# ตัวแปรที่มีผลต่อการประมาณค่ากำลังความต้านทานแผ่นดินไหวของกำแพงอิฐก่อในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ระดับมาโคร

เอกนรา จันดา[1*], เกษรินทร์ ชาวเกวียน[2] และ จรัญ ศรีชัย[3]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[3]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
*eknara@webmail.npru.ac.th

**บทคัดย่อ**

แบบจำลองคอมพิวเตอร์ระดับมาโคร (macro modelling) มีความสำคัญและมีประสิทธิภาพในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งรวมถึงการใช้ในการจำลอง และวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงอิฐก่อในโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว ค้ำยันหลายแถว (Multi-Strut Model) เป็นหนึ่งในเทคนิคแบบจำลองระดับมาโคร ซึ่งจะประกอบด้วยค้ำยันตั้งแต่สองแถวขึ้นไป วางตัวทั้งในแนวศูนย์กลาง (Concentric) และเยื้องศูนย์ (Eccentric) กับมุมของผนังมวลเบาหรือผนังก่อ (Infill Wall) แบบจำลองนี้ถูกออกแบบมาเพื่อแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและโครงสร้างเฟรม ซึ่งส่งผลต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเฉพาะจุดภายในเฟรม การประมาณค่ากำลังของแบบจำลองค้ำยันหลายแถวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจำลองอิทธิพลของผนังก่อที่มีต่อโครงสร้างเฟรมล้อมรอบได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การทำนายคุณสมบัติของค้ำยัน (Struts' properties) ยังคงเป็นปัญหาที่ท้าทายในปัจจุบัน ในงานวิจัยนี้ เราได้วิเคราะห์ตัวแปรคุณลักษณะ (Features) ที่มีประสิทธิภาพในการประมาณค่ากำลังของแบบจำลองค้ำยันหลายแถวซึ่งเป็นตัวแทนของกำแพงอิฐก่อในโครงสร้าง โดยใช้ระเบียบวิธีทางวิทยาการข้อมูล (Data Science) ซึ่งได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการคัดเลือกคุณลักษณะ (Feature Selection) หลากหลายรูปแบบ โดยอาศัยฐานข้อมูลที่ครอบคลุมจากการศึกษาเชิงทดลองในอดีต ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ (Compressive strength of masonry) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สำคัญที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนระหว่างความกว้างและความสูงของอาคาร

**คำสำคัญ:** กำแพงอิฐก่อ แผ่นดินไหว โครงสร้าง วิทยาการข้อมูล

# Variables affecting the estimation of seismic resistance of masonry infill walls in macro-scale computer models

Eknara Junda[1*], Ketsarin Chawgien[2] and Jarun Srechai[3]

[1]Program of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University
[2]Program of Industrial Education, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University
[3]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University
*eknara@webmail.npru.ac.th

**Abstract**

Macro-modeling is an efficient approach to simulating structural behavior and is widely used today, particularly for analyzing the seismic performance of masonry infill walls in structures. The Multi-Strut Model is a key macro-modeling technique consisting of two or more struts positioned both concentrically and eccentrically relative to the infill wall corners. This model is specifically designed to represent the interaction between the wall and the frame, which influences the localized forces and moments within the frame members. However, predicting the specific properties of these struts remains a significant challenge. In this research, we analyze the efficient features required to estimate the strength of multi-strut models representing masonry infill walls. Using data science methodologies and various feature selection techniques, supported by a comprehensive database of historical experimental studies, the findings reveal that the compressive strength of masonry is the most critical variable, followed by the wall's aspect ratio (width-to-height ratio).

**Keywords:** Masonry infill walls, Earthquake, Structure, Data Science.

## 1. บทนำ

จากข้อมูลการศึกษารอยเลื่อนต่างๆในประเทศไทยและบริเวณโดยรอบ ทำให้นักวิจัยและวิศวกรทางธรณีเข้าใจถึงความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทยมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปัจจุบัน กฎกระทรวงมหาดไทย ที่ออกในปี พ.ศ. 2564 กำหนดให้อาคารขนาดเล็ก-ขนาดกลาง รวมถึงอาคารบ้านจัดสรรในพื้นที่ความเสี่ยงแผ่นดินไหวระดับปานกลาง 17 จังหวัด และระดับรุนแรงมาก 12 จังหวัด จำเป็นต้องได้รับการออกแบบให้โครงสร้างสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ แม่มาตรฐานการออกแบบในปัจจุบันยังมีความแม่นยำต่ำ ขาดการปรับปรุงให้เหมาะสมกับเครื่องมือและเทคโนโลยีในปัจจุบัน นอกจากนี้ กระบวนการออกแบบในมาตรฐานนี้ไม่ได้คำนึงถึงกำลังของผนังอิฐก่อซึ่งมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้าง เป็นเพียงการกำหนดแนวทางเบื้องต้น ไม่มีวิธีการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมอาคารภายใต้แผ่นดินไหวที่พิจารณาผลของผนังอิฐก่ออย่างเป็นระบบ

อาจกล่าวได้ว่าอาคารแทบทุกหลังในประเทศไทยใช้ระบบอาคารโครงต้านแรงดัดที่มีการก่อผนังด้วยอิฐก่อ (Masonry Infilled Moment Frame) โดยเฉพาะในอาคารขนาดเล็ก เช่น บ้าน ตึกแถว โรงเรียน แต่การออกแบบอาคารเหล่านี้ให้ต้านทานแผ่นดินไหวไม่ได้พิจารณากำลังของผนังอิฐก่อที่มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง เหตุผลหลักคือ พฤติกรรมของอาคารลักษณะนี้มีความสลับซับซ้อนเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างโครงอาคารและผนังอิฐก่อ (structure-infilled interaction) วิศวกรทั่วไปมักไม่ได้มีการพิจารณาถึงพฤติกรรมเหล่านี้ โดยจะถือว่าผนังอิฐก่อนี้เป็นส่วนของงานสถาปัตยกรรมไม่มีผลกับโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั่วโลกรวมทั้งในประเทศไทย พบว่า ผนังอิฐก่อมีผลโดยตรงกับพฤติกรรมอาคาร แม้ว่าบางครั้งจะเป็นผลดี ทำให้อาคารต้านทานแผ่นดินไหวได้ดีขึ้น แต่ส่วนใหญ่จะส่งผลเสียเมื่อ

เกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง ทำให้เกิดรูปแบบการวิบัติที่ไม่พึงประสงค์ได้ หรือทำให้พฤติกรรมของอาคารแตกต่างไปจากสมมติฐานที่ได้ออกแบบไว้ [1-4]

เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่แม่ลาว จังหวัดเชียงราย ขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ เมื่อปี พ.ศ. 2557 ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กร่วมกับผนังอิฐก่อ เหตุการณ์ในครั้งนั้นมีอาคารหลายๆหลังเกิดความเสียหายขึ้นในระดับรุนแรง โดยความเสียหายที่พบจะเกิดในอาคารขนาดเล็กและขนาดกลาง เช่น บ้านพักอาศัย ตึกแถว โรงเรียน และ โรงพยาบาลชุมชน ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้ผนังอิฐก่อเช่น ทำให้อาคารเกิดการบิดตัว ทำให้อาคารเกิดชั้นอ่อน (Soft Story) หรือเกิดการวิบัติในเสาอาคาร (ดังแสดงในภาพที่ 1)



(ก) (ข)

**ภาพที่ 1** การวิบัติของอาคาร (ก) กำแพงก่ออิฐ และ (2) เสาบริเวณช่องเปิดผนังกำแพงก่ออิฐจากอาคารที่แม่ลาว จังหวัดเชียงราย

เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่แม่ลาว ทำให้วิศวกร นักวิจัย และผู้เกี่ยวข้อง ตระหนักถึงผลกระทบจากภัยพิบัติแผ่นดินไหวในประเทศไทยมากขึ้น ได้เริ่มรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน โดยเน้นศึกษาแนวทางการเสริมกำลังอาคารเดิมต่างๆ อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่เน้นทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของผนังอิฐก่อที่มีต่อโครงสร้างยังถูกมองข้ามไป ยังมีงานวิจัยในส่วนนี้จำกัด เปรียบเสมือนการแก้ปัญหาไม่ตรงจุด ถ้าไม่มีวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบอาคารที่พิจารณาผลของผนังอิฐก่อ (No research on masonry infilled wall) ก็จะไม่มีองค์ความรู้มาปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบภายในประเทศ (No codes/standards) วิศวกรทั่วไปก็จะใช้องค์ความรู้เดิมในการออกแบบ ก็คือการไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของผนังอิฐก่อในการออกแบบ (no use) ผลที่ตามมาก็คือพฤติกรรมของอาคารภายใต้แผ่นดินไหวจะไม่เป็นไปตามสมมติฐานการออกแบบ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น อาคารจะพังเสียหายในลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้ความเพิ่มเสี่ยงต่อการวิบัติของอาคาร (No safety) [5-7]

ตามที่ได้กล่าวข้องต้นเรื่อง ความล้าหลังของวิธีการออกแบบอาคารที่มีผนังอิฐก่ออย่างเป็นระบบ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาวิธีการออกแบบที่ถูกต้อง และใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของอาคารมากยิ่งขึ้น ควบคู่กับงานวิจัยด้านการเสริมกำลังอาคารเก่า ดังนั้น งานจึงมีเป้าหมายในการสร้างแบบจำลองและพัฒนาวิธีการเพื่อประมาณค่ากำลังการต้านทานแผ่นดินไหวของผนังอิฐก่อที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้กับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ระดับมาโคร

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 ภาพรวมของกรอบการทำงาน

เป้าหมายสำหรับการฝึกฝน แบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model) ถูกรวบรวมมาจากชุดข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้อง (Validated dataset) ของ Srechai และคณะ (2023) สำหรับโครงสร้างแบบ Dual-strut configuration (การใช้ค้ำยันคู่) แบบจำลองมหภาคแบบค้ำยันคู่ ซึ่งใช้ค้ำยัน (Strut) สองตัวต่อหนึ่งทิศทาง เพื่อจำลองแรงต้านทานทางด้านข้างของเฟรม โดยค้ำยันทั้งสองถูกจำลองด้วยหน้าตัดแบบเส้นใย (Fiber sections) ที่มีคุณสมบัติรับแรงดึงเป็นศูนย์ (Zero tensile strength)

ค่าเป้าหมายสำหรับการปรับเทียบ (Calibration targets) ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว ที่กำหนดขอบเขตพฤติกรรมแบบ Kent-Scott-Park envelope ของค้ำยัน ได้แก่

- $f_{mi}$, $\varepsilon_{mi}$ : กำลังสูงสุด (Peak strength) และความเครียดที่จุดสูงสุด
- $f_{mi\text{-}r}$, $\varepsilon_{mi\text{-}r}$: กำลังคงค้าง (Residual strength) และความเครียด ณ จุดคงค้าง

โดยรายละเอียดของค้ำยันทั้งสองมีดังนี้

- ค้ำยันแนวร่วมศูนย์ (Concentric Strut - $Strut_c$) เป็นตัวแทนของความแข็งเกร็งเริ่มต้น (Initial stiffness) และพฤติกรรมที่ยังไม่เกิดความเสียหายของเฟรมที่มีผนังก่อเต็ม โดยพารามิเตอร์ ($f_{mc}$, $\varepsilon_{mc}$, $f_{mc\text{-}r}$, $\varepsilon_{mc\text{-}r}$) จะควบคุมการตอบสนองของโครงสร้างในภาพรวมและการถ่ายแรงในแนวดิ่ง/แนวราบในช่วงเริ่มต้นของการรับแรง
- ค้ำยันแนวเยื้องศูนย์ (Eccentric Strut – $Strut_e$) ถูกวางไว้ถัดจากค้ำยันแนวร่วมศูนย์ โดยเยื้องระยะ 2d และ d ที่ส่วนบนและส่วนล่างของผนังตามลำดับ องค์ประกอบนี้จะควบคุมสภาวะที่เกิดความเสียหาย (Damaged state) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังกับเฟรมในระดับชิ้นส่วนย่อย (Local interaction) พารามิเตอร์ต่างๆ ($f_{me}$, $\varepsilon_{me}$, $f_{me\text{-}r}$, $\varepsilon_{me\text{-}r}$) จะจับพฤติกรรมทางด้านข้างในช่วงที่ผนังเริ่มแตกร้าว (Cracking stage)

พารามิเตอร์เป้าหมายเหล่านี้ได้มาจากการกระบวนการ ระบุตัวตนย้อนกลับอย่างเป็นระบบ (Systematic inverse identification) โดยเปรียบเทียบกับชุดผลการทดสอบที่ครอบคลุม (กลุ่มตัวอย่างผนังก่อเติมเต็มในเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กแบบชั้นเดียวช่องเดียว ซึ่งครอบคลุมทั้งมิติทางเรขาคณิต คุณสมบัติวัสดุ และกลไกการวิบัติที่หลากหลาย) เกณฑ์การคัดเลือกถูกจำกัดเฉพาะชิ้นงานทดสอบที่มีมาตราส่วน (Scale factor) ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป เพื่อให้มั่นใจว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับความต้องการต้านทานแผ่นดินไหวในสภาวะจริง และเพื่อลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนทางมาตราส่วน ( Scaling effects)

การรวมกันของค้ำยันทั้งสองภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง ช่วยให้แนวทางนี้สามารถจำลองการตอบสนองในภาพรวม (Global response) และแรงเฉือนส่วนเกินที่เกิดขึ้นกับเสาในช่วงหลังจุดสูงสุด (Post-peak stage) ได้ ซึ่งแนวทางแบบค้ำยันเดี่ยว (Single-strut) แบบดั้งเดิมมักจะกระจายแรงผิดพลาด ดังที่แสดงให้เห็น ในช่วงเริ่มต้นของการรับแรง การถ่ายแรงทางด้านข้างจากการเสียรูปของเฟรมจะส่งผลต่อความต้านทานของผนังต่อการเสียรูปในแนวทแยง ($C_m$) ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแนวคิด ค้ำยันแนวร่วมศูนย์สมมูล อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงระยะแตกร้าว กลไกการถ่ายแรงทางด้านข้างของระบบจะเปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิงเนื่องจากการสะสมความเสียหายภายในผนังก่อ ตำแหน่งของความเค้นสูงสุดจะเลื่อนลงจากด้านบนของผนังตามขอบของเขตความเสียหาย (Damaged zone)

ในกรณีของ เฟรมที่อ่อนแอแต่ผนังแข็งแรง (Weak frame, Strong infill) เขตความเสียหายที่ขยายตัวเกินระยะความลึกประสิทธิผลของเสา (Column’s effective depth) สามารถกระตุ้นให้เกิด กลไกเสาสั้น (Captive column mechanism ) นำไปสู่การวิบัติด้วยแรงเฉือนแบบเปราะ (Brittle shear failure) ในทางกลับกัน สำหรับ เฟรมที่แข็งแรง (Strong frame) ผนังก่อจะค่อยๆ ถูกทำลายลงในขณะที่เฟรมเกิดจุดหมุนพลาสติกจากการดัด (Flexural hinges) ปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนเหล่านี้จะถูกประมาณค่าโดยใช้ ค้ำยันแนวเยื้องศูนย์ (Eccentric strut)

**2.2 การกำหนดขอบเขตข้อมูลนำเข้าและการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น**

เพื่อให้แบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model) สามารถจับพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังก่อและเฟรม (Infill-frame interaction) ที่มีความไม่เชิงเส้นสูง (Nonlinear) และเพื่อป้องกันปัญหา Overfitting (การที่โมเดลจดจำข้อมูลมากเกินไปจนนำไปใช้กับเคสอื่นไม่ได้) ในสภาวะที่มีชุดข้อมูลจำกัด การสร้างแบบจำลองจึงดำเนินการโดยใช้ชุดของคุณลักษณะ (Feature sets) ที่ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน โดยจะสร้างขอบเขตข้อมูลนำเข้า (Input space) โดยใช้วิธีการ วิศวกรรมคุณลักษณะแบบลำดับชั้น (Hierarchical feature engineering strategy) ซึ่งไม่เพียงแต่รวมตัวแปรพื้นฐานทางเรขาคณิตและวัสดุเท่านั้น แต่ยังรวมถึงดัชนีไร้มิติต่างๆ และดัชนีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากหลักกลศาสตร์ด้วย โดยคุณลักษณะเหล่านี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พารามิเตอร์ดิบ (Raw parameters) และ อัตราส่วนไร้มิติและเรขาคณิต

**2.2.1 พารามิเตอร์วัสดุและเรขาคณิตพื้นฐาน (Raw constitutive parameters)**

ข้อมูลนำเข้าพื้นฐานเหล่านี้เป็นตัวแทนของคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุ ดังนี้

- คุณสมบัติทางเรขาคณิตของเฟรม ได้แก่ ระยะความสูงและความยาววัดจากกึ่งกลางถึงกึ่งกลาง (H, L), มิติของคาน ($d_b$, $h_b$) และมิติของเสา ($d_c$, $h_c$) ซึ่งแทนความลึกและความกว้างของคานและเสาตามลำดับ
- คุณสมบัติทางเรขาคณิตของผนัง ได้แก่ ความสูงของผนัง ($H_w$), ความยาวของผนัง ($L_w$), ความยาวแนวทแยงของผนัง ($D_w$) และความหนาของผนัง ($t_w$)
- คุณสมบัติของวัสดุ ได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต ($f'_c$), โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ($E_c$), กำลังอัดของผนังก่อ ($f_m$) และโมดูลัสการอัดของผนังก่อ ($E_m$)

พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและวัสดุพื้นฐานที่กำหนดลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** พารามิเตอร์วัสดุและเรขาคณิต

| สัญลักษณ์ | หน่วย | คำอธิบายและความสำคัญต่อแบบจำลอง |
|---|---|---|
| H | mm | ความสูงเฟรมวัดจากกึ่งกลางคาน (Frame center-to-center height): ระยะดิ่งระหว่างเส้นกึ่งกลางของคานบนและคานล่าง |
| L | mm | ความยาวเฟรมวัดจากกึ่งกลางเสา (Frame center-to-center length): ระยะราบระหว่างเส้นกึ่งกลางของเสา |
| $h_c$ | mm | ความลึกของเสา (Column Depth): ความลึกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ในระนาบเดียวกับผนัง) |
| $b_c$ | mm | ความกว้างของเสา (Column width): ความหนาของเสาในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผนัง |
| $h_b$ | mm | ความลึกของคาน (Beam depth): ความลึกในแนวตั้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่ |
| $b_b$ | mm | ความกว้างของคาน (Beam width): ความกว้างของคานในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผนัง |
| $H_w$ | mm | ความสูงของผนังเติมเต็ม (Infill wall height): ความสูงสุทธิ (Clear height) ของแผงผนังก่อ (วัดภายในเฟรม) |
| $L_w$ | mm | ความยาวของผนังเติมเต็ม (Infill wall length): ความยาวสุทธิ (Clear length) ของแผงผนังก่อ |
| $D_w$ | mm | ความยาวแนวทแยงของผนัง (Diagonal length): คำนวณจาก $H_w^2+L_w^2$ ใช้เป็นความยาวทางเรขาคณิตของค้ำยันในแบบจำลองมหภาค (Macro-model) |
| $t_w$ | mm | ความหนาของผนังเติมเต็ม (Infill wall thickness): ความหนาของแผงผนังก่อ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่หน้าตัดของค้ำยันสมมูล (Equivalent strut area) และกำลังรับแรงทางด้านข้างทั้งหมด |
| $f_c'$ | MPa | กำลังอัดของคอนกรีต (Concrete compressive strength): ควบคุมความแข็งเกร็งขององค์ประกอบเฟรม ($E_c$) และกำลังรับแรงเฉือนของเสา |
| $E_c$ | MPa | โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic modulus of concrete): คุณสมบัติวัสดุที่แสดงความแข็งเกร็งสัมพัทธ์ (Relative stiffness) ระหว่างเฟรมและผนัง |
| $f_m$ | MPa | กำลังอัดของผนังก่อ (Masonry compressive strength): ปัจจัยหลักของกำลังต้านทานของผนังเติมเต็ม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อขนาดกำลังของค้ำยันสมมูล |
| $E_m$ | MPa | โมดูลัสยืดหยุ่นของผนังก่อ (Elastic modulus of masonry): ความแข็งเกร็งของผนังก่อ |

**2.2.2 พารามิเตอร์ไร้มิติและพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต**

พฤติกรรมของระบบเฟรมเติมเต็มผนังได้รับอิทธิพลอย่างวิกฤตจากอัตราส่วนภาพ (Aspect ratios) งานวิจัยนี้จึงได้นำอัตราส่วนไร้มิติ 4 ค่ามาใช้เป็นพารามิเตอร์ศักยภาพ ซึ่งค่าเหล่านี้คำนวณมาจากมิติพื้นฐานและถูกใช้เป็น คุณลักษณะเพิ่มเติม (Additional features) เนื่องจากมักมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปแบบพฤติกรรมทางโครงสร้าง (เช่น ประเภทการ

วิบัติ, เสถียรภาพ) พารามิเตอร์ที่ปรับบรรทัดฐาน (Normalized parameters) เหล่านี้ช่วยให้โมเดลสามารถเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบที่มีมาตราส่วน (Scales) ต่างกันได้

- อัตราส่วนภาพของเฟรม (H/L) คือ ระบุลักษณะเรขาคณิตโดยรวมของเฟรมล้อมรอบ
- อัตราส่วนภาพของผนังเติมเต็ม ($H_w/L_w$) คือ กำหนดจากมิติสุทธิของผนัง ตัวแปรเหล่านี้มักเชื่อมโยงกับกลไกการวิบัติ โดยหากอัตราส่วนต่ำ (ประมาณ 0.5) จะบ่งชี้ว่าเป็นผนังเตี้ย (Squat wall) ซึ่งแนวโน้มจะเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนเยื้องประสาน (Sliding shear failure) ตามแนวรอยต่อก่ออิฐ ในทางกลับกัน หากอัตราส่วนสูง (> 1.5) จะบ่งชี้ว่าเป็นผนังชะลูดที่เสี่ยงต่อการวิบัติแบบมุมผนังถูกบดอัด (Corner crushing) หรือการแตกร้าวจากแรงดึงแนวทแยง (Diagonal tension failure)
- อัตราส่วนความชะลูด ($H_w/t_w$) ใช้เพื่อพิจารณาความไม่มั่นคงทางเรขาคณิต โดยระบุพฤติกรรมนอกระนาบ (Out-of-plane) ของผนัง
- ความกว้างค้ำยันปรับบรรทัดฐาน ($w/H_w$) ช่วยให้โมเดลวัดเชิงปริมาณของการกระจายความเค้นอัดภายในแผงผนัง โดยที่ w คือความกว้างประสิทธิผลของค้ำยัน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$w = 0.175\lambda_H^{-0.4} D_w \tag{1}$$

โดยที่ $\lambda_H$ คือพารามิเตอร์ไร้มิติที่เป็นตัวแทนของความแข็งเกร็งทางด้านข้างสัมพัทธ์ระหว่างผนังและเฟรม ดังนี้

$$\lambda_H = \sqrt[4]{\frac{E_m t_w \sin 2\theta}{4E_c I_c H_w}} H \tag{2}$$

เมื่อ $I_c$ คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเสา และ $\theta$ คือมุมเอียงของเส้นทแยงมุมที่เชื่อมมุมของผนังเทียบกับแนวราบ

**ตารางที่ 2** พารามิเตอร์ไร้มิติ

| สัญลักษณ์ | หน่วย | คำอธิบายและความสำคัญต่อแบบจำลอง |
|---|---|---|
| *w* | mm | ความกว้างทางทฤษฎีของค้ำยันแนวทแยงสมมูล เป็นมิติพื้นฐานสำหรับหน้าตัดของค้ำยัน และเป็นตัวคูณมาตราส่วนหลักสำหรับกำลังรับแรงตามแนวแกนของค้ำยัน |
| *H/L* | - | อัตราส่วนความสูงต่อความยาวเฟรม (Center-to-center) ระบุลักษณะเรขาคณิตโดยรวมของเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็ก |
| $H_w/L_w$ | - | อัตราส่วนความสูงสุทธิของผนังต่อความยาวสุทธิ ซึ่งวิกฤตต่อการระบุรูปแบบการวิบัติ (Failure modes) |
| $H_w/t_w$ | - | อัตราส่วนความสูงสุทธิของผนังต่อความหนา เป็นพารามิเตอร์ด้านเสถียรภาพที่ควบคุมพฤติกรรมนอกระนาบ หากค่านี้สูงจะเสี่ยงต่อการโก่งเดาะ (Buckling) ออกจากเฟรมก่อนที่จะถึงกำลังสูงสุดในระนาบ ส่งผลให้กำลังต้านทานทางด้านข้างลดลง |
| $w/H_w$ | - | อัตราส่วนความกว้างค้ำยันต่อความสูงผนัง เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติที่ช่วยให้โมเดลวัดการแผ่กระจายของความเค้นอัดภายในแผงผนังได้ |

**2.3 การประเมินคุณลักษณะโดยอิงตามหลักกลศาสตร์**

เพื่อให้ได้ชุดตัวแปรนำเข้าที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการคัดเลือกแบบลูกผสม (Hybrid) ดังนี้

- Spearman's Rank-Order Correlation เพื่อใช้ระบุความซ้ำซ้อนแบบ 1 ต่อ 1 เนื่องจากดัชนีทางฟิสิกส์มักเป็นไปตามกฎกำลัง (Power laws) ค่าความสัมพันธ์แบบ Spearman จึงดีกว่า Pearson ในการจับความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นที่แปรผันตามกัน (Non-linear monotonic)
- Multicollinearity Check เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างกลุ่มตัวแปร โดยคำนวณค่า Variance Inflation Factor (VIF) เพื่อคัดกรองตัวแปรที่ซ้ำซ้อนออกไป ขั้นตอนนี้ช่วยให้มั่นใจว่าตัวแปรที่เลือกมีความแตกต่างกันเพียงพอ ส่งผลให้แบบจำลองลู่เข้า (Convergence) อย่างมีเสถียรภาพ

**2.4 กรอบการพัฒนาแบบจำลอง**

พารามิเตอร์ของวัสดุ (Constitutive parameters) มีระดับความยากง่ายในการทำนายต่างกัน

- พารามิเตอร์ช่วงจุดสูงสุด (Peak) สัมพันธ์อย่างรุนแรงกับเรขาคณิตและวัสดุพื้นฐาน
- พารามิเตอร์คงค้าง (Residual) เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพที่ซับซ้อนและมีความไม่แน่นอนสูง

งานวิจัยนี้จึงสร้างกรอบการทำงานเชิงคำนวณที่เป็นระบบ เพื่อหาฟังก์ชันการจับคู่ (Mapping function) ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้กระบวนการ Fold-safe pipeline เพื่อป้องกันข้อมูลรั่วไหล (Data leakage) ทำให้มั่นใจได้ว่าโมเดลสามารถนำไปใช้ได้จริง (Generalization) และใช้อัลกอริทึม Lasso Regression (Linear Baseline) โดยใช้ L1 Regularization เพื่อคัดเลือกตัวแปรอัตโนมัติโดยลดสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องให้เป็นศูนย์ เหมาะสำหรับพารามิเตอร์ที่แปรผันตามมาตราส่วนทางเรขาคณิตโดยตรง [8-11]

**3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล**

**3.1 ประสิทธิภาพการพยากรณ์และการประเมินแบบจำลอง**

ความสามารถในการพยากรณ์ของกรอบการทำงานที่นำเสนอได้รับการประเมินผ่านพารามิเตอร์วัสดุทั้งหมด ทั้งในส่วนของกลไกค้ำยันแนวร่วมศูนย์ ($Strut_c$) และแนวเยื้องศูนย์ ($Strut_e$) โดยรายงานผลผ่านโปรโตคอลการตรวจสอบความถูกต้องแบบแบ่งชั้น (Stratified-fold cross-validation)

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่าง Lasso (แบบจำลองเชิงเส้น) และ GBR (แบบจำลองไม่เชิงเส้น) พบกลไกที่ควบคุมกำลังและความสามารถในการเสียรูป ดังนี้:

- ด้านกำลัง (Strength): สำหรับค่ากำลังสูงสุดแนวร่วมศูนย์ ($f_{mc}$) แบบจำลอง Lasso ให้ความแม่นยำสูงมาก ($R^2$ = 0.937) บ่งชี้ว่ากำลังทางด้านข้างในภาพรวมของผนังเติมเต็มถูกควบคุมโดยความสัมพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่งกับกำลังอัดของผนังก่อ ($f_m$) และเรขาคณิตของผนังเป็นหลัก ด้วยเหตุนี้ แบบจำลอง Lasso จึงถูกนำมาประมวลผลซ้ำ (Refit) กับชุดข้อมูลทั้งหมด และทำการแปลงค่ากลับ (Back-transformed) ให้อยู่ในหน่วยของคุณลักษณะดั้งเดิม ซึ่งทำให้ได้สมการรูปแบบกะทัดรัด (Compact expression) ที่คงเหลือตัวแปรพยากรณ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ไม่เป็นศูนย์เพียงสองตัว สำหรับการประเมินค่า ดังนี้

$$f_{mc} = 2.01746 + 0.78509 f_m - 1.21845\left(H_w / L_w\right) \quad (3)$$

- ด้านความเหนียว (Ductility): แบบจำลองเชิงเส้นไม่สามารถจับขีดจำกัดการเสียรูปได้ โดย Lasso ให้ค่า $R^2$ สำหรับความเครียดที่จุดสูงสุด ($\varepsilon_{mc}$) เพียง 0.151 ในขณะที่ GBR พัฒนาความแม่นยำขึ้นเป็น 0.495 แสดงให้เห็นว่าความเหนียวถูกขับเคลื่อนด้วยปฏิสัมพันธ์ที่ไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อนระหว่างอัตราส่วนภาพ (Aspect ratio) และการโอบรัดของเฟรมขอบเขต (Boundary-frame confinement)

ประเด็นสำคัญที่พบคือ ประสิทธิภาพความแม่นยำระหว่างพารามิเตอร์ฐานแรง (Force-based) และฐานการเคลื่อนที่ (Displacement-based) โดยพารามิเตอร์การเสียรูปมีความไม่แน่นอนเชิงสุ่ม (Aleatory uncertainty) สูงกว่า เนื่องจากพฤติกรรมหลังจุดสูงสุดของผนังก่อถูกกำหนดโดยกลไกสุ่มเฉพาะจุด เช่น การขยายตัวของรอยแตกแยกชิ้นและการรูดไถลที่ผิวสัมผัส อาจจำเป็นต้องเพิ่มเทคนิคขั้นสูงในการพัฒนาแบบจำลองในอนาคต

**ตารางที่ 3** ประสิทธิภาพแบบจำลอง Concentric strut

| Parameter | Strut | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Concentric Strut | | Eccentric Strut | |
| | $R^2$ | RMSE | $R^2$ | RMSE |
| $f_m$ (MPa) | 0.937 | 1.027 | 0.577 | 2.128 |
| $\varepsilon_m$ (%) | 0.151 | 0.047 | -0.015 | 0.079 |
| $f_{m-r}$ (MPa) | 0.484 | 0.875 | -0.006 | 1.129 |
| $\varepsilon_{m-r}$ (%) | 0.166 | 0.290 | 0.206 | 0.290 |

**4. บทสรุป**

- ตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุด ต่อการประมาณค่ากำลังความต้านทานแผ่นดินไหวของกำแพงอิฐก่อ คือ กำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ ($f_m$) รองลงมาคือ อัตราส่วนภาพ (Aspect ratio หรืออัตราส่วนระหว่างความกว้างและความสูง)
- กำลังรับแรงของผนัง (Strength) สามารถคาดการณ์ได้แม่นยำผ่านแบบจำลองเชิงเส้น ($R^2$ = 0.937) ขณะที่พฤติกรรมความเหนียวและการเสียรูป (Ductility) มีความซับซ้อนแบบไม่เชิงเส้นสูง อาจจำเป็นต้องใช้แบบจำลองขั้นสูง (เช่น GBR) ในการทำนายพฤติกรรมร่วมกับการพิจารณาอัตราส่วนภาพและการโอบรัดของโครงสร้างเฟรมล้อมรอบ

**5. กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยผ่านสำนักวิจัยและพัฒนา นอกจากนี้ ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญและนักวิจัยในอดีตทุกท่านเจ้าของฐานข้อมูลการทดลองโครงสร้าง ซึ่งช่วยให้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องได้อย่างสมบูรณ์

**6. เอกสารอ้างอิง**

[1] W. Wararuksajja, J. Srechai, S. Leelataviwat, T. Sungkamongkol, and S. Limkatanyu, “Seismic design method for preventing column shear failure in reinforced concrete frames with infill walls,” Journal of Building Engineering, vol. 44, p. 102963, 2021.

[2] FEMA P-751, “2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples,” no. September, p. 916, 2012.

[3] American Society of Civil Engineers (ASCE), “FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building,” Rehabilitation, no. November, 2000.

[4] FEMA, “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440,” FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, vol. 440, no. June, p. 392, 2005.

[5] E. Junda, S. Leelataviwat, and P. Doung, “Cyclic testing and performance evaluation of buckling-restrained knee-braced frames,” Journal of Constructional Steel Research, vol. 148, pp. 154–164, 2018.

[6] S. Leelataviwat, B. Suksan, J. Srechai, and P. Warnitchai, “Seismic Design and Behavior of Ductile Knee-Braced Moment Frames,” Journal of Structural Engineering, vol. 137, no. 5, pp. 579–588, 2011.

[7] A. Khampanit, S. Leelataviwat, J. Kochanin, and P. Warnitchai, “Energy-based seismic strengthening design of non-ductile reinforced concrete frames using buckling-restrained braces,” Engineering Structures, vol. 81, pp. 110–122, 2014.

[8] K. Chawgien and S. Kiattisin, “Machine learning techniques for classifying the sweetness of watermelon using Acoustic signal and Image processing,” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 181, no. Ml, pp. 1–34, 2021.

[9] E. Junda, C. Málaga-Chuquitaype, and K. Chawgien, “Interpretable machine learning models for the estimation of seismic drifts in CLT buildings,” Journal of Building Engineering, vol. 70, no. March, 2023.

[10] C. Málaga-Chuquitaype, “Machine Learning in Structural Design: An Opinionated Review,” Frontiers in Built Environment, vol. 8, no. February, pp. 1–12, 2022.

[11] E. Junda and C. Málaga-Chuquitaype, “Seismic acceleration demands in tall CLT buildings, predictive models and intensity measures,” Engineering Structures, vol. 298, no. December 2022, p. 117024, 2024.