

## การปรับปรุงสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยการแยกผนังออกจากเสา

จรัญ ศรีชัย<sup>1</sup> สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์<sup>2</sup> อานนท์ วงษ์แก้ว<sup>3</sup> และ ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์<sup>4</sup>

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้จะนำเสนอผลการทดสอบสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อหลังการปรับปรุงโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบย่อขนาด โดยมีขนาด 3/4 เท่าของโครงสร้างจริง กว้าง 1 ช่วงเสา สูง 1 ชั้น ในการทดสอบจะให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบวิฎจักรร่วมกับแรงกระทำในแนวตั้งที่มีขนาดคงที่ โดยทำการทดสอบจำนวน 1 ตัวอย่างและเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่ผ่านมา การปรับปรุงโครงสร้างในงานวิจัยนี้ทำโดยการแยกผนังอิฐก่อออกจากเสาของโครงอาคารโดยลดความกว้างของผนังอิฐก่อลง และใช้หูช้างเหล็กในการถ่ายแรงจากผนังอิฐก่อเข้าสู่คานของโครงอาคารเพื่อไม่ให้แรงจากผนังอิฐก่อถ่ายเข้าสู่เสาของโครงอาคารดั้งเดิม จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการปรับปรุงโครงสร้างที่ใช้ สามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างได้อย่างมาก โดยตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างโดยรวม และระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่ระดับสมรรถนะต่างๆ เพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ที่สำคัญการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีข้างต้นสามารถป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือนที่อาจจะเกิดขึ้นในเสาเนื่องจากผนังอิฐก่อ ในการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีที่เสนอ ขนาดความกว้างของผนังอิฐก่อมีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงด้านข้างของโครงอาคาร จากผลการวิเคราะห์พบว่ากำลังต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อจะลดลงเมื่อความกว้างของผนังน้อยลง แต่โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการจะปรับปรุงโครงสร้างโดยวิธีการนี้จึงจำเป็นต้องมีการประเมินสมรรถนะของโครงอาคารเดิมก่อนเพื่อจะได้ทำการเลือกขนาดความกว้างของผนังอย่างเหมาะสม

**คำสำคัญ:** โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, ผนังอิฐก่อ, การทดสอบภายใต้แรงแบบวิฎจักร, ระดับสมรรถนะของโครงสร้าง

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>4</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

\* ผู้ติดต่อประสานงาน โทร. 08-1742-0871 อีเมล: jarun.sre@gmail.com



## Seismic Enhancement of Masonry-Infilled Non-ductile Reinforced Concrete Frames by Separating Wall from Columns

Jarun Srechai<sup>1\*</sup> Sutat Leelataviwat<sup>2</sup> Arnon Wongkaew<sup>3</sup> and Panitan Lukkunaprasit<sup>4</sup>

### Abstract

An experimental study on the structural performance of a retrofitted masonry-infilled non-ductile reinforced concrete (RC) frame is presented. One  $\frac{3}{4}$  scaled model of a single bay, single story, non-ductile RC frame with masonry infill wall was tested under lateral cyclic loading and constant vertical load. The masonry infill wall was detached from the columns and steel brackets were used to transfer the forces from the wall to the beams, thereby totally eliminating the transfer of large infill strut force to the columns. The retrofitting scheme utilized greatly enhanced the performance of the frame by increasing the overall capacity and story drifts at different performance levels approximately 6 times compared to those of the non-retrofitted specimen. Moreover, severe shear damage in the columns was totally eliminated. For this retrofitting method, the width of the infilled panel had a significant effect on the behavior and load resistance capacity of the frame. The analytical result showed that the lateral strength of the masonry wall decreased and the bending moment in the RC beam increased, when the width of the wall was reduced. Therefore, the strength of the surrounding frames must be investigated prior to properly select the width of the infill panel.

**Keywords:** Reinforced Concrete Frames, Masonry Wall, Cyclic Test, Structural Performance Level

<sup>1</sup> Doctoral Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

<sup>4</sup> Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

\* Corresponding Author Tel. 08-1742-0871 E-mail: jarun.sre@gmail.com

## 1. บทนำ

โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ เป็นระบบโครงสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะในอาคารขนาดเล็กหรือปานกลาง โดยปกติในขั้นตอนของการออกแบบโครงสร้างของอาคารเหล่านั้น วิศวกรจะไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของผนังอิฐก่อที่มีต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง เนื่องจากการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาผลกระทบของผนังอิฐก่อนั้นยังมีความซับซ้อนไม่สะดวกในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาวิจัยรวมถึงการสำรวจความเสียหายของอาคารจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวต่างๆ ที่ผ่านมาพบว่า ในกรณีที่มีการก่อสร้างที่เหมาะสม ผนังอิฐก่อสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงทางด้านข้าง สติฟเนสและความสามารถในการสลายพลังงานให้กับโครงสร้างได้อย่างมาก [1-4] ในทางกลับกันผนังอิฐก่อก็สามารถส่งผลให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) ในเสาหรือจุดต่อระหว่างเสากับคานของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ซึ่งการวิบัติในแบบดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของอาคารที่มีค่าน้อย โดยเฉพาะเมื่อเกิดในโครงอาคารที่มีลักษณะเป็นโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทที่มีความเหนียวต่ำ (non-ductile RC frame) [5-6] การวิบัติดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงปริมาณมากถูกต้านทานโดยผนังอิฐก่อ เมื่อค่าความเค้นในผนังอิฐก่อบริเวณมุมของผนังมีค่าสูงถึงจุดที่ทำให้ผนังอิฐก่อบริเวณมุมเกิดความเสียหายหรือแตกหลุดออก ผนังอิฐก่อส่วนที่ไม่ได้เกิดความเสียหายอาจจะไปค้ำยันเสา ก่อให้เกิดพฤติกรรมแบบเสาสั้นซึ่งอาจนำไปสู่การวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสาหรือจุดต่อเสากับคาน การวิบัติในลักษณะนี้สามารถพบได้ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริง เช่นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในประเทศพม่า ขนาด  $M_w 6.9$  เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 ได้ก่อให้เกิดความเสียหายกับอาคารในพื้นที่จังหวัดเชียงราย [7] และจากการสำรวจความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในอำเภอพาน จังหวัดเชียงรายเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2014 ซึ่งแผ่นดินไหวดังกล่าวมีขนาด  $M_w 6.3$  แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของ

ผนังอิฐก่อที่มีต่อโครงสร้างอย่างชัดเจนทั้งในด้านดีและไม่ดี ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมาก [6, 8-13] พยายามศึกษาวิธีการเพิ่มความเหนียว (ductility) ให้กับผนังอิฐก่อโดยการเสริมด้วยวัสดุชนิดต่างๆ เช่น การเสริมเหล็กตะแกรงในชั้นปูนฉาบ หรือการใช้วัสดุประเภท Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) เสริมที่ผิวนอกของผนังอิฐก่อ เมื่อใช้วิธีการดังกล่าวทำให้ตัวอย่างทดสอบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยมีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้วิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มสมรรถนะให้กับตัวอย่างทดสอบได้แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้มีราคาค่อนข้างสูงและขั้นตอนการติดตั้งวัสดุดังกล่าวมีความซับซ้อนต้องอาศัยความชำนาญของผู้ติดตั้ง อีกทั้งวิธีการปรับปรุงโครงสร้างในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังไม่สามารถแก้ไขปัญหการวิบัติของเสาและบริเวณจุดต่อระหว่างเสากับคานเนื่องจากแรงที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังกับโครงอาคาร

จากเหตุผลดังกล่าว Srechai and Lukkunaprasit [7] ได้เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยการแยกผนังออกจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและปรับปรุงวิธีการถ่ายแรงจากผนังไปสู่โครงอาคาร ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าสามารถปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างให้ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยพบว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง (เรียกว่าตัวอย่าง MIRCFO1) เมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างทดสอบจะเกิดการแตกร้าวของผนังอิฐก่อบริเวณมุมที่รับแรงอัดและมีปูนฉาบหลุดร่อนออกมา โดยสามารถสังเกตเห็นการแตกร้าวนี้ได้ตั้งแต่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเพียงร้อยละ 0.25 ของความสูง ที่ตำแหน่งระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเดียวกันสามารถเห็นรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear crack) ในเสา ซึ่งรอยร้าวดังกล่าวมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อผนังอิฐก่อบริเวณมุมที่รับแรงอัดมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับร้อยละ 0.33 ของความสูง และกำลังต้านทานแรงทางด้านข้าง

ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนการทดสอบตัวอย่างที่มีการปรับปรุงโครงสร้าง (เรียกว่าตัวอย่าง MIRCFO2) พบว่าโครงอาคารมีสมรรถนะที่ดีขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับร้อยละ 1.25 ของความสูงและกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ กำลังต้านทานแรงทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบลดลงร้อยละ 20 ของกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างร้อยละ 1.5 ของความสูง ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าเดียวกันนี้ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างถึง 5 เท่า ทั้งนี้ไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนในเสาและจุดต่อเสากับคาน แม้ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสูงถึงร้อยละ 2.0 ของความสูง ก็จะมีเพียงการแตกร้าวในแนวทแยงขนาดใหญ่หลายรอยในผนังอิฐก่อ แต่ในส่วนของเสามีเพียงการแตกร้าวอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัด (flexural crack) และรอยแตกร้าวขนาดเล็กอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือน (flexural-shear crack) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO1 [7]



รูปที่ 2 ลักษณะความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO2 [7]

จะเห็นได้ว่าวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อที่เสนอโดย Srechai and Lukkunaprasit เป็นวิธีที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของบทความนี้จะเป็นการนำเสนอผลการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับเทคนิคการปรับปรุงสมรรถนะโครงอาคารดังกล่าวโดยใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการและพิจารณาถึงผลกระทบของขนาดความกว้างของผนังอิฐก่อต่อพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ

## 2. พฤติกรรมของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อที่พบในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงราย

จากเห็นการณ์แผ่นดินไหวขนาด  $M_w 6.3$  ซึ่งมีจุดศูนย์กลางอยู่ในอำเภอพาน จังหวัดเชียงรายเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2014 นั้นได้ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อาคารบ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้างจำนวนมาก แผ่นดินไหวครั้งนี้นับเป็นแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดครั้งหนึ่งที่เคยเกิดขึ้นในประเทศไทย ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของอาคารที่ก่อสร้างในประเทศภายใต้แผ่นดินไหวจริงได้ รวมถึงพฤติกรรมของโครงอาคารที่มีผนังอิฐก่อ จากการลงพื้นที่เพื่อสำรวจความเสียหายของอาคารเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าว พบว่าโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อหลายๆ อาคารมีความเสียหายของโครงสร้างน้อยกว่าอาคารที่ไม่มีผนังอิฐก่อ เช่นกรณีของอาคารเรียนขนาดความสูง 3 ชั้น ในอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย โรงเรียนดังกล่าวมีอาคารเรียนในลักษณะเดียวกันจำนวน 3 หลัง ซึ่งมีอาคารเรียนจำนวน 1 หลังที่ชั้นล่างมีลักษณะเปิดโล่ง

ในขณะที่อาคารเรียนอีกสองหลังมีผนังอิฐก่อในชั้นล่างของอาคารซึ่งใช้กันเป็นห้องเรียน (รูปที่ 3) จากการสำรวจความเสียหายพบว่าอาคารเรียนหลังที่ชั้นล่างมีลักษณะเปิดโล่ง ในขณะที่ชั้นสองและสามมีผนังอิฐก่อนั้นเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของอาคารในระดับที่รุนแรงกว่าเมื่อเทียบกับอาคารที่มีผนังอิฐก่อในชั้นล่างโดยมีรอยแตกกว้างขนาดใหญ่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างและมีการหลุดร่อนของคอนกรีตจนมองเห็นเหล็กเสริมตั้งแสดงในรูปที่ 3 ความเสียหายเกิดขึ้นเนื่องจากอาคารดังกล่าวมีลักษณะของความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งคือชั้นล่างของอาคารมีสติฟเนสทางด้านข้างที่น้อยกว่าชั้นอื่นๆ มาก (soft story) ในขณะที่อาคารที่มีผนังอิฐก่อในชั้นล่าง (อาคารที่อยู่ติดกัน) เกิดความเสียหายน้อยมากโดยมีเฉพาะรอยแตกกว้างขนาดเล็กในผนังอิฐก่อและเสาแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของผนังอิฐก่อในการช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแผ่นดินไหวให้กับโครงสร้างในกรณีที่มีปริมาณผนังอิฐก่อมากเพียงพอ และยังช่วยลดลักษณะของความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งของโครงสร้างอีกด้วย



รูปที่ 3 อาคารเรียนที่เกิดความเสียหาย

อย่างไรก็ตามในบางกรณีผนังอิฐก่อก็อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง เช่น กรณีของอาคารเรียนขนาดความสูง 4 ชั้น ในบริเวณอำเภอพานเช่นเดียวกับอาคารตัวอย่างที่แล้ว และมีลักษณะชั้นล่าง

เปิดโล่งเช่นกัน อาคารนี้มีโถงบันไดอยู่ทางด้านซ้ายและมีผนังอิฐก่ออยู่ด้านริมขวาสุดของอาคารชั้นล่าง (รูปที่ 4) เนื่องจากอาคารมีลักษณะเป็นชั้นล่างอ่อนและความไม่สมมาตรของอาคาร ทำให้อาคารเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมากในบริเวณชั้นล่างทางด้านขวา ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายในส่วนนี้มากกว่าส่วนอื่นของอาคาร โดยเฉพาะโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ริมขวาสุดซึ่งมีผนังอิฐก่อ มีรอยแตกกว้างขนาดใหญ่อันเนื่องมาจากแรงเฉือนในบริเวณจุดต่อเสากับคานดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งลักษณะการวิบัติดังกล่าวอาจนำไปสู่การพังถล่มของอาคารได้ ในกรณีที่ความเสียหายที่เกิดขึ้น ส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของเสา จากข้อสังเกตข้างต้น จะเห็นได้ว่า เราอาจสามารถใช้ประโยชน์จากผนังอิฐก่อในการต้านทานแผ่นดินไหวได้ แต่ทั้งนี้จะต้องมีการปรับปรุงและใช้รายละเอียดที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติในรูปแบบที่ไม่พึงประสงค์ขึ้น

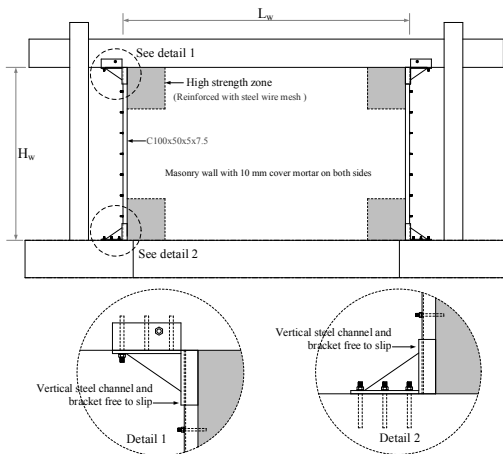


รูปที่ 4 ลักษณะความเสียหายของอาคารที่มีผนังอิฐก่อ

### 3. วิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผนังอิฐก่อสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงทางด้านข้าง สติฟเนสและความสามารถในการสลายพลังงานให้กับโครงสร้างได้อย่างมาก แต่การจะใช้ประโยชน์จากผนังอิฐก่อในการต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวนั้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันการวิบัติที่อาจเกิดขึ้น

โดยเฉพาะลักษณะการวิบัติแบบเปราะเนื่องจากแรงเฉือนในเสาและจุดต่อเสากับคาน ที่สามารถพบได้บ่อยในโครงสร้างประเภทนี้ Srechai and Lukkunaprasit [7] ได้เสนอวิธีการปรับปรุงโครงสร้างโดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 5 ในวิธีการนี้ผนังอิฐก่อจะถูกแยกออกจากเสาเพื่อป้องกันการถ่ายแรงจากผนังเข้าสู่เสา และใช้หูช้างเหล็ก (steel bracket) ในการถ่ายแรงจากผนังอิฐก่อไปสู่คานโดยตรง การทำเช่นนี้จะสามารถลดแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาเนื่องจากการถ่ายแรงจากผนังอิฐก่อได้ และเนื่องจากอิฐก่อเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงต่ำ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้จุดต่อระหว่างหูช้างเหล็กและผนังอิฐก่อส่งถ่ายได้เฉพาะแรงอัด ทั้งนี้เพื่อลดแรงเค้นดึงที่อาจจะเกิดขึ้นในผนังอิฐก่อ นอกจากนี้ในบริเวณมุมทั้งสี่ของผนังอิฐก่อ จะมีการเสริมด้วยเหล็กตะแกรงและฉาบทับด้วยปูนฉาบกำลังอัดสูง โดยมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อผนังอิฐก่อ (reinforcement ratio) เท่ากับร้อยละ 0.29 และจะใช้เหล็กรูปพรรณขนาด C100 x 50 x 5 x 7.5 เสริมบริเวณขอบของผนังอิฐก่อในแนวตั้งทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันผนังอิฐก่อวิบัติด้วยแรงเฉือนในแนวราบ (sliding shear failure)



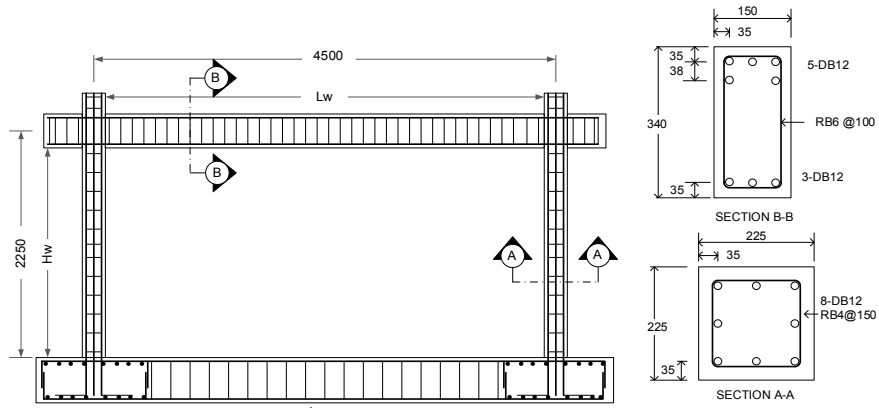
รูปที่ 5 วิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ [7]

#### 4. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบโครงอาคาร

คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อแบบย่อขนาด โดยใช้ขนาด 3/4 เท่าของขนาดโครงสร้างจริงจำนวน 1 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีความกว้าง 1 ช่วงเสา และสูง 1 ชั้น ซึ่งเป็นโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อที่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้างโดยวิธีการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของผนังอิฐก่อมีค่าเท่ากับ 1.0 โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบมีลักษณะและคุณสมบัติเช่นเดียวกับโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบของ Srechai and Lukkunaprasit [7] ดังแสดงในรูปที่ 6 คือเป็นโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทที่มีความเหนียวต่ำ (non-ductile RC frame) ซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างที่ใช้กันทั่วไปในประเทศไทยที่ไม่ได้มีการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว อีกทั้งมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในเสาในปริมาณที่น้อย ในส่วนของผนังจะเป็นผนังอิฐก่อที่ใช้อิฐมอญและฉาบทั้งสองด้านด้วยปูนฉาบที่มีความหนา 10 มม. โดยที่ผนังมีความหนารวมเท่ากับ 70 มม. ผนังอิฐก่อมีคานทับหลังที่แนวกึ่งกลางของผนัง รูปที่ 7 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

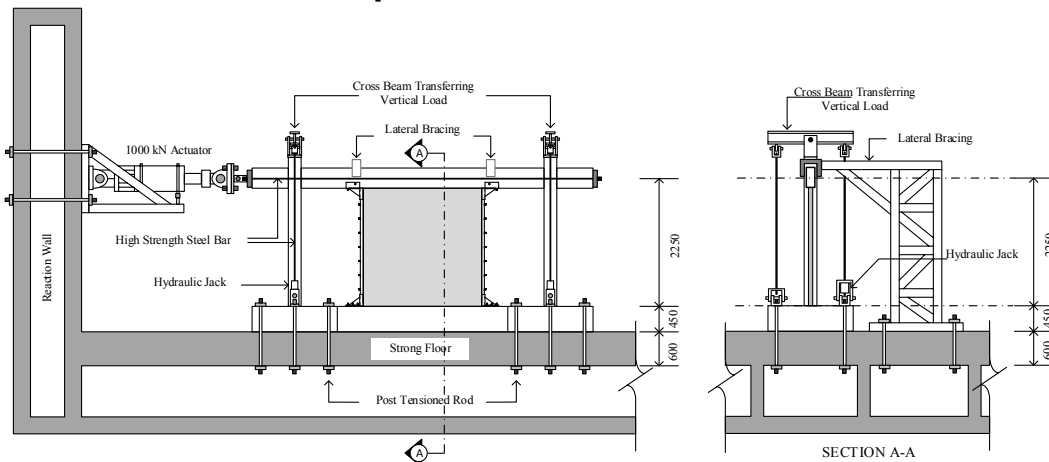
การทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้จะทดสอบโดยการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบเป็นสองส่วนคือ แรงที่กระทำในแนวตั้งและแรงที่กระทำในแนวราบ โดยมีวิธีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 แรงในแนวตั้งจะกำหนดให้กระทำที่ปลายเสาทั้งสองของตัวอย่างทดสอบและแรงดังกล่าวจะถูกควบคุมให้มีขนาดคงที่ตลอดการทดสอบ โดยแรงในแนวตั้งนี้ใช้จำลองน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ในส่วนของแรงในแนวราบใช้เพื่อจำลองแรงแผ่นดินไหวที่มากระทำต่อโครงอาคาร โดยจะให้แรงแบบวัฏจักร (cyclic loading) ที่ใช้ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเป็นเกณฑ์ (displacement control) โดยมีรูปแบบการให้แรงดังแสดงในรูปที่ 9



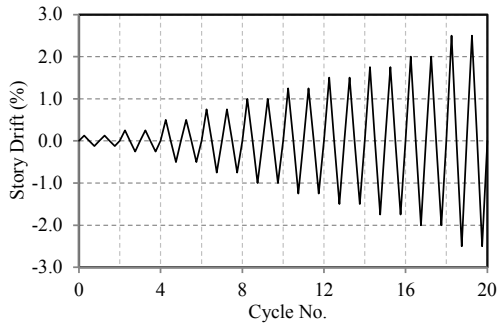
รูปที่ 6 โครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



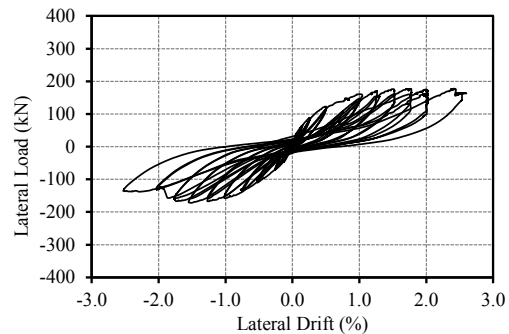
รูปที่ 7 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 8 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 9 รูปแบบของแรงทางด้านข้างที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ

## 5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 5.1 ความสามารถในการต้านทานแรงทาง

#### ด้านข้างและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

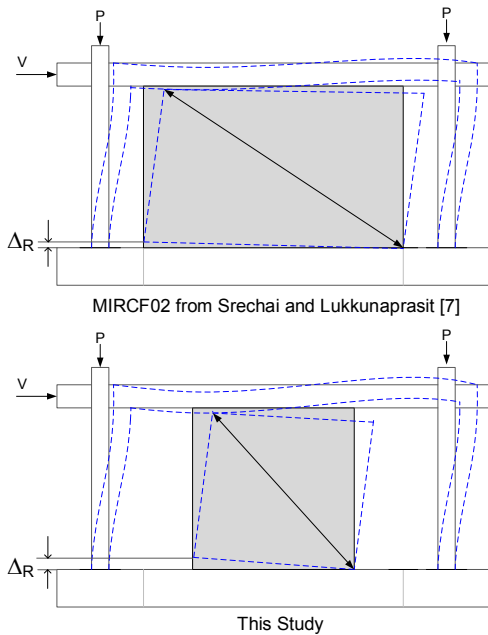
ในระหว่างการทดสอบ พบรอยแยกระหว่างผนังอิฐก่อและฐานรากเกิดขึ้นตั้งแต่ในรอบแรกของการให้แรง และมีความกว้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้น ที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างร้อยละ 0.75 ของความสูง เกิดรอยร้าวขนาดเล็กเนื่องจากโมเมนต์ดัดขึ้นในเสา เมื่อให้แรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้นจนตัวอย่างทดสอบมีระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเท่ากับร้อยละ 1.0 ของความสูง มีรอยแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือนเกิดขึ้นในคานใกล้กับหูช้างเหล็ก และมีรอยแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือนเกิดขึ้นในเสาและจุดต่อเสากับคาน กำลังต้านทานแรงทางด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดของตัวอย่างทดสอบนี้มีค่าเท่ากับ 173 กิโลนิวตัน ที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเท่ากับร้อยละ 1.50 ของความสูง (รูปที่ 10) หลังจากนั้น กำลังต้านทานแรงทางด้านข้างค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ โดยกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างจะลดลงเหลือร้อยละ 80 ของกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างสูงสุด ที่ระยะการเคลื่อนตัวร้อยละ 1.75 ของความสูง ที่ระยะการเคลื่อนตัวเดียวกันนี้คอนกรีตในเสาบริเวณใกล้กับจุดต่อเสากับคานมีการหลุดร่อนออกเล็กน้อย

เมื่อระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเพิ่มถึงร้อยละ 2.0 ของความสูง เกิดการแตกร้าวในแนวทแยงขึ้นในผนังอิฐก่อดังแสดงในรูปที่ 11 อย่างไรก็ตามที่ระยะการเคลื่อนตัวเดียวกันนี้ผนังอิฐก่อของตัวอย่างทดสอบ มีความเสียหายน้อยมากเมื่อเทียบกับผนังอิฐก่อของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO2 จากการศึกษาวิจัยของ Srechai and Lukkunaprasit [7] เนื่องจากเมื่อโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ผนังอิฐก่อของตัวอย่างทดสอบทั้งสองมีลักษณะการเสียหายที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 12 ในการศึกษาวิจัยนี้ ผนังอิฐก่อจะมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในลักษณะการโยกตัว (rocking motion) ซึ่งต่างจากผนังอิฐก่อที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงมาก เช่นผนังของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO2 ของ Srechai and Lukkunaprasit ที่มีลักษณะการเสียหายแบบเฉือนเป็นหลักและมีการเคลื่อนตัวในลักษณะการโยกตัวเพียงเล็กน้อย โดยพบว่าการโยกตัวของผนังอิฐก่อของตัวอย่างทดสอบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีระยะในแนวตั้งของช่องว่างระหว่างมุมของผนังและฐานราก ( $\Delta_R$ ) ที่วัดได้สูงสุดที่ 30 มม. ในขณะที่การโยกตัวของผนังอิฐก่อของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO2 วัดได้สูงสุดเพียง 6 มม.





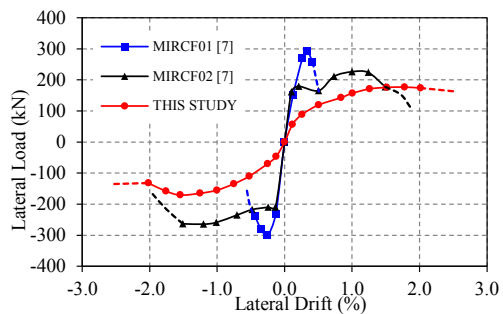
รูปที่ 11 ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างร้อยละ 2 ของความสูง



รูปที่ 12 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบโดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบของ Srechai and Lukkunaprasit [7] จากผลการทดสอบแสดงว่าตัวอย่างทดสอบ ที่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้างโดยวิธีการที่นำเสนอไปข้างต้นทั้ง

สองตัวอย่าง มีสมรรถนะในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่ดีกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง (MIRCF01) แม้ว่ากำลังต้านทานแรงทางด้านข้างสูงสุดของ ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ จะลดลงเหลือร้อยละ 60 ของตัวอย่างทดสอบ MIRCF01 อีกทั้งสติฟเนสทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้จะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 30 ของตัวอย่างทดสอบ MIRCF01 แต่ตัวอย่างทดสอบ ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (story drift capacity) สูงกว่าของตัวอย่าง MIRCF01 ถึงกว่า 6 เท่า นอกจากนั้นการใช้ผนังที่มีความกว้างน้อยนั้น อาจเป็นประโยชน์สำหรับนำไปใช้ในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างที่ก่อสร้างไว้แล้ว โดยเฉพาะกรณีที่มีข้อจำกัดในด้านความแข็งแรงของโครงสร้างเดิม เช่น ฐานรากหรือคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังต้านทานแรงได้น้อยเป็นต้น เนื่องจากขนาดความกว้างของผนังอิฐก้อนนั้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของโครงสร้างและแรงภายในที่เกิดขึ้นในคานของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



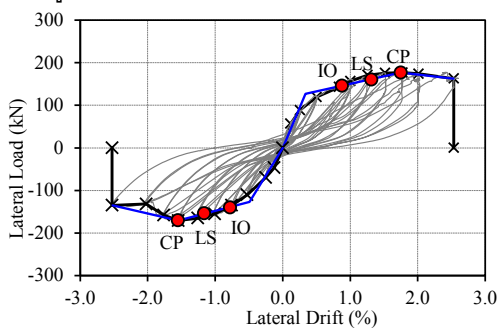
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่มีและไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง

### 5.2 ระดับสมรรถนะของตัวอย่างทดสอบ

เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวก็จะเกิดความเสียหายขึ้นในระดับที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างเหล่านั้น การกำหนดระดับสมรรถนะในการต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวของโครงสร้าง มีความสำคัญสำหรับนำไปใช้กับการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวระดับต่างๆ ที่สนใจ ระดับสมรรถนะของโครงสร้างผนังอิฐก้อนที่มีการปรับปรุงแก้ไขแล้วตามวิธีที่

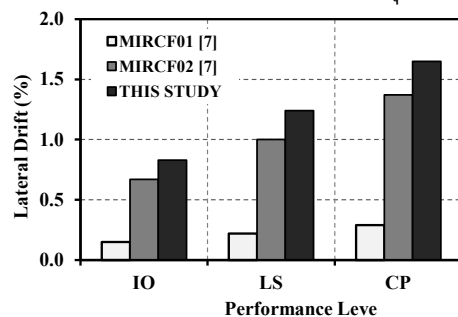


เสนอในบทความนี้ สามารถกำหนดได้จากผลการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบ ด้วยวิธีการที่แนะนำในมาตรฐาน ASCE41-06 [14] ซึ่งสามารถหาระดับสมรรถนะของ ตัวอย่างทดสอบโดยการสร้างเส้นขอบนอกของความ สัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (backbone curve) ของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นจึง กำหนดระดับสมรรถนะของตัวอย่างทดสอบ ให้สอดคล้อง กับระดับความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้น โดยจะ กำหนดให้จุดที่กำลังต้านทานแรงทางด้านข้างเริ่มลดลง เป็นระดับสมรรถนะที่เรียกว่า ระดับการป้องกันการ พังทลายโดยสิ้นเชิงหรือ Collapse Prevention Performance Level (CP) จากนั้นกำหนดให้จุดที่ตัวอย่าง ทดสอบมีระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเท่ากับ 3/4 เท่า ของระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุด CP เป็นระดับ สมรรถนะที่เรียกว่า ระดับความปลอดภัยต่อชีวิตหรือ Life Safety Performance Level (LS) สุดท้ายคือกำหนด ให้จุดที่ตัวอย่างทดสอบมีระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เท่ากับ 2/3 เท่าของระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุด LS เป็นระดับสมรรถนะที่โครงสร้างมีความเสียหายน้อย สามารถเข้าใช้งานได้ทันทีที่เรียกว่า ระดับเข้าใช้อาคารได้ ทันที หรือ Immediate Occupancy Performance Level (IO) รูปที่ 14 แสดงระดับสมรรถนะในการต้านทาน แผ่นดินไหวของตัวอย่างทดสอบตามเกณฑ์กำหนดระดับ สมรรถนะข้างต้น จากรูปจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างทดสอบใน การศึกษาวิจัยนี้มีระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ระดับ สมรรถนะ LS และ CP เท่ากับร้อยละ 1.24 และ 1.65 ของ ความสูงตามลำดับ



รูปที่ 14 ระดับสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหว ของตัวอย่างทดสอบ

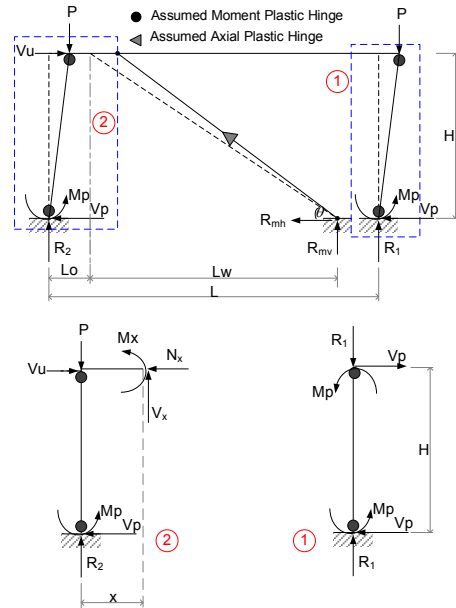
รูปที่15 แสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนตัวด้าน ข้างของตัวอย่างทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้กับตัวอย่าง ทดสอบของ Srechai and Lukkunaprasit [7] ตัวอย่าง ทดสอบโครงอาคารที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง (MIRCF01) มีระดับสมรรถนะที่ LS และ CP ที่ระยะ เคลื่อนตัวทางด้านข้างเท่ากับร้อยละ 0.22 และ 0.29 ของ ความสูงตามลำดับ ในขณะที่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้าน ข้างที่ระดับสมรรถนะ LS และ CP ของตัวอย่างทดสอบที่ ได้รับการปรับปรุง (MIRCF02) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.00 และ 1.37 ของความสูงตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.5 เท่า ของค่าจากตัวอย่าง MIRCF01 ในกรณีของตัวอย่าง ทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้มีระยะการเคลื่อนตัวทางด้าน ข้างที่ระดับสมรรถนะ LS และ CP เท่ากับ 5.6 เท่าของค่า จากตัวอย่างทดสอบ MIRCF01 ในการออกแบบโครงสร้าง เพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้นถือว่าโครงสร้างที่สามารถ เคลื่อนตัวทางด้านข้างได้มากโดยที่โครงสร้างเกิดความ เสียหายน้อยและยังคงความสามารถในการต้านทานแรง ทางด้านข้างส่วนใหญ่ไว้ได้นั้น มีสมรรถนะที่ดีกว่า โครงสร้างที่มีระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างน้อยแต่ โครงสร้างเกิดความเสียหายรุนแรง จากการทดสอบเห็น ได้ชัดว่าตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้มีระยะเคลื่อนตัว ด้านข้างมากถึงร้อยละ 2.5 ของความสูงและมีความเสียหาย เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่มีการปรับปรุง โครงสร้าง MIRCF01 นั้นมีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเพียง ร้อยละ 0.5 ของความสูงก็เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนของ เสาคอนกรีต ดังนั้นตัวอย่างทดสอบที่มีการปรับปรุงโครง สร้างจึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ต้านทานแผ่นดิน ไหวมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง



รูปที่ 15 ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ ที่ระดับสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหว ต่างๆ

### 5.3 ผลกระทบของขนาดความกว้างของผนังอิฐ ก่อต่อแรงภายในของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากผลการทดสอบข้างต้น จะเห็นว่าขนาดความกว้างของผนังอิฐก่อนั้นส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงต้านข้างของโครงสร้าง รวมไปถึงแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่จะเกิดขึ้นในคานของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผลกระทบดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบปรับปรุงลักษณะโครงสร้างให้มีความเหมาะสม ผลกระทบของขนาดความกว้างของผนังที่มีต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถศึกษาได้ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อที่มีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง ( $L_w/H_w$ ) แตกต่างกันไป สำหรับในการศึกษานี้จะกำหนดอัตราส่วน  $L_w/H_w$  เท่ากับ 1.0 1.2 1.4 และ 1.6 สำหรับผนังที่อัตราส่วน  $L_w/H_w$  แต่ละค่าสามารถคำนวณแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่จะเกิดขึ้นในคาน ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบพลาสติก (plastic analysis) โดยการกำหนดให้กลไกการวิบัติของโครงอาคารที่มีการปรับปรุงโครงสร้างแล้วนั้นมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 16 โดยรูปแบบการวิบัติดังกล่าวนั้นถูกกำหนดให้มีความสอดคล้องกับความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจริงในตัวอย่างทดสอบ กล่าวคือความเสียหายที่พบจะอยู่ในเสาและผนังอิฐก่อเป็นหลัก โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะได้รับความเสียหายมากที่สุดที่ปลายเสาด้านบนและด้านล่าง ในขณะที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นได้รับความเสียหายเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการวิเคราะห์จะมีสมมุติฐานคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็กยังคงมีพฤติกรรมที่อยู่ในช่วงอีลาสติก และการเสียรูปแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นเฉพาะที่จุดหมุนพลาสติกซึ่งอยู่ที่ปลายทั้งสองของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งดังกล่าวเท่ากับค่าพลาสติกโมเมนต์ของเสา ส่วนผนังอิฐก่อสามารถจำลองได้ด้วยชิ้นส่วนรับแรงอัดเทียบเท่า (equivalent diagonal strut) และกำหนดให้การเสียรูปแบบพลาสติกเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของชิ้นส่วนโดยมีกำลังต้านทานแรงในแนวแกนสูงสุดเท่ากับกำลังต้านทานแรงของผนังอิฐก่อ ซึ่งสามารถคำนวณกำลังได้ตามวิธีที่กำหนดในมาตรฐาน FEMA 306 [15]



รูปที่ 16 กลไกการวิบัติของโครงอาคารที่มีการปรับปรุง  
โครงสร้างตามสมมุติฐาน

การวิเคราะห์จะเริ่มจากการคำนวณกำลังต้านทานแรงของผนังอิฐก่อ ด้วยวิธีตามที่กำหนดในมาตรฐาน FEMA 306 ตารางที่ 1 แสดงกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อ ( $R_m$ ) ค่าส่วนประกอบของแรงในแนวราบ ( $R_{mh}$ ) และส่วนประกอบของแรงในแนวตั้ง ( $R_{mv}$ ) ของกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อ จากตารางจะพบว่า ค่า  $R_m$  และ  $R_{mh}$  จะมีค่าเปลี่ยนไปตามขนาดความกว้างต่อความสูง โดยจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดความกว้างต่อความสูงมีค่าลดลง ส่วนค่า  $R_{mv}$  จะมีค่าเกือบคงที่ในทุกๆ ความกว้างของผนังอิฐก่อ ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่กำลังรับแรง  $R_m$  มีค่าลดลงตามค่าขนาดความกว้างต่อความสูง แต่มุมระหว่างแนวทแยงของผนังกับแนวราบนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของผนังลดลง ส่งผลให้ค่า  $R_{mv}$  มีค่าเกือบคงที่ ค่าส่วนประกอบของแรงในแนวราบของกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อ จะมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนและโมเมนต์ของคาน ในขณะที่ส่วนประกอบของแรงในแนวตั้งนั้นจะเพิ่มแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่จะเกิดขึ้นในคานของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 1 กำลังต้านทานของผนังอิฐก่อที่มีขนาดความกว้างแตกต่างกัน

$L_w/H_w$	$R_m$ (kN)	$R_{mh}$ (kN)	$R_{mv}$ (kN)
1.6	207	177	108
1.4	184	150	107
1.2	167	128	107
1.0	151	107	107

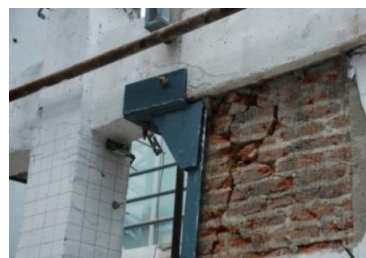
จากค่ากำลังต้านทานของผนังข้างต้น เมื่อนำมาใช้ร่วมกับค่าพลาสติกโมเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ( $M_p$ ) ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 47 กิโลนิวตันต่อเมตร จะสามารถประเมินกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของโครงสร้าง รวมทั้งค่าแรงเฉือนสูงสุด ( $V_x$ ) ที่เกิดขึ้นในคาน ค่าโมเมนต์ดัดที่จุดต่อเสาและคาน ( $M_{x=0}$ ) ค่าโมเมนต์ดัด ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งหูช้างเหล็ก ( $M_{x=L_0}$ ) และค่าแรงในแนวแกนของคาน ( $N_x$ ) ได้ดังแสดงในตารางที่ 2 จากผลการวิเคราะห์พบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน ( $V_x$ ) มีค่าลดลงเมื่อความกว้างของผนังอิฐก่อลดลง โดยลดลงประมาณร้อยละ 15 เมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของผนังอิฐก่อลดลงจาก 1.6 ลงมาเหลือ 1.0 แต่โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดในคาน ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งหูช้างเหล็ก ( $M_{x=L_0}$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของผนังอิฐก่อลดลง เนื่องจากจุดที่ติดตั้งหูช้างเหล็กมีระยะห่างจากจุดต่อเสากับคานมากขึ้นส่งผลให้ระยะแขนของแรงจากผนังอิฐก่อที่ถ่ายเข้าสู่คานมีค่ามากขึ้น จากผลกระทบดังกล่าวจึงทำให้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานมีค่าสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีพลาสติก

$L_w/H_w$	$V_u$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_{x=L_0}$ (kN-m)	$M_{x=0}$ (kN-m)	$N_x$ (kN)
1.6	260	122	-19	47	219
1.4	233	115	-43	47	192
1.2	212	109	-62	47	170
1.0	190	103	-78	47	149

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในงานวิจัยนี้และผลการทดสอบของ Srechai and Lukkunaprasit [7] โดยพบว่าคานของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO2 ที่มีขนาดความกว้างต่อความสูงของผนังค่อนข้างมากที่ 1.64 มีรอยแตกร้าวขนาดเล็กบริเวณใกล้กับจุดต่อเสากับคานและไม่ปรากฏรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดในคาน แต่ในกรณีของตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ที่มีขนาดความกว้างต่อความสูงของผนังน้อย มีรอยแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือนเกิดขึ้นในคานใกล้กับหูช้างเหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากโมเมนต์ดัดที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความกว้างของผนังอิฐก่อลดลง ลักษณะความเสียหายในคานของตัวอย่างทดสอบ MIRCFO2 และตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 17

การวิเคราะห์ข้างต้นจะสามารถนำไปกำหนดขนาดความกว้างต่อความสูงของผนังอิฐก่อที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะ โดยที่ค่าความกว้างต่อความสูงของผนังอิฐก่อที่เหมาะสม จะขึ้นกับกำลังรับแรงดัดของคาน รวมถึงกำลังต้านทานแรงที่ต้องการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 17 ลักษณะความเสียหายในคาน (ก) MIRCFO2 จาก Srechai and Lukkunaprasit [7] และ (ข) ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้

## 6. การประยุกต์ใช้วิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างโดยใช้ผนังอิฐก่อ

จากผลการศึกษาวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้ โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองกรณี คืออาคารที่มีผนังอิฐก่ออยู่เดิมแล้วนั้นสามารถแยกผนังออกจากเสาตามวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้ เพื่อลดแรงเฉือนที่จะเกิดขึ้นในเสาและจุดต่อระหว่างเสากับคาน และกรณีที่อาคารมีลักษณะชั้นล่างเปิดโล่ง เช่นอาคารเรียนของโรงเรียนในจังหวัดเชียงราย ที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2 การเสริมกำลังของอาคารดังกล่าวนั้นสามารถทำได้โดยการเสริมด้วยผนังอิฐก่อตามวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้บริเวณชั้นล่างของอาคาร เพื่อลดความอ่อนแอของโครงสร้างในชั้นล่างของอาคารลง อีกทั้งการเสริมด้วยผนังอิฐก่อในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยลดการบิดตัวของอาคารเนื่องจากความไม่สมมาตรในขณะเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งจะส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาชั้นล่างของอาคารลดลงและอาคารมีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการจะปรับปรุงสมรรถนะของอาคารโดยวิธีการนี้นั้นจำเป็นต้องมีการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างเดิมก่อน เพื่อจะได้ทำการเสริมด้วยผนังอิฐก่อที่มีขนาด จำนวน และตำแหน่ง ที่ถูกต้องเหมาะสม

## 7. สรุปผลการศึกษาวิจัย

ผนังอิฐก่อสามารถส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างมากทั้งในด้านของกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างและลักษณะการวิบัติของโครงสร้าง วิธีการปรับปรุงโครงสร้างที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้สามารถปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างให้ดีขึ้นอย่างมาก โดยตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างโดยรวม และระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่ระดับสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหว เพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้รับการปรับปรุงและวิธีการดังกล่าวยังสามารถป้องกันการวิบัติด้วยแรง

เฉือนในเสาและจุดต่อเสาคานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ขนาดความกว้างของผนังอิฐก่อมีผลกระทบต่อพฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อเอง โดยพบว่ากำลังต้านทานแรงของผนังอิฐก่อจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของผนังลดลง ซึ่งกำลังต้านทานแรงของผนังอิฐก่อจะมีผลกระทบต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคาน ดังนั้นการจะปรับปรุงโครงสร้างโดยวิธีการนี้จึงจำเป็นต้องมีการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างเดิมก่อนเพื่อจะได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างอย่างถูกต้องเหมาะสม

## 8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้ความร่วมมือกับ AUN/SEED-Net และทุนสนับสนุนในการทำวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตามสัญญาเลขที่ CA2/2553 รวมไปถึงการสนับสนุนในการทำวิจัยจากศูนย์เชี่ยวชาญแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือนภายใต้การสนับสนุนของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hassan, A.F. and M.A. Sozen, **Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes.** ACI Structural Journal, 1997. 94(1): p. 31-39.
- [2] Mostafaei, H. and T. Kabeyasawa, **Effect of infill masonry walls on the seismic response of reinforced concrete buildings subjected to the 2003 Bam earthquake strong motion: A case study of Bam telephone center.** Bulletin of the Earthquake Research Institute, 2004. 73(133-156).
- [3] Panagiotakos, T.B. and M.N. Fardis. **Seismic response of infilled RC frames structures.** in the 11<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering, 1996. Acapulco, Mexico.



- [4] Pujol, S. and D. Fick, **The test of a full-scale three-story RC structure with masonry infill walls**. Engineering Structures, 2010. 32(10): p. 3112-3121.
- [5] Kyriakides, M.A. and S.L. Billington. **Seismic retrofit of masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames using sprayable ECC**. in Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 2008. Beijing, China.
- [6] Billington, S., et al., **Evaluation of a sprayable, ductile cement-based composite for the seismic retrofit of unreinforced masonry infills**, in Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. 2009. p. 823-834.
- [7] Srechai, J. and P. Lukkunaprasit, **An innovative scheme for retrofitting masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames**. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2013. 6(4): p. 277-289.
- [8] Calvi, G.M. and D. Bolognini, **Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels**. Journal of Earthquake Engineering, 2001. 5(2): p. 153-185.
- [9] Acun, B. and H. Sucuoglu. **Strengthening of masonry infill walls in reinforced concrete frames with wire mesh reinforcement**. in 8<sup>th</sup> US National Conference on Earthquake Engineering, 2006. San Francisco, CA.
- [10] Erdem, I., et al., **An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames**. Engineering Structures, 2006. 28(13): p. 1843-1851.
- [11] Altin, S., et al., **An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips**. Composites Part B: Engineering, 2008. 39(4): p. 680-693.
- [12] Yuksel, E., et al., **Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames**. Construction and Building Materials, 2010. 24(4): p. 596-609.
- [13] Erol, G., H.F. Karadogan, and F. Cili. **Seismic strengthening of infilled reinforced concrete frames by CFRP**. in 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 2012. Lisbon, Portugal.
- [14] ASCE, **Seismic rehabilitation of existing buildings**, in ASCE/SEI 41-06. 2007, American Society of Civil Engineers: Reston, VA.
- [15] FEMA, **Evaluation of earthquake-damaged concrete and masonry wall building-basic procedures manual**, in FEMA306. 1998, Federal Emergency Management Agency: Washington, D.C.