ผลตอบสนองแบบวัฏจักรของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังแบบแยกส่วน

Cyclic Response of Infilled Reinforced Concrete Frames with Partial-Isolated Walls

จรัญ ศรีชัย[1,*] วงศา วรารักษ์สัจจะ[2] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[3]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: srechai@eng.buu.ac.th*

บทคัดย่อ

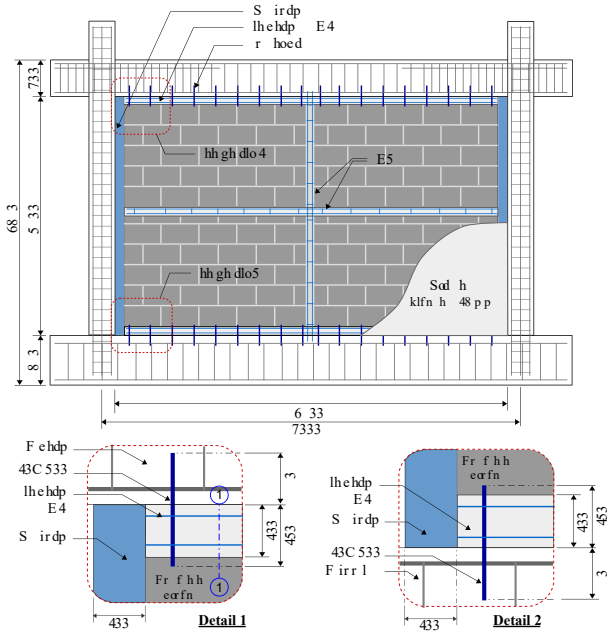
ของผนังอิฐในการออกแบบอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยได้แนะนำวิธีการป้องกันรูปแบบความเสียหายที่ไม่พึงประสงค์ของโครงสร้างดังที่กล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีข้อจำกัดในการนำไปใช้กับอาคารที่มีอยู่เดิม โดยเฉพาะการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาอาคาร

การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงรูปแบบผนังอิฐก่อเพื่อลดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของอาคารเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ของผนังอิฐก่อ โดยการแยกผนังไม่ให้สัมผัสกับเสาโดยตรง รวมถึงพัฒนาวิธีการปรับปรุงรูปแบบรอยต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดที่สามารถส่งถ่ายแรงได้ดี ศึกษาผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแบบวัฏจักรโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. การปรับปรุงผนังอิฐก่อและการทดสอบ

2.1 การปรับปรุงผนังอิฐก่อตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

การวิบัติของเสาเนื่องจากแรงเฉือนเป็นปัญหาที่พบได้บ่อย โดยมักเกิดจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังกับโครงสร้าง ในการศึกษานี้จึงเสนอเทคนิคการใช้ผนังอิฐก่อแบบแยกส่วน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและใช้ประโยชน์จากผนังในการต้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเทคนิคนี้จะกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างผนังอิฐก่อและเสาของโครงต้านแรงดัด เพื่อลดแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังกับเสา โดยใช้ EPS โฟม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงปิดช่องว่างระหว่างผนังและเสา การทำให้เกิดช่องว่างดังกล่าวส่งผลให้ความสามารถในการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างผนังและคาน โดยการใช้เหล็กเดือยต้านแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อส่งถ่ายแรงและใช้ประโยชน์จากผนังในการต้านทานแรงด้านข้าง



รูปที่ 1 การปรับปรุงผนังอิฐก่อแบบแยกส่วนและตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษานี้จะใช้ตัวอย่างทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อขนาดจริง โดยกำหนดให้โครงต้านแรงดัดเป็นประเภทที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Moment Resisting Frames - IMRFs) ตามมาตรฐานการออกแบบแผ่นดินไหวของประเทศไทย โดยตัวอย่างทดสอบมีช่วงยาว 4000 มม. และความสูง 3000 มม. ขนาดหน้าตัดของเสาและคานเท่ากับ 300×300 มม. และ 400×200 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 การทดสอบนี้ดำเนินการต่อเนื่องจากการทดสอบของ Wararuksajja et al. 2021 [3] ตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้เป็นการก่อผนังใหม่ทดแทนผนังเดิมที่เสียหายจากการทดสอบก่อนหน้า และทำการปรับปรุงดังอธิบายข้างต้น โดยไม่มีการซ่อมแซมโครงต้านแรงดัดเนื่องจากไม่มีความเสียหายที่รุนแรง ดังนั้นโครงต้านแรงดัดจึงมีความเสียหายคงค้าง เช่น รอยแตกร้าวของคอนกรีต และการยืดตัวของเหล็กเสริม คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีตและผนังอิฐก่อในตารางเป็นค่าที่ทำการทดสอบก่อนหน้าวันทดสอบโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ 1 วัน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ

คุณสมบัติของวัสดุ	MPa
กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาวในเสาและคาน	577
กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในเสา	573
กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในคาน	578
กำลังอัดของคอนกรีตในเสา	29.4
กำลังอัดของคอนกรีตในคาน	30.1
กำลังอัดของผนังอิฐก่อพร้อมปูนฉาบ	5.82
กำลังอัดของคอนกรีตในเสาเอ็นและคานทับหลัง	13.8

โดยจะทำการทดสอบภายใต้แรงด้านข้างแบบวัฏจักร (cyclic load) กระทำที่กึ่งกลางความลึกของคาน ร่วมกับแรงบรรทุกคงที่ในแนวดิ่ง (constant vertical load) กระทำที่หัวเสาทั้งสองต้น ดังแสดงในรูปที่ 2 แรงกระทำด้านข้างจะใช้วิธีการควบคุมระยะเคลื่อนตัว (displacement control) โดยทำการทดสอบจำนวนสองรอบในทุกๆ ระยะเคลื่อนตัว และค่อยๆ เพิ่มระยะเคลื่อนตัวขึ้นจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ

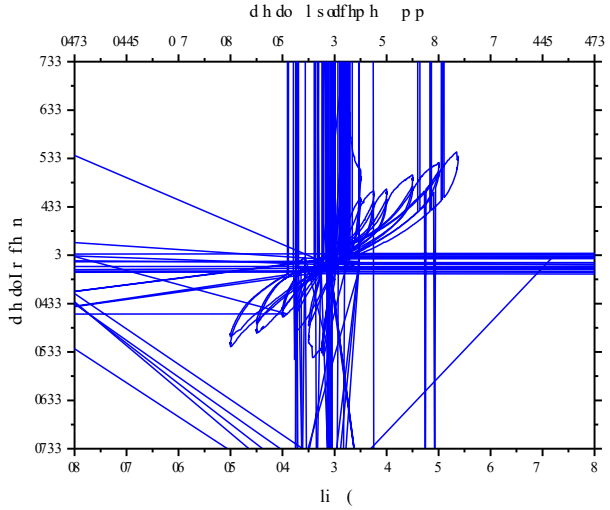


รูปที่ 2 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

2.2 ผลการทดสอบ

ในระหว่างการทดสอบพบว่า เมื่อเริ่มให้แรงผลักจนตัวอย่างทดสอบเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้าง ผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงมีการเคลื่อนตัวไปด้วยกันและมีการส่งถ่ายแรงบริเวณรอยต่อระหว่างผนังและคานอย่างสมบูรณ์ ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ (drift) ประมาณ 0.1% พบรอยร้าวขนาดเล็กบริเวณรอยต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัด รวมถึงเกิดรอยร้าวในแนวทแยงในผนังอิฐก่อ รอยร้าวในแนวทแยงดังกล่าวมีความกว้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น และมีรอยร้าวอื่นๆ ในผนังเกิดขึ้นเมื่อให้สลับทิศ ที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง 0.25% พบว่าผนังรอยร้าวในผนังมีความกว้างมากกว่า 2 มม. และกำลังต้านทานแรงด้านข้างของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว กำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่างทดสอบนี้มีค่าเท่ากับ 295 kN และ 213 kN ในทิศทางผลัก (+) ทิศทางดึง (-) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3

ที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 1.00% พบว่าชิ้นส่วนที่แตกร้าวของผนังหลุดออกจนเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในผนังหลายจุด ทำให้กำลังต้านแรงด้านข้างของผนังลดลงอย่างมาก กำลังต้านทานแรงส่วนใหญ่มาจากโครงต้านแรงดัด และมีกำลังที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเท่ากับ 2.00% พบว่าผนังอิฐก่อเกิดความเสียหายรุนแรงดังแสดงในรูปที่ 4 และตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างประมาณ 190 kN อย่างไรก็ตามไม่พบความเสียหายที่รุนแรงในเสา คาน และจุดต่อระหว่างเสาและคาน ของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5 พบเพียงรอยแตกร้าวขนาดเล็กในเสาและคานที่เกิดจากการทดสอบก่อนหน้าที่มีความกว้างเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

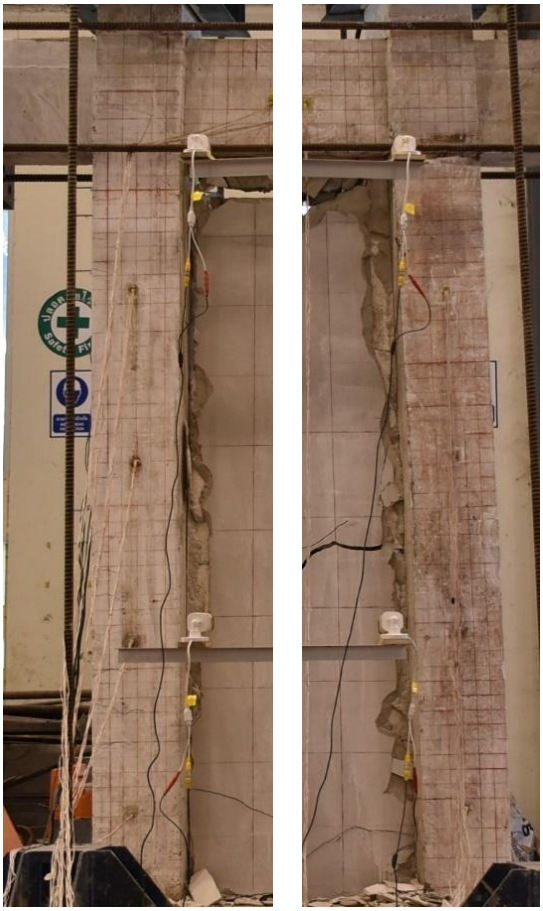


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง

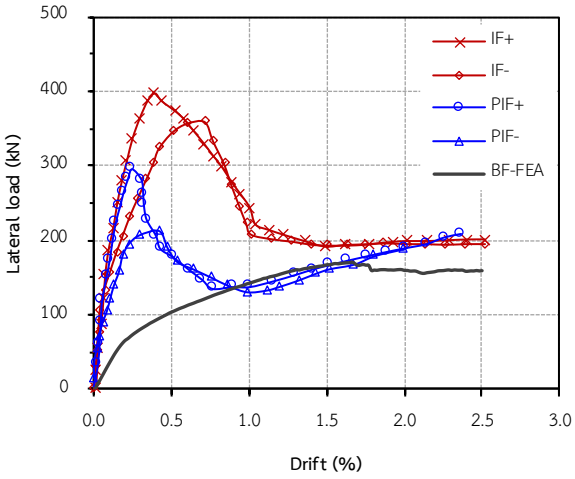
รูปที่ 6 แสดงกำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อแบบแยกส่วน (PIF) โครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อแบบดั้งเดิม (IF) จากผลการทดสอบของ Wararuksajja et al. 2021 [3] ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ และโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อ (BF-FEA) จากการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการเปรียบเทียบพบว่าก่อนที่ผนังอิฐก่อจะเกิดความเสียหายสติฟเนสของ PIF และ IF มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่า BF-FEA มาก เมื่อผนังเกิดการแตกร้าว ทั้งกำลังต้านทานและสติฟเนสของ PIF และ IF ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่กำลังต้านทานสูงสุดของ PIF ต่ำกว่า IF ประมาณร้อยละ 32 เนื่องจากผนังอิฐก่อเกิดรอยแตกร้าวที่รุนแรงก่อน (ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.25%) อย่างไรก็ดีตัวอย่างทดสอบ PIF ยังมีกำลังต้านทานสูงสุดสูงกว่ากำลังต้านทานของ BF-FEA ประมาณร้อยละ 50



รูปที่ 4 ความเสียหายในผนังอิฐก่อของตัวอย่างทดสอบที่การเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ 2.00 %



รูปที่ 5 ความเสียหายในเสาของตัวอย่างทดสอบที่การเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ 2.00 %



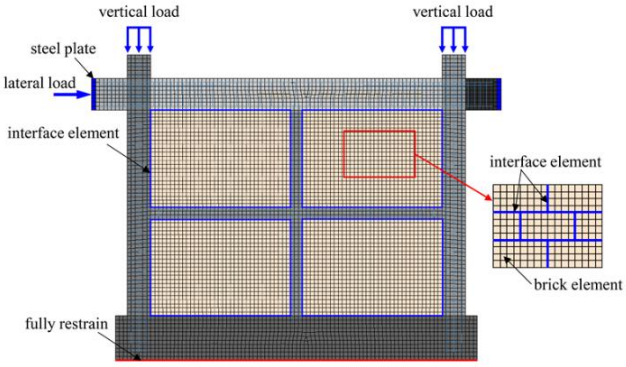
รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงด้านข้างของ PIF IF และ BF-FEA

3. การศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัด ทำให้ไม่สามารถศึกษาพฤติกรรมบางอย่างที่จำเป็น เช่น ความเค้นที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อ และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาของโครงต้านแรงดัด ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองโครงสร้างโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม

3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

เนื่องจากผนังอิฐก่อในประเทศไทยโดยปกติจะมีการฉาบผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูง และมีความหนาอย่างน้อย 1 ซม. ทำให้ผนังมีความสามารถในการต้านทานแรงไม่แตกต่างกันมากในแต่ละทิศทาง ในการศึกษานี้จึงใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของผนังอิฐแบบ 2D-Simplified-Micro Model ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ง่ายและให้ผลการวิเคราะห์ในระดับที่ยอมรับได้ แบบจำลองนี้จะใช้วิธีรวมคุณสมบัติทางกลของอิฐ ปูนก่อและปูนฉาบเข้าด้วยกันในเอลิเมนต์เดียว จากนั้นจะใช้เอลิเมนต์ไร้ความหนา (Interface Element) เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเอลิเมนต์เพื่อจำลองพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างอิฐและปูนก่อ โดยจะใช้เอลิเมนต์ชนิด 8-nodes และ 6-node isoparametric plane stress สำหรับจำลองชิ้นส่วนที่เป็นคอนกรีตและอิฐก่อ 6-nodes interface element สำหรับจำลองรอยต่อระหว่างอิฐแต่ละก้อนและรอยต่อระหว่างผนังอิฐกับโครงต้านแรงดัด และใช้ไลน์เอลิเมนต์ Bonded Embedded Reinforcement สำหรับจำลองเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DIANA FEA [6] คุณสมบัติของวัสดุสำหรับคอนกรีตและผนังอิฐก่อจะใช้แบบจำลอง Isotropic Smeared Crack ชนิด Total Strain Based Crack Model ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมโดยรวมภายหลังการแตกร้าวของวัสดุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดเป็นฟังก์ชันผสมแบบเชิงเส้นกับพาราโบลิค ความเค้นดึงและความเครียดกำหนดให้เป็นฟังก์ชันผสมแบบเชิงเส้นกับเอกซ์โพเนนเชียล ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดข้างต้นสามารถกำหนดโดยใช้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและอิฐก่อ คุณสมบัติบางส่วนสามารถรวบรวมจากผลการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และบางส่วนจะใช้วิธีการประมาณค่าตามวิธีที่แนะนำในมาตรฐาน CEB-FIP [7] และ ACI318-14 [8] และค่าที่แนะนำโดย Lourenco [9] ซึ่งคุณสมบัติทั้งหมดจะทำการสอบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม จุดต่อในผนังอิฐและจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดจะใช้แบบจำลองจุดต่อ (interface) ที่เสนอโดย Lourenco [9] ซึ่งสามารถจำลองการแตกร้าว การเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือน และความเสียหายจากการบดอัด คุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมจะประมาณค่าจากการสอบเทียบด้วยผลการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ เหล็กเสริมในคอนกรีตจะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Menegotto-Pinto โดยจะไม่พิจารณาผลของการเลื่อนหลุดระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต (Bond Slip)

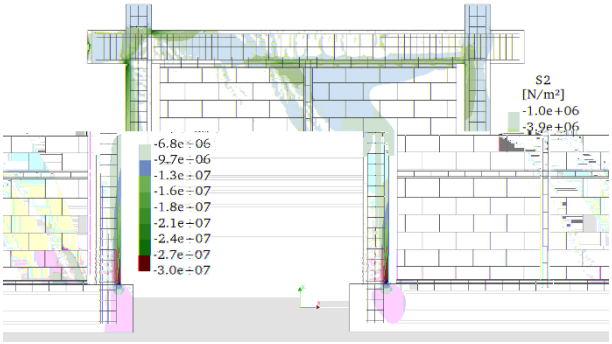


รูปที่ 7 แบบจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

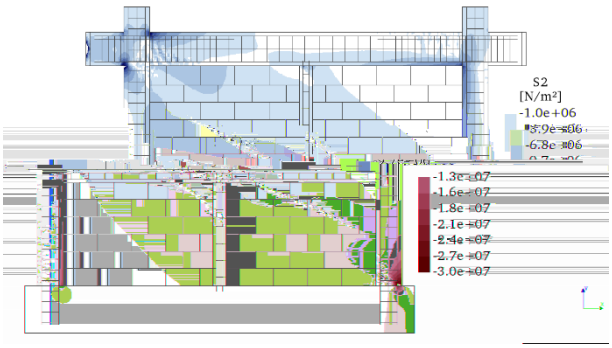
3.2 ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 8 และ 9 แสดงการกระจายตัวของความเค้นอัดหลัก (compressive principal stress) ในผนังอิฐก่อของตัวอย่าง PIF และ IF ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50% และ 1.00% ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50% ตัวอย่าง IF มีรูปแบบการกระจายตัวของความเค้นในแนวทแยงเป็นบริเวณกว้างกว่า PIF มาก เนื่องจากผลกระทบของรอยต่อและความเสียหายในผนังอิฐก่อที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับกำลังต้านทานแรงด้านข้างของทั้งสองตัวอย่างจากผลการทดสอบ กล่าวคือตัวอย่าง IF มีกำลังต้านทานสูงกว่า PIF ประมาณร้อยละ 50 (รูปที่ 6) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มเป็น 1.00% บริเวณที่เกิดความเค้นอัดในผนังอิฐก่อของตัวอย่าง IF ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อ ที่ระยะเคลื่อนตัวดังกล่าวทั้งสองตัวอย่างมีบริเวณที่เกิดความเค้นอัดในผนังอิฐก่อไม่แตกต่างกันมาก สอดคล้องกับกำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบที่แตกต่างกันประมาณร้อยละ 25 (รูปที่ 6) ด้วยกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ลดลง การใช้ผนังที่มีการปรับปรุงรอยต่อผนังที่พัฒนาขึ้น (PIF) จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะของอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวระดับต่ำถึงปานกลาง สำหรับบริเวณที่มีแผ่นดินไหว

รุนแรง แรงที่เกิดขึ้นอาจสูงกว่ากำลังต้านทานของผนังอิฐก่อ ส่งผลให้ผนังอิฐก่อเกิดความเสียหายรุนแรง

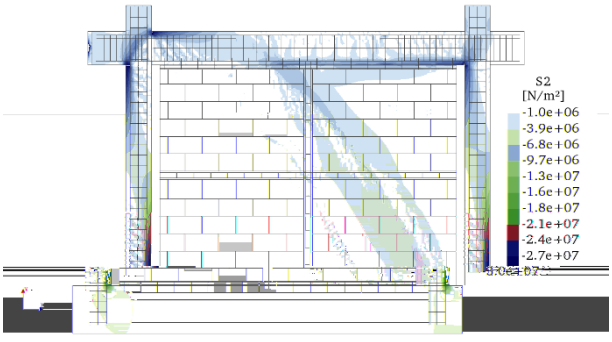


(ก)

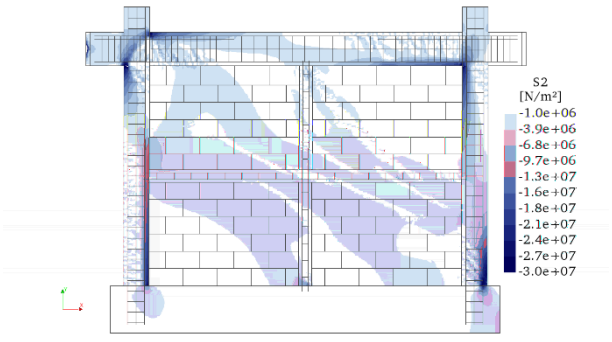


(ข)

รูปที่ 8 ความเค้นอัดในผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50% (ก) PIF และ (ข) IF



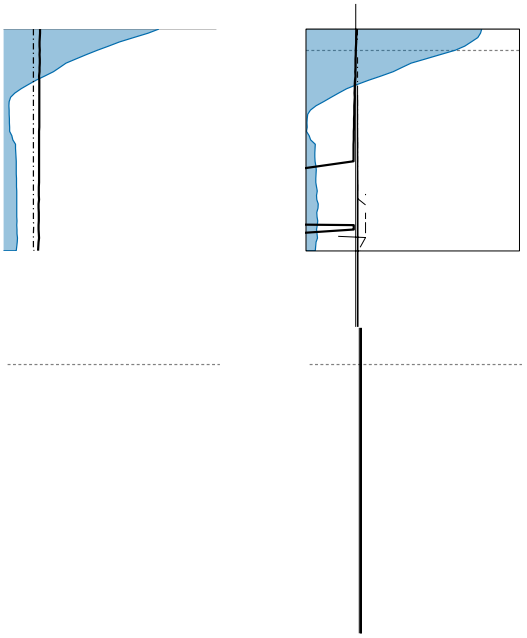
(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ความเค้นอัดในผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00% (ก) PIF และ (ข) IF

รูปที่ 10 แสดงผังแรงเฉือนในเสาต้นซ้ายของ PIF IF และ BF ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.25% 0.50% 1.00% และ 2.00% จากผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีการปรับปรุงรอยต่อผนังอิฐก่อ (PIF) สามารถลดแรงเฉือนในเสาเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์จากผนังลงได้เกือบทั้งหมด โดยแรงเฉือนในเสาสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 1.06 เท่าของโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง (BF) ในขณะที่โครงต้านแรงดัดที่มีผนังแบบเดิม (IF) ที่มีค่าแรงเฉือนในเสาสูงสุดประมาณ 2.6 เท่าของ BF จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าเมื่อผนังอิฐก่อเกิดความเสียหายโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อแบบดั้งเดิมมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการวิบัติของเสาเนื่องจากแรงเฉือน โดยเฉพาะกรณีที่โครงต้านแรงดัดเป็นประเภทที่มีความเหนียวต่ำ เช่น อาคารที่ไม่ได้รับการออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหว การปรับปรุงรอยต่อในผนังอิฐก่อที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความเสี่ยงดังกล่าวลงได้อย่างมาก



รูปที่ 10 ผังแรงเฉือนในเสาต้นซ้ายของ PIF IF และ BF ที่ระยะเคลื่อนตัวต่าง ๆ

4. บทสรุป

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาผลตอบสนองภายใต้แรงแบบวัฏจักรของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อแบบแยกส่วน โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและจำลองโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงรูปแบบรอยต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดให้สามารถส่งถ่ายแรงได้และสามารถควบคุมแรงปฏิสัมพันธ์ของผนังอิฐก่อเพื่อป้องกันการวิบัติของเสาเนื่องจากแรงเฉือน

จากผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างทดสอบที่ได้รับการปรับปรุงรอยต่อของผนังอิฐก่อโดยวิธีที่พัฒนาขึ้น มีกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดลดลงประมาณร้อยละ 32 เมื่อเทียบกับผนังอิฐก่อแบบเดิม แต่ยังมีกำลังต้านทานสูงกว่าโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อประมาณร้อยละ 50 อย่างไรก็ดี วิธีการปรับปรุงรอยต่อผนังอิฐก่อดังกล่าวสามารถลดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ของผนังอิฐก่อลงได้เกือบทั้งหมด โดยมีค่าแรง

เฉือนในเสาสูงสุดประมาณ 1.06 เท่าของโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อ ในขณะที่โครงต้านแรงดัดที่มีผนังแบบดั้งเดิมมีค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาสูงถึง 2.6 เท่าของโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อ เนื่องจากกำลังต้านทานแรงโดยรวมของโครงสร้างที่ลดลง วิธีการปรับปรุงรอยต่อผนังอิฐก่อที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะของอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวระดับต่ำถึงปานกลางมากกว่าการนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวรุนแรง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผ่านทางศูนย์วิจัยแผ่นดินไหว (EARTH)

เอกสารอ้างอิง

[1] Lukkunaprasit P, Ruangrassamee A, Boonyatee T, Chintanapakdee C., Jankaew K, Thanasisathit N, Chandrangsu T. 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. 2016;20(2):219-242.

[2] Wararuksajja W, Srechai J, Leelataviwat S. Seismic design of RC moment-resisting frames with concrete block infill walls considering local infill-frame interactions. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(14): 6445–6474 doi:10.1007/s10518-020-00942-9

[3] Wararuksajja W, Srechai J, Leelataviwat S, Sungkamongkol T, Limkatanyu S. Seismic design method for preventing column shear failure in reinforced concrete frames with infill walls. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102963 doi:10.1016/j.jobe.2021.102963

[4] Srechai J, Lukkunaprasit P. An innovative scheme for retrofitting masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2013, 6(4): 277–289 doi:10.1080/19373260.2013.821716

[5] Department of Public Works and Town & Country Planning. Specification for seismic design of structural buildings (DPT.1301/1302-61). 2018. (in Thai)

[6] DIANA FEA BV. DIANA Finite element analysis user manual. Delftechpark 19a, 2628 XJ; The Netherlands: 2019.

[7] CEB-FIP. fib Model Code for Concrete Structures. KGaA, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co; 2010.

[8] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-14)., Farmington Hills, United States: ACI; 2014.

[9] Lourenco PB. Computational strategies for masonry structures [dissertation]. Universidade do Porto; 1996.