของผนังก่ออิฐที่เสริมด้วยตะแกรงเหล็กฉีกที่อายุ 28 วัน (อนุชาติและไพบูลย์ 2560)

ตัวอย่างทดสอบ	เสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก	กำลังรับแรงอัดปริซึมผนัง ( $f'_m$ ) N/mm <sup>2</sup>
ผนังก่ออิฐ	-	7.0
ผนังก่ออิฐ	No. 22	9.0

#### 4.2 แบบจำลองแรงค้ำยันสำหรับโครงสร้างที่มีช่องเปิด

ในการจัดทำแบบจำลองโครงสร้างที่มีผนังช่องเปิด ใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดหน้าต่างแบบบานกว้างเต็มช่วงเสา เป็นโครงสร้างต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 การเสริมกำลังเสาและคานใช้เทคนิคเฟอร์โรซีเมนต์ตามที่แสดงข้างต้น ผนังก่ออิฐแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนบนและส่วนล่างมีความสูง  $h_1$  และ  $h_2$  ตามลำดับ ส่วนกลางเป็นช่องเปิดหน้าต่างซึ่งมีความสูง  $h_0$  ผนังอิฐทั้งสองส่วนมีการเสริมกำลังด้วยเทคนิคเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก



รูปที่ 3 แบบจำลองแรงค้ำยันสำหรับโครงสร้างที่มีช่องเปิด

ในการวิเคราะห์แรงภายในแผ่นผนัง จะใช้แบบจำลองแรงค้ำยันเทียบเท่า (Equivalent Strut Model) เพื่อจำลองพฤติกรรมการรับแรงของผนังทั้งสองส่วน เมื่อพิจารณาว่า รูปแบบการวิบัติของแผ่นผนัง โดยทั่วไปเป็นแบบการแตกร้าวในแนวทแยงมุม แรงกระทำด้านข้างสูงสุด  $P$  คำนวณได้จากผลรวมของแรงต้านทานของโครงเปล่า  $R_{BF}$  และแรงต้านทานในแนวราบของผนังทั้งสองส่วน  $F_1$  และ  $F_2$  ดังนี้

$$P = R_{BF} + F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 \quad (1)$$

เมื่อ  $F_1$  และ  $F_2$  คือ แรงค้ำยันในแนวทแยงมุมสำหรับแผ่นผนังส่วนบนและแผ่นผนังส่วนล่าง ตามลำดับ คำนวณได้ดังนี้

$$F_1 = w_1 t f_a \quad (2)$$

$$F_2 = w_2 t f_a \quad (3)$$

เมื่อ  $f_a$  คือ หน่วยแรงที่ยอมรับของปริซึมอิฐ คำนวณได้จาก  $f_a = 0.6 \phi f'_m$ ,  $\phi = 0.65$ ,  $f'_m$  คือ กำลังอัดประลัยของปริซึมอิฐ  $t$  คือ ความหนาของแผ่นผนังอิฐ และ  $\theta_1, \theta_2$  คือ มุมของแรงค้ำยันในแนวทแยงเทียบกับแนวราบสำหรับแผ่นผนังส่วนบนและแผ่นผนังส่วนล่าง ตามลำดับ

แรงค้ำยันของแผ่นผนังส่วนบนและแผ่นผนังส่วนล่างมีขนาดความกว้าง  $w_1$  และ  $w_2$  สมมติว่า หน่วยแรงที่กระทำต่อผิวสัมผัสระหว่างผนังอิฐและหน้าเสามีขนาดความกว้าง  $\alpha_c h_1$  และ  $\alpha_c h_2$  ตามลำดับ ตามที่เสนอโดย Saneinejad และ Hobbs (1995) ดังนั้น ขนาดความกว้างของแรงค้ำยันเทียบเท่า คำนวณได้ ดังนี้

$$w_1 = \alpha_c h_1 \frac{l_m}{\sqrt{h_1^2 + l_m^2}} = \alpha_c h_1 \cos \theta_1 \quad (4)$$

$$w_2 = \alpha_c h_2 \frac{l_m}{\sqrt{h_2^2 + l_m^2}} = \alpha_c h_2 \cos \theta_2 \quad (5)$$

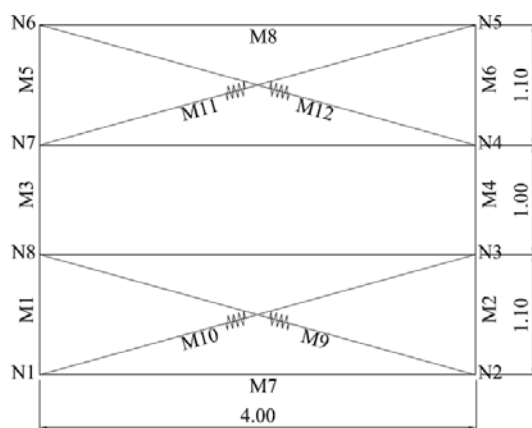
$$\alpha_c = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{2M_{pj} + 2\beta_c M_{pc}}{\sigma_c t}} \quad (6)$$

$$\sigma_c = \frac{f'_m}{\sqrt{1 + 3\mu^2 r^4}} \quad (7)$$

$\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ที่แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสโครงสร้างและผนังอิฐ,  $r$  คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงและความยาวของโครงสร้าง ( $r = h/l$ ),  $\beta_c$  คือ ตัวประกอบลดกำลังสำหรับเสา ซึ่งใช้ค่าเท่ากับ 0.2

#### 4.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการผลักแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis)

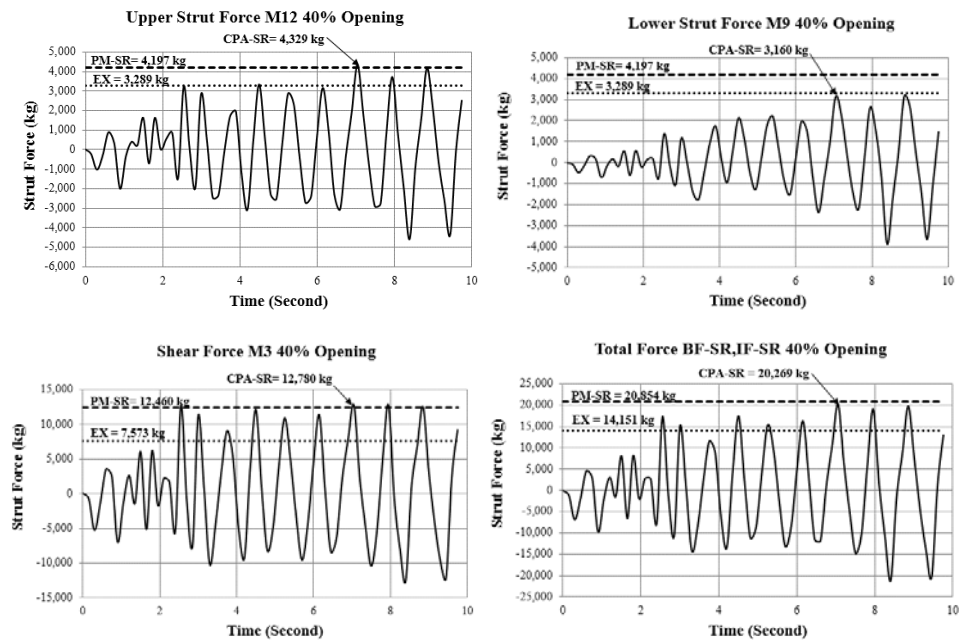
ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีผนังช่องเปิดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ทำการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม RUAUMOKO (Carr, 2006) การจำลองชิ้นส่วนคานและเสา ใช้พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรด้วยแบบจำลอง Modified Takeda การจำลองพฤติกรรมของผนังอิฐ ใช้ชิ้นส่วนสปริงซึ่งมีพฤติกรรมการรับแรงแบบไม่เชิงเส้น เพื่อเป็นตัวแทนของแรงอัดค้ำยันเทียบเท่า และใช้พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรของค้ำยันด้วยแบบจำลอง SINA Degrading Tri-linear (Saiidi และ Sozen, 1979) ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองผนังอิฐทั้งสองส่วนคำนวณโดยใช้แบบจำลองผนังอิฐตามที่แสดงโดย Leeanansaksiri A., Panyakapo P., Ruangrassamee A. (2018) ในการคำนวณ ค่าความเครียดของผนังอิฐ ใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของผลทดสอบปริซึมอิฐก่อนเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์แบบจำลองโครงสร้างที่มีผนังช่องเปิด โดยโปรแกรม RUAUMOKO แสดงในรูปแบบที่ 4 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีการผลักแบบวัฏจักร ใช้วิธีการตามที่เสนอโดย Panyakapo, P. (2014) และผลักไปถึงค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เป้าหมาย 2.5% การกระจายแรงผลักสอดคล้องกับการสั่นในรูปแบบโหมดแรก และใช้ค่าประวัติการเคลื่อนที่รูปแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ในขั้นตอนการผลักแบบวัฏจักร



รูปที่ 4 แบบจำลองแรงค้ำยันสำหรับโครงสร้างที่มีช่องเปิดเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์

#### 4.4 ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีผนังช่องเปิดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงต้านทานของโครงสร้างและเวลา ดังนี้ ค่าแรงต้านทานของแรงค้ำยันของผนังส่วนบน ค่าแรงต้านทานของแรงค้ำยันของผนังส่วนล่าง ค่าแรงเฉือนต้านทานของเสา และกำลังต้านทานรวมของโครงสร้างผนังที่มีช่องเปิด โดยมีขนาดช่องเปิด 40% ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจาก ค่าแรงต้านทานของโครงสร้างแปรเปลี่ยนตามเวลา จึงพิจารณาค่าแรงต้านทานสูงสุด ของ ผนังส่วนบน ผนังส่วนล่างและเสา ที่ตำแหน่งเวลาเดียวกัน เพื่อนำมารวมเป็นกำลังต้านทานรวมของโครงสร้างที่มีผนังช่องเปิด โดยใช้ค่าที่เป็นค่าบวกเนื่องจากพิจารณาเป็นแรงค้ำยันอัด เทียบเท่า พบว่า ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการผลัดแบบวัฏจักร ให้ผลเป็นกำลังต้านทานสูงสุด โดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาแรงต้านทานของผนัง พบว่า ผนังส่วนบนมีค่าแรงต้านทานโดยเฉลี่ยสูงกว่าผนังส่วนล่าง เนื่องจาก แรงกระทำทางด้านข้างมีการถ่ายแรงเข้าสู่ผนังส่วนบนมากกว่าผนังส่วนล่าง ดังนั้น จึงควรมีการป้องกันการวิบัติของผนังส่วนบน โดยการเสริมความแข็งแรงของผนังส่วนบนเป็นพิเศษ ได้แก่ การเพิ่มตะแกรงเหล็กฉีกในแนวทแยงมุมสำหรับผนังส่วนบน เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงของผนังในแนวทแยงมุม เป็นต้น เมื่อพิจารณาค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองโครงสร้างผนังที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโครงสร้างเดิม แสดงในตารางที่ 1 พบว่า กำลังต้านทานรวมของโครงสร้างผนังที่มีช่องเปิด มีค่าเพิ่มขึ้น มากกว่าโครงสร้างเดิม 47.37%ตามลำดับ โดยกำลังต้านทานที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเสริมกำลังเสาทำให้มีกำลังเพิ่มขึ้นประมาณ 65% และกำลังต้านทานของผนังมีค่าเพิ่มขึ้น 27.6% แสดงว่าการเสริมกำลังโครงสร้างให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์กำลังต้านทานของโครงสร้างผนังอิฐก่อเสริมกำลังจากวิธีการผลัดแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis) เทียบกับแบบจำลองที่นำเสนอ(Proposed Model)แสดงในตารางที่ 3 พบว่า กำลังต้านทานรวมของโครงสร้างผนังที่มีช่องเปิด 40% มีความแตกต่างกันเพียง 2.81% แสดงว่า แบบจำลองที่นำเสนอนี้ให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้



รูปที่ 5 กำลังต้านทานของโครงสร้างที่มีขนาดช่องเปิดที่ 40%

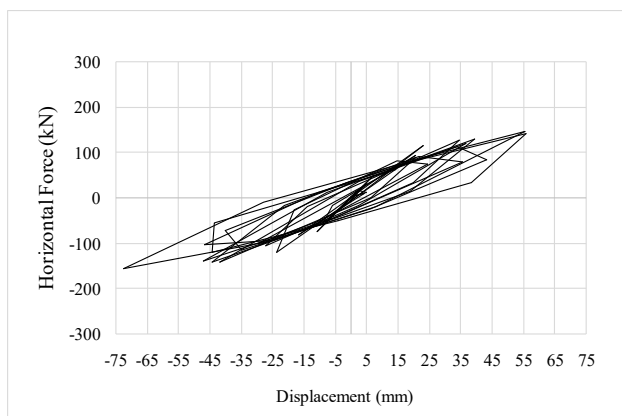
ตารางที่ 3 กำลังต้านทานของโครงสร้างผนังอิฐก่อเดิมเทียบกับ โครงสร้างผนังเสริมกำลัง (Proposed Model)

โครงสร้างมีผนังช่องเปิด	กำลังต้านทานของเสา(kg)	กำลังค้ำยันผนังอิฐก่อ		กำลังต้านทานรวม (kg)	กำลังที่เพิ่มขึ้น %
		ผนังส่วนบน (kg)	ผนังส่วนล่าง (kg)		
โครงสร้างเดิม	7,572.88	3,288.94	3,288.94	14,150.77	47.37
โครงสร้างเสริมกำลัง	12,460.00	4,197.20	4,197.20	20,854.40	

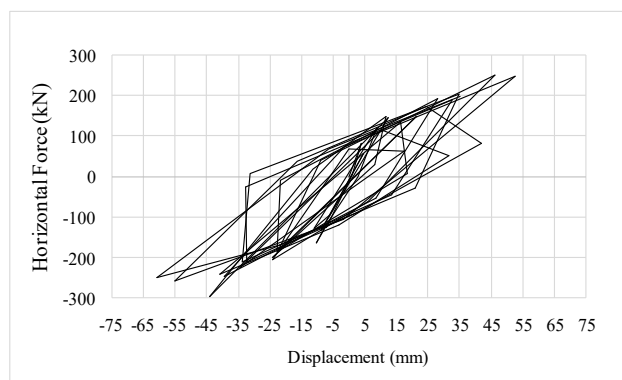
ตารางที่ 4 กำลังต้านทานของโครงสร้างผนังอิฐก่อเสริมกำลังจากวิธีการผลักแบบวัฏจักร (Cyclic Pushover Analysis) เทียบกับแบบจำลองที่นำเสนอ(Proposed Model)

โครงสร้างมีผนังช่องเปิด	กำลังต้านทานของเสา (kg)	กำลังค้ำยันผนังอิฐก่อ		กำลังต้านทานรวม(kg)	ค่าความแตกต่าง (%)
		ผนังส่วนบน (kg)	ผนังส่วนล่าง (kg)		
วิธีการผลักแบบวัฏจักร	13,630	4,687	4,259	22,576	2.81
แบบจำลองที่นำเสนอ	12,460	4,197	4,197	20,854	





รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวและกำลังรับแรงต้านข้างโครงสร้างและผนังเดิมที่มีช่องเปิด 40%



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวและกำลังรับแรงต้านข้างโครงสร้างและผนังเสริมกำลังที่มีช่องเปิด 40%

ตารางที่ 5 ระยะเวลาเคลื่อนตัวที่จุดคราก ระยะเวลาเคลื่อนตัวสูงสุด และค่าความเหนียวของ โครงสร้างที่ผนังช่องเปิดที่ 40 % ของโครงสร้างเดิมและโครงสร้างเสริมกำลัง

โครงสร้างที่มีผนังช่องเปิด	การเคลื่อนตัวที่จุดคราก $\Delta_y$ mm.	การเคลื่อนตัวที่สูงสุด $\Delta_m$ mm.	ค่าความเหนียว $= \Delta_m / \Delta_y$	กำลังที่จุดคราก $V_y$ (kN)	สติฟเนส $K_0 = V_y / \Delta_y$ (kN/mm.)
โครงสร้างเดิม	23.10	55.00	2.38	115.00	4.98
โครงสร้างเสริมกำลัง	14.80	46.20	3.13	150.00	10.14

## 5. สรุปผลการวิเคราะห์

ก) เมื่อพิจารณาผลการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ ให้ค่ากำลังต้านทานรวมของ โครงสร้างผนังที่มีช่องเปิด มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าโครงสร้างเดิม 47.37% โดยกำลังต้านทานที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเสริมกำลังเสาทำให้มีกำลังเพิ่มขึ้นประมาณ 65% และกำลังต้านทานของผนังมีค่าเพิ่มขึ้น 27.6% แสดงว่า การเสริมกำลังโครงสร้างได้ผลเป็นอย่างดี

ข) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์กำลังต้านทานของโครงสร้างผนังอิฐก่อเสริมกำลังจากวิธีการหลักแบบวิจักร เทียบกับแบบจำลองที่นำเสนอพบว่า กำลังต้านทานรวมของโครงสร้างผนังที่มีช่องเปิดมีความแตกต่างกันเพียง 2.81% ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการหลักแบบวิจักร ให้ผลเป็นกำลังต้านทานสูงสุดโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่นำเสนอ

ค) เมื่อพิจารณาค่าความเหนียวของโครงสร้าง พบว่าโครงสร้างที่มีผนังช่องเปิดเดิมมีค่าความเหนียวเท่ากับ 2.38 ซึ่งอยู่ในระดับความเหนียวต่ำ ส่วนโครงสร้างผนังช่องเปิดที่มีการเสริมกำลังค่าความเหนียวของโครงสร้างเท่ากับ 3.13 คิดเป็นความเหนียวที่เพิ่มขึ้น 31.51% การเสริมกำลังโครงสร้างและผนังช่วยเพิ่มความเหนียวให้สูงขึ้นได้เป็นอย่างดี

ง) เมื่อพิจารณาค่าสติฟเนสเริ่มต้น  $K_0$  (Initial Stiffness) โครงสร้างเดิมมีค่าเท่ากับ 4.98 kN/mm. และโครงสร้างเสริมกำลังมีค่าเท่ากับ 10.14 kN/mm คิดเป็นค่าสติฟเนสเพิ่มขึ้น 103.61% ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างผนังและผนังด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กก็ช่วยเพิ่มค่า ค่าสติฟเนสเริ่มต้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงที่จุดครากมีค่าสูงตามไปด้วย

จ) เมื่อพิจารณาแรงต้านทานของผนัง พบว่า ผนังส่วนบนมีค่าแรงต้านทานสูงกว่าผนังส่วนล่าง เนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างมีการถ่ายแรงเข้าสู่ผนังส่วนบนมากกว่าผนังส่วนล่าง การวิบัติของแผ่นผนังส่วนบนจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากกว่าแผ่นผนังส่วนล่าง ดังนั้น จึงควรมีการป้องกันการวิบัติของผนังส่วนบน โดยการเสริมความแข็งแรงของผนังส่วนบนเป็นพิเศษ

## เอกสารอ้างอิง

ไพบุลย์ ปัญญาโคโป และอนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ.2556. การเสริมกำลังผนังก่ออิฐสำหรับอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9 จังหวัดพิษณุโลก

ASTM Committee C1314-07, 2007. Standard test method for compressive strength of masonry prisms.

American Society for Testing and Materials.

Carr AJ.2006. RUAUMOKO computer program. Christchurch.New Zealand: University of Canterbury.

JIS G3351 Standard.1987 Japan industrial standards for expanded metal .

Kazemi MT, Morshed R.2005.Seismic shear strengthening of R/C columns with ferrocementjacket. Cementand Concrete Composites. 27:834–42.

Leeanansaksiri A., Panyakapo P., Ruangrassamee A. 2018 .Seismic capacity of masonry infilled RC frame strengthening with expandedmetal ferrocement.Engineering Structures.159:110-127.

Niyompanitpattana S.,Warnitchai P.2017. Effects of masonry infill walls with openings on seismic behaviorof long-span GLD RC frames. Magazine of Concrete Research. Paper 1700008.

Panyakapo P. 2014. Cyclic pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings. Engineering Structures.66:10–23.

- Panyakapo, P., Chompooyunt, S., Ruangrassamee, A. Panyakapo, M. 2017. Strengthening of RC Bare Frame using Ferrocement with Expanded Metal, The 5<sup>th</sup> International Conference on Arts and Sciences, Phuket, Thailand.
- Saiidi M, Sozen MA. 1979. Simple and complex models for nonlinear seismic response of reinforced concrete structures. Report UILU – ENG-79-2031, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, ILLINOIS.
- Saneinejad A, Hobbs B. 1995. Inelastic design of infilled frames. Journal of Structural Engineering, ASCE. 6682:634–50.
- Tasnimi, A.A. and Mohebkah, A. 2011. Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches. Engineering Structures; 33(3), 968–980.
- TIS.20-2543 Grade SR24. Thai industrial standard for round bar.