



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อพฤติกรรม
ของผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างในระนาบ

An Effects of Wall-RC Frame Interconnection on Masonry Infilled Wall Behavior
Under In-plane Lateral Loading

อ.ดร.จรัญ ศรีชัย

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256109A1080004

สัญญาเลขที่ 202/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อพฤติกรรม
ของผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างในระนาบ

An Effects of Wall-RC Frame Interconnection on Masonry Infilled Wall Behavior
Under In-plane Lateral Loading

อ.ดร.จรัญ ศรีชัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีงบประมาณ 2561

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 202/2561

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 202/2561)

อ.ดร.จรัญ ศรีชัย
หัวหน้าโครงการวิจัย

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า อ.ดร.จรัญ ศรีชัย ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณ
เงินรายได้ (เงินอุดหนุนรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง

(ภาษาไทย) ผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อพฤติกรรมของผนังอิฐ
ก่อภายใต้แรงด้านข้างในระนาบ

(ภาษาอังกฤษ) An Effects of Wall-RC Frame Interconnection on Masonry Infilled Wall Behavior
Under In-plane Lateral Loading

รหัสโครงการ 256109A1080004 / สัญญาเลขที่ 202/2561 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 243,400 บาท
(สองแสนสี่หมื่นสามพันสี่ร้อยบาทถ้วน)

ระยะเวลาการดำเนินงาน 2 ปี 11 เดือน (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 31 สิงหาคม 2563)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อ เพื่อพัฒนาวิธีการ
เสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหว
และลดความเสียหายของโครงสร้าง โดยการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างแบบวัฏจักร
ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าประสิทธิภาพในการส่งถ่าย
แรงของจุดต่อระหว่างผนังอิฐและคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะในการต้านทานแรง
และรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนัง จุดต่อที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงได้เพียงพอ
และยอมให้ผนังเกิดการเลื่อนไถลได้ในระดับที่เหมาะสม การใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือน (steel shear dowels)
ร่วมกับคานทับหลังที่มีการเสริมเหล็ก (reinforced tie beams) เชื่อมต่อระหว่างผนังและคานของโครงต้านแรง
ดัดสามารถส่งถ่ายแรงจากคานไปยังผนังอิฐก่อในระดับที่เหมาะสม เมื่อแรงที่ส่งถ่ายผ่านจุดต่อถึงขีดจำกัดในการ
ต้านทานแรง ผนังอิฐก่อสามารถเลื่อนไถลได้ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นอีกทั้งช่วยลดการเอียงตัวออกนอก
ระนาบของผนังด้วย จากการศึกษาสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่มีผนังอิฐก่อ (masonry infilled reinforced concrete frames) โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผนัง
อิฐก่อส่งผลให้ค่าสตีเฟเนสและกำลังต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้างสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดที่ไม่มี
ผนัง (reinforced concrete bare frames) อย่างไรก็ตามเมื่อผนังเกิดความเสียหาย กำลังต้านทานโดยรวมของ
โครงสร้างจะลดลงอย่างทันทีทันใด และแรงปฏิสัมพันธ์จากผนังอิฐจะก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนขึ้น
ในเสา การปรับปรุงจุดต่อระหว่างโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังอิฐก่อโดยการแยกผนังไม่ให้ติดกับ
เสาและใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังที่มีการเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐก่อและคาน

สามารถเพิ่มสติเฟื่องและกำลังด้านทานแรงด้านข้างโดยรวมของโครงสร้างได้อย่างมีนัย เมื่อเทียบกับโครงสร้างดัดที่ไม่มีผนัง ที่สำคัญวิธีการนี้สามารถป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสาเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์จากผนังอิฐก่อและลดความเสียหายของผนังอิฐก่อได้อีกด้วย

Output / Outcome

มีแผนในการนำผลการศึกษาวิจัยที่ได้จากโครงการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการระดับชาติ อยู่ระหว่างจัดเตรียมต้นฉบับบทความวิจัย

ข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้วยวิธีการทดสอบตัวอย่างผนังอิฐก่อขนาดเล็ก โดยไม่มีการทดสอบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเหล็กที่มีผนังอิฐก่อขนาดเท่าโครงสร้างจริง และได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อทั้งแบบที่มีและไม่มีการปรับปรุงจุดต่อ ซึ่งผลที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนจากพฤติกรรมจริงของโครงสร้างอยู่บ้าง ดังนั้นสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต จึงควรทำการศึกษาพฤติกรรมและสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้างดัดที่มีผนังอิฐก่อทั้งแบบที่มีและไม่มีการปรับปรุงจุดต่อโดยวิธีการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่ขนาดเท่าโครงสร้างจริง เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการปรับปรุงรายละเอียด รูปแบบ และวิธีการเสริมกำลังจุดต่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ 256109A1080004
ชื่อโครงการ ผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อพฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างในระนาบ
นักวิจัย อ.ดร.จรัญ ศรีชัย
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ปี 2563

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อ เพื่อพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหวและสามารถลดความเสียหายของโครงสร้าง โดยการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างแบบวัฏจักรร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าประสิทธิภาพในการส่งถ่ายแรงของจุดต่อระหว่างผนังอิฐและคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลกระทบอย่างมากต่อการต้านทานแรงและรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนัง จุดต่อที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงได้ดีและยอมให้ผนังเกิดการเลื่อนไถลได้ในระดับที่เหมาะสม การใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือน (steel shear dowels) ร่วมกับคานทับหลังที่มีการเสริมเหล็ก (reinforced tie beams) เชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐก่อและคานของโครงต้านแรงดัดสามารถส่งถ่ายแรงจากคานไปยังผนังอิฐก่อในระดับที่เหมาะสม เมื่อแรงที่ส่งถ่ายผ่านจุดต่อถึงขีดจำกัดในการต้านทานแรง ผนังอิฐก่อสามารถเลื่อนไถลได้ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นอีกทั้งช่วยลดการเอียงตัวออกนอกระนาบของผนัง จากการศึกษาสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ (masonry infilled reinforced concrete frames) โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผนังอิฐก่อส่งผลให้ค่าสติเฟนสและกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของโครงสร้างสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง (reinforced concrete bare frames) อย่างไรก็ตามเมื่อผนังเกิดความเสียหาย กำลังต้านทานโดยรวมของโครงสร้างลดลงอย่างทันทีทันใด และแรงปฏิสัมพันธ์จากผนังอิฐจะก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนขึ้นในเสา การปรับปรุงจุดต่อระหว่างโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังอิฐก่อ โดยการแยกผนังไม่ให้ติดกับเสา และใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังที่มีการเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐก่อและคานสามารถเพิ่มสติเฟนสและกำลังต้านทานแรงด้านข้างโดยรวมของโครงสร้างได้อย่างมีนัย เมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง ที่สำคัญวิธีการนี้สามารถป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสาเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์จากผนังอิฐก่อและลดความเสียหายของผนังอิฐก่อได้อีกด้วย

Abstract

Project Code 256109A1080004

Project Title An Effects of Wall-RC Frame Interconnection on Masonry Infilled Wall Behavior Under In-plane Lateral Loading

Investigator Dr. Jarun Srechai

Organization Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Year 2020

This research aims to evaluate the behavior of masonry wall under lateral in-plane loading. In order to develop an efficient beam-to-wall connection strengthening method. To enhance the lateral load resistant performance and reduce structural damage of seismic resistant structures. The masonry wall structural assemblages were tested under in-plane horizontal cyclic load. Finite element analysis was also carried out to evaluate the structural behavior of test specimens and masonry infilled RC frames. Based on the results, the load transfer capability of the beam-to-wall connection provided a significant effect on horizontal load resistance and damage pattern of the wall. The efficient connection must have adequate load transfer capability and allows a slight slip between the wall and frame to occur. The combined steel shear dowels and reinforced tie beam as the beam-to-wall connection showed a suitable load transfer capability. Once the transferred load exceeds a certain threshold, a slight slip can occur between the wall and beams. Consequently, the both wall's damages and out-of-plane deformation were reduced. Based on finite element analysis of masonry infilled reinforced concrete frames, the infill wall can increase the overall lateral frame strength and stiffness, compared with a reinforced concrete bare frame. However, once the wall was damaged, the lateral load suddenly dropped. Subsequently, the interaction between the infill wall and the frame induce undesirable shear failure in the column. After a proposed retrofit scheme including the gaps between wall and column as well as the combined steel shear dowels and reinforced tie beam were utilized, the lateral strength and stiffness of the specimen increased, compared with the bare frame. Moreover, the column shear failure due to the interaction between the infill wall and the frame was prevented. The infill wall's damage was also reduced.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)	ก
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ข
บทคัดย่อ	ง
Abstract.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	3
1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ผลกระทบของผนังอิฐต่อสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคาร.....	6
2.2 การเสริมกำลังผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ.....	10
2.3 อิฐและลักษณะการก่อสร้างอาคารทั่วไปที่ใช้ผนังอิฐก่อในประเทศไทย.....	15
2.4 แบบจำลองคอมพิวเตอร์ของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ	22
3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	32
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย.....	36
4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างผนังอิฐก่อขนาดเล็ก.....	36
4.2 การสอบเทียบแบบจำลอง.....	46
4.3 การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์	54

4.4 พฤติกรรมของโครงต้านแรงตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง (Reference).....	72
ประวัตินักวิจัย.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.3-1	สรุปผลที่ได้จากการสำรวจอาคาร (ลีลาทวิวัฒน์ และคณะ 2561).....	17
ตารางที่ 3.1-1	คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	30
ตารางที่ 4.2-1	คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง	46
ตารางที่ 4.2-2	คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองโครงต้านแรงดัด	48
ตารางที่ 4.2-3	คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง.....	51
ตารางที่ 4.2-4	คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง	51
ตารางที่ 4.2-5	คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง.....	51
ตารางที่ 4.2-6	คุณสมบัติทางกลของจุดต่อในผนังและระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด.....	52
ตารางที่ 4.3-1	คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง.....	55
ตารางที่ 4.3-2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง	55
ตารางที่ 4.3-3	คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง.....	55
ตารางที่ 4.3-4	คุณสมบัติทางกลของจุดต่อในผนังและระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด.....	56

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1-1 การวิบัติด้วยแรงเฉือนของจุดต่อเสากับคานเนื่องจากแผ่นดินไหว.....	2
รูปที่ 1.1-2 ความเสียหายของอาคารเรียนเนื่องจากแผ่นดินไหว.....	2
รูปที่ 2.1-1 รูปแบบการวิบัติของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อของ (Mehrabi และคณะ 1996) ...	8
รูปที่ 2.2-1 ตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP (Erdem และคณะ 2006).....	11
รูปที่ 2.2-2 โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กและรูปแบบการติดตั้ง CFRP (Altin และคณะ 2008).....	12
รูปที่ 2.2-3 รูปแบบการเสริมกำลังโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อด้วย CFRP (Yuksel และคณะ 2010).....	13
รูปที่ 2.2-4 กลไกการถ่ายแรงระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัด (Srechai และ Lukkunaprasit 2013).....	15
รูปที่ 2.3-1 ประเภทของอิฐที่ใช้ในงานก่อสร้างผนังโดยทั่วไป (กาญจนภี 2559)	16
รูปที่ 2.3-2 อาคารที่ใช้อิฐมอญในการก่อสร้างผนัง (ลีลาทวิวัฒน์ และคณะ 2561).....	16
รูปที่ 2.3-3 อาคารที่ใช้อิฐบล็อกในการก่อสร้างผนัง (ลีลาทวิวัฒน์ และคณะ 2561)	17
รูปที่ 2.4-1 แบบจำลองผนังอิฐก่อแบบ Detailed-micro Simplified-micro และ Macro modelling	18
รูปที่ 2.4-2 แบบจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐ 3 มิติ (Nasiri และ Liu (2017)	19
รูปที่ 2.4-3 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจากการศึกษาของ (Koutromanos และคณะ 2011).....	20
รูปที่ 2.4-4 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจากการศึกษาของ (Medeiros และคณะ 2013)	21
รูปที่ 3.1-1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1 (SP1).....	23
รูปที่ 3.1-2 ตัวอย่างทดสอบที่ 2 (SP2).....	23
รูปที่ 3.1-3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ.....	24
รูปที่ 3.1-4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP1	24
รูปที่ 3.1-5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP1	25
รูปที่ 3.1-6 ตัวอย่างทดสอบที่ 3 (SP3).....	26
รูปที่ 3.1-7 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP3.....	27
รูปที่ 3.1-8 ตัวอย่างทดสอบที่ 4 (SP4).....	28
รูปที่ 3.1-9 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP4	29
รูปที่ 3.1-10 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ.....	31
รูปที่ 3.1-11 รูปแบบการให้แรงกระทำด้านข้างในระนาบ.....	31
รูปที่ 3.1-12 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระยะเคลื่อนตัว.....	32
รูปที่ 3.2-1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ	34

รูปที่ 3.2-2 เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง (ก) Plane stress element (ข) Interface element และ (ค) Reinforcement element (DIANA 2019).....	34
รูปที่ 3.2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและอิฐก่อ (DIANA FEA BV 2019).....	34
รูปที่ 3.2-4 แบบจำลองจุดต่อระหว่างผนังอิฐและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (interface material).....	35
รูปที่ 3.2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม (Menegotto-Pinto model).....	35
รูปที่ 4.1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP1.....	36
รูปที่ 4.1-2 ความเสียหายของ SP1 ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%	37
รูปที่ 4.1-3 ความเสียหายของ SP1 ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.25%	38
รูปที่ 4.1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP2.....	39
รูปที่ 4.1-5 ความเสียหายของ SP2 ที่ระยะเคลื่อนตัว -0.25%	39
รูปที่ 4.1-6 ความเสียหายของ SP2 ที่ระยะเคลื่อนตัว 4.0%.....	40
รูปที่ 4.1-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP3.....	41
รูปที่ 4.1-8 ความเสียหายของ SP3 ที่ระยะเคลื่อนตัว -0.25%	41
รูปที่ 4.1-9 ความเสียหายของ SP3 ที่ระยะเคลื่อนตัว 3.70%	42
รูปที่ 4.1-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP4	43
รูปที่ 4.1-11 ความเสียหายของ SP4 ที่ระยะเคลื่อนตัว -0.50%.....	43
รูปที่ 4.1-12 ความเสียหายของ SP4 ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.5%	44
รูปที่ 4.1-13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ.....	45
รูปที่ 4.2-1 เปรียบเทียบ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (ข) รูปแบบการแตกร้าวของอิฐก่อ	47
รูปที่ 4.2-2 ตัวอย่างทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (คชนิล 2552).....	47
รูปที่ 4.2-3 แบบจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	48
รูปที่ 4.2-4 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กจากผลการทดสอบและการวิเคราะห์	49
รูปที่ 4.2-5 ตัวอย่างทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ (Wararuksajja และคณะ 2018).....	50
รูปที่ 4.2-6 แบบจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ	50
รูปที่ 4.2-7 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของ WS02 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	53
รูปที่ 4.2-8 การกระจายของความอัดหลัก (minimum principal stress) ที่ระยะการเคลื่อนตัวต่าง ๆ ของ WS02	53
รูปที่ 4.2-9 การแตกร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างต่างๆ ของตัวอย่าง WS02 เทียบกับผลการทดสอบ.....	54
รูปที่ 4.3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเสมือนของเดือยเหล็ก.....	57
รูปที่ 4.3-2 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของ SP1 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	58

รูปที่ 4.3-3	แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของ SP2 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	58
รูปที่ 4.3-4	แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของ SP3 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	59
รูปที่ 4.3-5	แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของ SP4 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	59
รูปที่ 4.3-6	การกระจายความเค้นอัดหลักในผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50%.....	60
รูปที่ 4.3-7	การกระจายความเค้นอัดหลักในผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%.....	61
รูปที่ 4.3-8	เปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบและการวิเคราะห์ SP1 และ SP2	62
รูปที่ 4.3-9	เปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบและการวิเคราะห์ SP3 และ SP4	63
รูปที่ 4.4-1	โครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่มีและไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน	64
รูปที่ 4.4-2	แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ	65
รูปที่ 4.4-3	ความเค้นอัดหลักในโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50%.....	66
รูปที่ 4.4-4	ความเค้นอัดหลักในโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%.....	67
รูปที่ 4.4-5	ความเค้นอัดหลักในโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 2.00%.....	67
รูปที่ 4.4-6	ความเสียหายของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50%.....	68
รูปที่ 4.4-7	ความเสียหายของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%.....	68
รูปที่ 4.4-8	ความเสียหายของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 2.00%.....	69

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ เป็นระบบโครงสร้างของอาคารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะในอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางเช่น อาคารเรียน อาคารพาณิชย์ และอาคารพักอาศัย โดยปกติในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของอาคารเหล่านี้ วิศวกรผู้ออกแบบมักจะไม่พิจารณาผลกระทบของผนังอิฐก่อที่มีต่อพฤติกรรมการต้านทานแรงของโครงสร้าง เนื่องจากการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่สามารถพิจารณาผลของผนังอิฐก่อนั้นมีความซับซ้อนและไม่สะดวกต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาวิจัยรวมถึงการสำรวจความเสียหายของอาคารจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาพบว่า ในกรณีที่มีการก่อสร้างอย่างเหมาะสมผนังอิฐก่อสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงทางด้านข้าง สติฟเนส และความสามารถในการสลายพลังงานให้กับโครงสร้างได้อย่างมาก (Hassan และ Sozen, 1997 Mostafaei และ Kabeyasawa, 2004 และ Panagiotakos และ Fardis, 1996) ในทางกลับกันผนังอิฐก่อสามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้างได้เช่นกัน กล่าวคือผนังอิฐก่อสามารถก่อให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) ในเสาหรือจุดต่อระหว่างเสาคานของโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ซึ่งการวิบัติในลักษณะดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ (drift) ของอาคารที่มีค่าเพียงเล็กน้อย และมักจะพบได้บ่อยในโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทที่มีความเหนียวจำกัด (non-ductile reinforced concrete frame) (Kyriakides และ Billington, 2008 และ Billington และคณะ 2009) การวิบัติดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงปริมาณมากที่ถูกต้านทานโดยผนังอิฐก่อ เมื่อค่าความเค้นในผนังอิฐก่อบริเวณมุมของผนังมีค่าสูงถึงจุดที่ทำให้ผนังอิฐบริเวณมุมเกิดความเสียหายหรือแตกหลุดออก ผนังอิฐก่อส่วนที่ไม่มีความเสียหายจะไปค้ำยันเสา ก่อให้เกิดพฤติกรรมแบบเสาสั้น (captive column) ซึ่งอาจนำไปสู่การวิบัติด้วยแรงเฉือนโดยเฉพาะหากเสาดังกล่าวมีกำลังต้านทานแรงเฉือนไม่เพียงพอ การวิบัติในลักษณะนี้สามารถพบได้ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความแรงระดับกลาง เช่นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในประเทศพม่า ขนาด $M_w 6.9$ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 ได้ก่อให้เกิดความเสียหายกับอาคารในพื้นที่จังหวัดเชียงราย (Srechai และ Lukkunaprasit, 2013) และเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด $M_w 6.3$ ซึ่งมีจุดศูนย์กลางอยู่ในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2014 (รูปที่ 1.1-1) แผ่นดินไหวครั้งนี้ นับเป็นแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดครั้งหนึ่งในประเทศไทย จากการลงพื้นที่เพื่อสำรวจความเสียหายของอาคารเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าว พบว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อหลายๆ อาคารมีความเสียหายของโครงสร้างน้อยกว่าอาคารที่ไม่มีผนังอิฐก่อ (Lukkunaprasit และคณะ 2016) เช่นกรณีของอาคารเรียนขนาดความสูง 3 ชั้น ในอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ซึ่งโรงเรียนดังกล่าวมีอาคารเรียนในลักษณะใกล้เคียงกันทั้งหมดจำนวน 3 หลัง โดยมีอาคารเรียนจำนวน 1 หลังที่ชั้นล่างมีลักษณะเปิดโล่ง ในขณะที่อาคารเรียนอีกสองหลังมีผนังอิฐก่อในชั้นล่างของอาคาร จากการสำรวจความเสียหายพบว่าอาคารเรียนที่ชั้นล่างมีลักษณะเปิดโล่งและที่ชั้นสองและสามมีผนังอิฐก่อนั้นเกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้างของอาคารในระดับที่รุนแรงกว่า เมื่อเทียบกับอาคารที่มีผนังอิฐก่อในชั้นล่าง ดังแสดงในรูปที่ 1.1-2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของผนังอิฐก่อในการช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแผ่นดินไหวและลดระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของโครงสร้างใน

กรณีที่มีปริมาณและรูปแบบการวางตัวของผนังอิฐก่อที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถลดความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนสในแนวตั้งของโครงสร้างอีกด้วย อย่างไรก็ตามในบางกรณีผนังอิฐก่ออาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างได้ เช่น กรณีของอาคารเรียนขนาดความสูง 4 ชั้น โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ริมสุดของอาคารซึ่งมีผนังอิฐก่อ มีรอยแตกร้าวขนาดใหญ่อันเนื่องมาจากแรงเฉือนในบริเวณจุดต่อเสากับคาน ซึ่งลักษณะการวิบัติดังกล่าวอาจนำไปสู่การพังถล่ม (collapse) ของอาคารได้ ในกรณีที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวตั้งของเสา (ปณิธาน, 2557) จากข้อสังเกตข้างต้น จะเห็นได้ว่า เราอาจสามารถใช้ประโยชน์จากผนังอิฐก่อในการต้านทานแผ่นดินไหวได้ แต่ทั้งนี้จะต้องมีการปรับปรุงและให้รายละเอียดที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติในรูปแบบที่ไม่พึงประสงค์ขึ้น



รูปที่ 1.1-1 การวิบัติด้วยแรงเฉือนของจุดต่อเสากับคานเนื่องจากแผ่นดินไหว



รูปที่ 1.1-2 ความเสียหายของอาคารเรียนเนื่องจากแผ่นดินไหว

เพื่อใช้ประโยชน์จากผนังอิฐก่อในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมาก (Acun และ Sucuoglu, 2006 Erdem และคณะ 2006 Altin และคณะ 2008 Yuksel และคณะ 2010 และ Erol และคณะ 2012) พยายามศึกษาวิธีการเพิ่มความเหนียว (ductility) ให้กับผนังอิฐก่อโดยการเสริมด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น การเสริมเหล็กตะแกรงในชั้นปูนฉาบ หรือการใช้วัสดุประเภท carbon fiber reinforced polymers (CFRP) เสริมที่ผิวนอกของผนังอิฐก่อ รวมไปถึงมีการใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือน (steel shear dowel) หรือ CFRP เสริมความแข็งแรงบริเวณจุดต่อระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังอิฐก่อเพื่อช่วยส่งถ่ายแรงจากผนังเข้าสู่คานโดยตรงเพื่อลดทอนแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและเสา ซึ่งจะส่งผลให้ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง เมื่อใช้วิธีการดังกล่าวพบว่าตัวอย่างทดสอบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยมีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างเพิ่มขึ้นในช่วงแรก อย่างไรก็ตามเมื่อตัวอย่างทดสอบมีระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้น จุดต่อระหว่างคานและผนังก็จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการถอนออก (pullout) ของเดือยเหล็กจากผนังเนื่องจากชั้นปูนฉาบเกิดการแตกร้าว หรือแผ่น CFRP หลุดร่อนออกจากผนัง ส่งผลให้กำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างกะทันหัน และก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ติดกับผนัง จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าวิธีการถ่ายแรงจากผนังเข้าสู่คานโดยตรง สามารถลดความเสียหายที่จะเกิดกับเสาและส่งผลให้โครงสร้างมีสมรรถนะที่ดีขึ้นได้ อย่างไรก็ตามจุดต่อระหว่างคานและผนังอิฐก่อจำเป็นต้องได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องเหมาะสม มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะส่งถ่ายแรงจากผนังไปสู่คานได้โดยไม่เกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้นในตัวจุดต่อเอง

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาพบว่าผนังอิฐก่อส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างอย่างมาก ดังที่กล่าวข้างต้น โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารเรียนของโรงเรียนในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย เนื่องจากโครงสร้างของอาคารดังกล่าวไม่ได้รับการออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหว อีกทั้งไม่มีการเสริมเหล็กในโครงสร้างอย่างถูกต้องเหมาะสม โดยเฉพาะรายละเอียดของจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบ ซึ่งความเสียหายที่รุนแรงอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของคนจำนวนมากได้ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะและออกแบบอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในอนาคตให้ปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงทางด้านข้างของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน
- 2) พัฒนารูปแบบการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมต่อการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

พฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงแผ่นดินไหวเป็นประเด็นที่มศึกษามากได้ ทำการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง ทั้งศึกษาโดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและศึกษาโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ จนนำไปสู่ความเข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างประเภทนี้มากขึ้น โดยพบว่าผนังอิฐก่อมีผลกระทบต่อพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างอย่างมาก เช่น สามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงและสติเฟนสของโครงสร้างได้อย่างมากเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีผนังอิฐก่อ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานและสติเฟนสของโครงสร้างส่งผลให้แรงภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ เพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะแรงเฉือนในเสาและจุดต่อระหว่างเสาคานที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลจากแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดที่ล้อมรอบ ในกรณีที่เสาและจุดต่อเสาคานมีกำลังต้านทานแรงเฉือนเพียงพอ ความเสียหายที่เกิดกับบริเวณดังกล่าวก็จะไม่รุนแรงและส่งผลให้โครงสร้างมีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวที่สูงขึ้น ในทางกลับกันหากเสาหรือจุดต่อเสาคานมีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความเหนียวไม่เพียงพอ บริเวณดังกล่าวก็จะได้รับความเสียหายที่รุนแรงและอาจส่งผลให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ จากผลการศึกษาในอดีตพบว่ามีอีกหลายประเด็นที่ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อนั้นมีความซับซ้อนและขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิ คุณสมบัติทางกลของวัสดุ รูปแบบของผนังอิฐ รูปแบบของจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดที่ล้อมรอบ กำลังต้านทานและระดับความเหนียวของโครงต้านแรงดัดที่ล้อมรอบผนัง เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโครงต้านแรงดัด ในกรณีที่เสาหรือจุดต่อเสาคานที่อยู่ติดกับผนังมีกำลังไม่เพียงพอจึงจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังให้กับเสาและจุดต่อ ซึ่งวิธีการเสริมกำลังดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อีกทางเลือกที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่ชัดเจนคือการสร้างกลไกการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดขึ้นมาใหม่เพื่อลดแรงภายในที่จะเพิ่มขึ้นในเสาและจุดต่อเสาคาน การสร้างกลไกการส่งถ่ายแรงขึ้นมาใหม่นี้มีหลากหลายวิธี เช่นการเสริมเดือยเหล็กรับแรงเฉือนระหว่างผนังและคาน (Kyriakides และ Billington, 2008) การใช้หูช้างเหล็ก (steel bracket) ในการถ่ายแรงจากผนังไปสู่คาน (Srechai และ Lukkunaprasit, 2013) การเพิ่มความแข็งแรงให้กับเสาเอ็นในผนัง ฯลฯ ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ และลดความเสียหายที่จะเกิดกับเสาและจุดต่อเสาคาน โดยใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มจากการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้กันโดยทั่วไปทางปฏิบัติและเทคนิควิธีการในการเสริมกำลังจุดต่อ จากนั้นจะทำการออกแบบและศึกษาพฤติกรรมในการต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดเล็กของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและคานแบบต่าง ๆ ภายใต้แรงคงที่ในแนวตั้งร่วมกับแรงด้านข้างในระนาบแนวราบแบบวัฏจักร (constant vertical and in-plane lateral cyclic load) ในห้องปฏิบัติการ นำผลที่ได้จากการทดสอบมาพัฒนาและสอบเทียบแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อขนาดใหญ่ ทั้งแบบที่มีและไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด เสนอวิธีการปรับปรุงจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหมาะสมต่อการต้านทานแผ่นดินไหว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบต่อพฤติกรรมในการต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อและสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้าง
- 2) ได้วิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย
- 3) ผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ สามารถนำไปตีพิมพ์เป็นบทความในวารสารวิชาการระดับชาติหรือระดับนานาชาติอย่างน้อย 1 ฉบับ เพื่อเผยแพร่ให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถเข้าถึงและนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหรือปรับปรุงอาคารในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น

บทที่ 2 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบของผนังอิฐต่อสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคาร

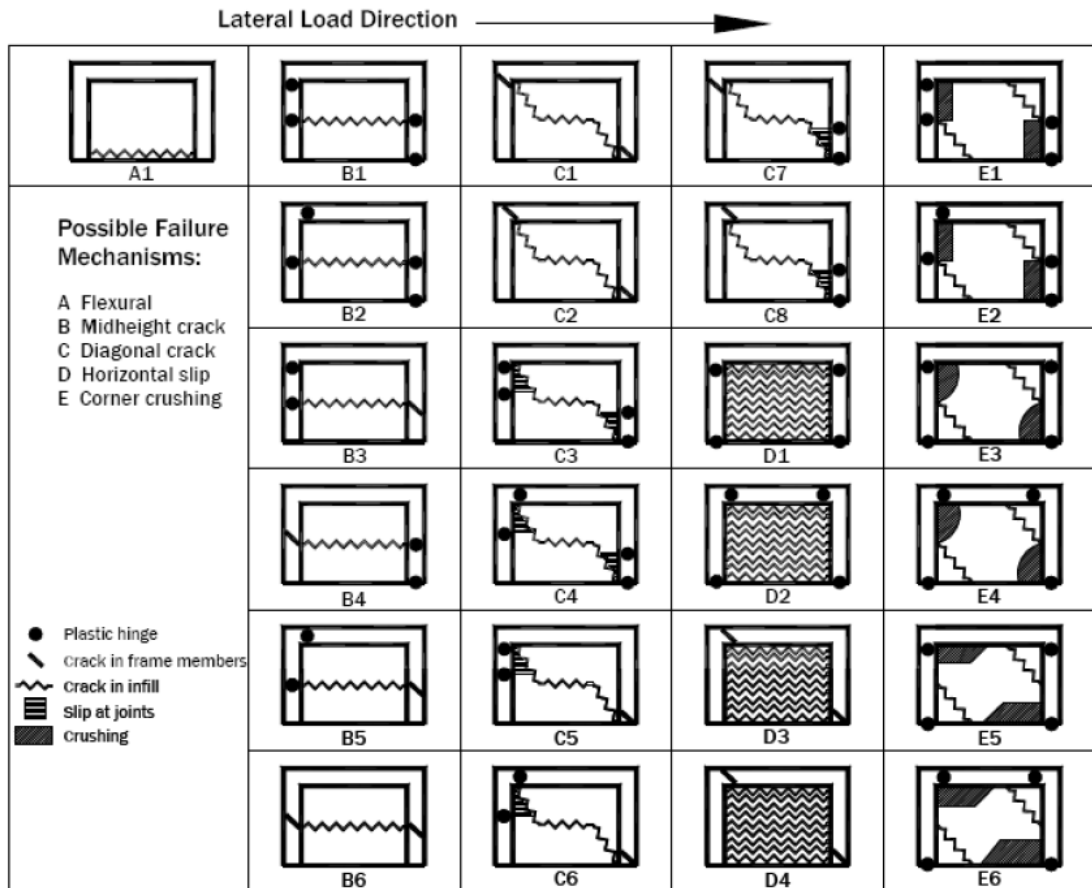
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ เป็นระบบโครงสร้างพื้นฐานที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอาคารที่มีความสูงน้อยถึงปานกลาง ปกติในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของอาคาร วิศวกรผู้ออกแบบจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของผนังอิฐก่อต่อพฤติกรรมต้านทานแรงของโครงสร้าง เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาผลกระทบของผนังอิฐก่อนั้นมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาวิจัยรวมถึงการสำรวจความเสียหายของอาคารจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวต่าง ๆ พบว่าผนังอิฐก่อส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอย่างมาก ผลกระทบดังกล่าวอาจส่งผลให้สมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย (Lukkunaprasit และคณะ 2016, ลีลาทวิวัฒน์ และ วานิชชัย, 2557) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของผนังอิฐก่อต่อพฤติกรรมในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างจำนวนมาก ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องเพียงบางส่วนดังนี้

Bertero และ Brocken (1983) ได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำด้านข้าง ด้วยวิธีการทดสอบโครงสร้างจำลองแบบย่อส่วน โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่สามารถส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างหลายปัจจัยเช่น ระดับความเหนียวของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก กำลังของผนังอิฐก่อ รายละเอียดของจุดต่อระหว่างผนังและโครงอาคารที่ล้อมรอบ จำนวนและตำแหน่งที่ติดตั้งผนัง เป็นต้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าผนังอิฐก่อสามารถส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีผนังพบว่าสติฟเนสต้านข้างและกำลังต้านทานแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่มีผนังอิฐก่อมีค่าประมาณ 2.1 ถึง 11.6 และ 2.8 ถึง 8.0 เท่า ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับประเภทและกำลังของผนัง การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในผนังจะส่งผลให้สติฟเนสและกำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างมาก แต่ในทางกลับกันจะส่งผลให้ความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าในกรณีที่ผนังมีความแข็งแรงมากเกินไปหรือโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นชนิดที่มีความเหนียวจำกัด ผนังอิฐก่ออาจส่งผลให้เสาหรือจุดต่อระหว่างเสากับคานเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนได้ Angel และคณะ(1994) ศึกษาผลกระทบของผนังอิฐก่อต่อพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดที่มีความเหนียวสูง (ductile RC frame) โดยวิธีการทดสอบ จากผลการศึกษาพบว่าสติฟเนสและกำลังต้านทานแรงของตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของกำลังรับแรงอัดของผนังอิฐก่อ คุณสมบัติของปูนก่อและอิฐเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบความเสียหายของผนัง ซึ่งรูปแบบความเสียหายดังกล่าวสามารถส่งผลกระทบต่อรูปแบบการวิบัติของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กอีกด้วย ในกรณีที่ผนังมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่ามีการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนเกิดขึ้นในเสาและจุดต่อเสากับคาน Mehrabi และคณะ (1996) ทำการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร จากผลการทดสอบพบว่ากำลังต้านทานแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่มีผนังอิฐก่อมีค่าประมาณ 1.5 ถึง 2.3 เท่าของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีผนัง และสติฟเนสทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น

มากกว่า 15 เท่า โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นกับกำลังต้านทานและอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของผนังอิฐก่อ จากตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจำนวน 12 ตัวอย่างสามารถสรุปรูปแบบการวิบัติหลักได้ดังรูปที่ 2.1-1 ดังนี้

- 1) รูปแบบ A คือ การวิบัติเนื่องจากแรงดัด (flexural mode) โดยเกิดความเสียหายเนื่องจากการดัดทั้งโครงต้านแรงดัดและผนังอิฐก่อ พฤติกรรมในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อโครงต้านแรงดัดและผนังอิฐก่อไม่เกิดการแยกตัว การวิบัติลักษณะนี้เกิดขึ้นได้น้อย ยกเว้นกรณีที่โครงต้านแรงดัดที่มีความชะลูดมาก (อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงน้อย) และมีเหล็กเสริมรับแรงดัดในเสาของโครงต้านแรงดัดน้อย
- 2) รูปแบบ B คือ การวิบัติที่เกิดรอยร้าวตามแนวปูนก่อ (bed-joint) และเกิดการเลื่อนไถลในแนวราบ (horizontal sliding) ที่ระดับความสูงใกล้เคียงกับกึ่งกลางความสูงของผนังอิฐก่อ ผนังอิฐก่อส่วนล่างจะยื่นเสาไว้ทำให้เสาส่วนล่างโก่งตัวได้น้อยและเกิดการวิบัติของเสาด้านบนในลักษณะเสาสั้น (captive column) สามารถแยกออกเป็นรูปแบบการวิบัติย่อยได้หลายแบบ ขึ้นกับรูปแบบการวิบัติของเสาในโครงต้านแรงดัด
- 3) รูปแบบ C คือ เกิดรอยร้าวในแนวทแยงมุมตามแนวรับแรงอัดของผนัง บางครั้งจะเกิดรอยร้าวตามแนวปูนก่อในแนวราบบริเวณกึ่งกลางความสูงของผนังอิฐก่อร่วมด้วย ในกรณีนี้ผนังอิฐก่อสามารถสร้างกลไกการส่งถ่ายแรงในลักษณะค้ำยันรับแรงอัดเสมือนในแนวทแยง (equivalent diagonal compression strut mechanism) ได้ และสามารถเกิดความเสียหายเนื่องจากความเค้นอัดขึ้นที่มุมของผนังอิฐก่อ ร่วมกับการเกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) หรือการวิบัติด้วยแรงเฉือน (shear failure) ที่ขึ้นส่วนโครงต้านแรงดัด
- 4) รูปแบบ D คือ การวิบัติจากการแตกร้าวตามแนวปูนก่อหลาย ๆ แนวในผนังอิฐก่อและเกิดการเลื่อนไถลของรอยต่อรอยต่อดังกล่าวในแนวราบ โดยปกติมักเกิดขึ้นในผนังอิฐก่อที่แนวปูนก่อมีกำลังต้านทานต่ำหรือไม่มีปูนฉาบ
- 5) รูปแบบ E คือ ผนังอิฐก่อสามารถต้านทานแรงโดยไม่เกิดรอยร้าวตามแนวราบและปรากฏกลไกการส่งถ่ายแรงในลักษณะค้ำยันรับแรงอัดเสมือนในแนวทแยง (equivalent diagonal compression strut mechanism) อย่างชัดเจนของ โดยปกติจะมีรอยร้าวตามแนวทแยงที่ขนานกันและผนังอิฐก่อมักเกิดการแตกหักบริเวณมุมรับแรงอัด

รูปแบบการวิบัติดังกล่าวจะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานและสติเฟนสของผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัด คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก กรณีที่ผนังอิฐก่อมีความแข็งแรงใกล้เคียงหรือต่ำกว่าโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (weak infill wall) พบว่ามีรอยแตกร้าวตามแนวราบในชั้นปูนก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัด ในกรณีที่ตัวอย่างทดสอบมีผนังอิฐก่อที่มีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (strong infill wall) พบว่ามักจะเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาของโครงต้านแรงดัด โดยเฉพาะเมื่อโครงต้านแรงดัดมีความเหนียวจำกัด (non-ductile RC frames)



รูปที่ 2.1-1 รูปแบบการวิบัติของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อของ (Mehrabi และคณะ 1996)

Al-Chaar และคณะ (2002) ได้รายงานผลการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำด้านข้าง ในการศึกษาครั้งนี้จะคำนึงถึงผลกระทบของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนัง รวมไปถึงจำนวนผนัง ต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างและรูปแบบการวิบัติของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตและผนัง ในกรณีของตัวอย่างทดสอบที่มีหนึ่งช่วงเสาพบว่ากำลังต้านทานสูงสุดและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำผนังเป็นหลัก โดยพบว่าเสาเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนในตัวอย่างทดสอบที่มีผนังเป็นคอนกรีตบล็อก แต่ในตัวอย่างทดสอบที่มีผนังทำด้วยอิฐมอญไม่พบการวิบัติของเสาในลักษณะดังกล่าว ผลการศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่ากำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของช่วงเสาที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของจำนวนช่วงเสายังก่อให้เกิดรูปแบบการวิบัติที่แตกต่างกันอีกด้วย Corte และคณะ (2008) ได้นำเสนอผลการทดสอบของอาคารที่มีการใช้งานจริง อาคารดังกล่าวเป็นอาคารที่มีความสูงสองชั้น โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด (non-ductile RC frame) และมีผนังอิฐก่อทั้งภายนอกและภายในอาคาร จากผลการทดสอบพบว่าผนังจะเริ่มเกิดการแตกร้าวเมื่ออาคารมีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างประมาณร้อยละ 0.2 ของความสูง และรอยแตกร้าวมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังก็มีรูปแบบที่แตกต่างกันในผนังแต่ละผืน ซึ่งมีรูปแบบหลักๆ ดังนี้ การแตกร้าวในแนวทแยงมุม การแตกร้าวจากการบดอัดที่มุม การแตกร้าวตามแนวปูนก่อ และรูปแบบที่เกิดจากสามแบบข้างต้นร่วมกัน ในส่วนของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นพบว่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดัดร่วมกับแรงเฉือนในเสาเป็นรูปแบบที่

พบมากที่สุด [Kakaletsis และ Karayannis \(2008\)](#) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกำลังรับแรงอัดของผนังอิฐก่อต่อผลตอบสนองทางโครงสร้างของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทที่มีความเหนียวสูง จากการศึกษาพบว่ากำลังต้านทานแรงและสติฟเนสทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบมีค่าประมาณ 1.6 ถึง 1.8 และ 2.4 ถึง 2.6 เท่าของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีผนังอิฐก่อ ตามลำดับ และไม่พบการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาหรือจุดต่อเสาคาน อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบลดลงร้อยละ 20 ของกำลังสูงสุด การเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่มีผนังมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีผนังประมาณร้อยละ 40 [Stavridis \(2009\)](#) ได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด ในส่วนของผนังอิฐก่อจะมีทั้งแบบที่มีและไม่มีช่องเปิด เพื่อศึกษาผลกระทบของช่องเปิดต่อความแข็งแรงและรูปแบบความเสียหายของผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่าช่องเปิดส่งผลให้กำลังและสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผนังไม่มีช่องเปิด อย่างไรก็ตามไม่ปรากฏการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสา ในทางกลับกันตัวอย่างที่ผนังไม่มีช่องเปิดซึ่งผนังจะมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดคอนกรีต พบว่าเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและเสา ในการศึกษาครั้งนี้ยังมีการทดสอบอีกส่วนซึ่งเป็นการทดสอบด้วยโต๊ะสั่นไหว (shake-table) ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เป็นโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาด 3 ชั้น 2 ช่วงเสา ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีผนังอิฐก่อทั้งแบบที่มีและไม่มีช่องเปิด รูปแบบการวิบัติของผนังที่ไม่มีช่องเปิดมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้าคือเมื่อตัวอย่างทดสอบมีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างประมาณร้อยละ 1.0 ของความสูง พบว่าเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาชั้นแรกที่อยู่ติดกับผนังที่ไม่มีช่องเปิดและชั้นแรกเป็นส่วนใหญ่ที่เกิดความเสียหายมากที่สุด [Pujol และ Fick \(2010\)](#) ได้ทำการทดสอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3 ชั้น 2 ช่วงเสา ซึ่งมีขนาดเท่าของจริง อาคารดังกล่าวไม่ได้รับการออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว จากผลการทดสอบพบว่าอาคารที่ไม่มีผนังอิฐก่อเมื่อให้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรจะเกิดการวิบัติแบบเฉาะทะลุ (punching shear) ที่จุดต่อเสากับพื้นชั้นสาม หลังจากการทดสอบดังกล่าวจบลงอาคารซึ่งใช้เป็นตัวอย่างทดสอบได้รับการซ่อมแซมและเพิ่มผนังอิฐก่อในหนึ่งช่วงเสาตลอดทั้งสามชั้น และทำการให้แรงแบบวัฏจักร พบว่าโครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อมีคาบการสั่นที่สั้นลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีผนัง กำลังต้านทานและสติฟเนสของตัวอย่างที่มีผนังมีค่าประมาณ 2 และ 6 เท่าของตัวอย่างที่ไม่มีผนัง อย่างไรก็ตามความเสียหายที่สำคัญจะเกิดขึ้นในผนังอิฐก่อ ซึ่งมีลักษณะแตกตามแนวทแยงและแตกที่มุมด้านบนใกล้กับจุดต่อเสากับพื้น ซึ่งส่งผลให้เสาเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน [พรหมดวง \(2553\)](#) ได้ทำการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อขนาด 1/2 เท่าของขนาดจริง ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรร่วมกับแรงคงที่กระทำในแนวตั้ง จากผลการทดสอบพบว่า โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อสามารถรับแรงต้านข้างสูงสุดและมีค่าสติฟเนสสูงกว่าโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อประมาณ 3 เท่า อย่างไรก็ตามทั้งกำลังต้านทานและสติฟเนสจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผนังเกิดความเสียหาย และผนังอิฐก่อสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวิบัติ จากการวิบัติด้วยแรงดัดของเสาในกรณีของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีผนัง เป็นการวิบัติแบบเฉือนของเสาบริเวณใกล้กับจุดต่อเสาคานในตัวอย่างทดสอบที่มีผนัง เนื่องจากเมื่อผนังอิฐก่อเกิดการแตกร้าวที่มุมรับแรงอัดแล้ว ส่วนที่ไม่ได้รับความเสียหายจะค้ำยันเสากลางไว้จึงก่อให้เกิดพฤติกรรมแบบเสาสั้น (captive column) ซึ่งนำไปสู่การวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสาในบริเวณดังกล่าว [Srechai และ Lukkunaprasit \(2013\)](#) ได้ทำ

การทดสอบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อขนาด 3/4 เท่าของโครงสร้างต้นแบบ ภายใต้แรงในแนวราบแบบวิภูจักรกระทำร่วมกับแรงแนวตั้งที่มีค่าคงที่ จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างทดสอบจะเกิดการแตกร้าวของผนังอิฐก่อบริเวณมุมที่รับแรงอัดและมีปูนฉาบหลุดร่อนออกมา โดยสามารถสังเกตเห็นการแตกร้าวนี้ได้ตั้งแต่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์เพียงร้อยละ 0.25 ของความสูง ที่ตำแหน่งระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเดียวกันสามารถเห็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear crack) ในเสา ซึ่งรอยร้าวดังกล่าวมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อผนังอิฐก่อบริเวณมุมที่รับแรงอัดมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงดัดด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับร้อยละ 0.33 ของความสูง และกำลังต้านทานแรงดัดด้านข้างลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก Zovkic และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกำลังรับแรงอัดของผนังอิฐก่อต่อพฤติกรรมในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียว โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีความสูง 1 ชั้นและ 1 ช่วงเสา ขนาด 2/5 เท่าของโครงสร้างจริง จากผลการทดสอบพบว่าสติเฟนสทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่มีผนังมีค่าประมาณ 5.8 ถึง 6.5 เท่าของตัวอย่างที่ไม่มีผนัง ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของผนังอิฐก่อส่งผลกระทบต่อสติเฟนสของตัวอย่างทดสอบอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่กลับส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อกำลังต้านทานแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ และเมื่อระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบมีค่าประมาณร้อยละ 0.75 ของความสูงพบว่าผนังมีความเสียหายที่รุนแรงจึงส่งผลให้ผนังมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กน้อยมาก ที่สถานะนี้พบว่าโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเสียหายเพียงเล็กน้อยเนื่องจากโครงสร้างแรงดัดมีความแข็งแรงและความเหนียวที่เพียงพอ

จากผลการศึกษาวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีหลายปัจจัยที่สามารถส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อกำลังต้านทานสูงสุด สติเฟนส และรูปแบบการวิบัติของโครงสร้างคือ อัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานของผนังอิฐก่อและโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมไปถึงระดับความเหนียวและรายละเอียดในการเสริมเหล็กของโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2 การเสริมกำลังผนังอิฐก่อและโครงสร้างแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ

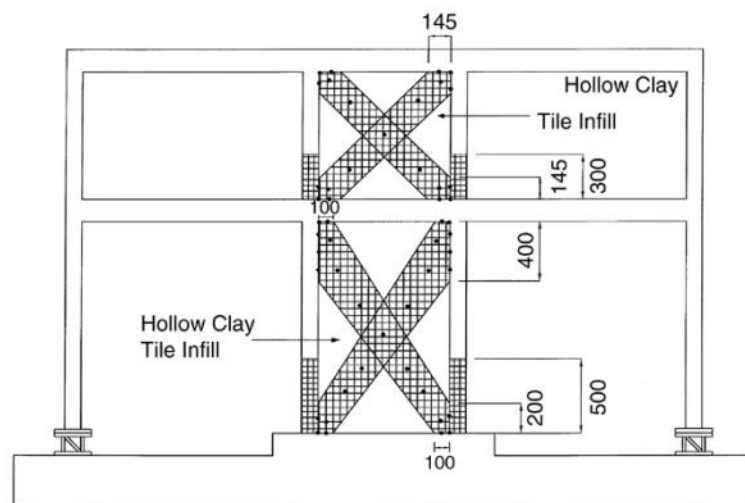
ในปัจจุบันนี้หลายประเทศมีมาตรฐานการออกแบบซึ่งมีแนวคิดและวิธีการพิจารณาผลกระทบของผนังอิฐก่อที่ค่อนข้างแตกต่างกัน Kaushik และคณะ (2006) ได้ทำการทบทวนแนวทางการพิจารณาผลจากผนังอิฐก่อและมาตรฐานการออกแบบใน 16 ประเทศ อาทิ สหรัฐอเมริกา อินเดีย จีน สหภาพยุโรป ฯลฯ พบว่าสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ กลุ่มที่ไม่นำผลกระทบของผนังอิฐก่อมาพิจารณาโดยกำหนดให้ใช้วิธีการแยกผนังออกจากโครงสร้างแรงดัดเพื่อไม่ให้มีแรงปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างแรงดัด และกลุ่มที่ใช้ประโยชน์จากกำลังและสติเฟนสของผนังอิฐก่อในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการเสริมกำลังของผนังอิฐก่อเพื่อทำให้ผนังอิฐก่อสามารถรับแรงได้ดีขึ้น รวมไปถึงการเสริมกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างดัดเพื่อป้องกันรูปแบบการวิบัติแบบเปราะอีกด้วย ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมาก (Calvi และ Bolognini 2001 Acun และ Sucuoglu 2006 Erdem และคณะ 2006 Altin และคณะ 2008 Billington และคณะ 2009 Yuksel และคณะ 2010 และ Erol

และคณะ 2012) พยายามพัฒนาและเสนอวิธีการเพิ่มความเหนียว (ductility) ให้กับผนังอิฐก่อโดยการเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น การเสริมด้วยเหล็กตะแกรงในชั้นปูนฉาบ หรือการใช้วัสดุประเภท Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) เสริมที่ผิวนอกของผนังอิฐก่อ

Calvi และ Bolognini (2001) ได้ศึกษาผลตอบสนองในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อแบบที่มีการเสริมกำลัง โดยใช้วิธีการเสริมกำลังผนังอิฐก่อสอบแบบคือ การเสริมด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบในชั้นปูนก่อและการเสริมเหล็กตะแกรง (wire mesh) ในชั้นปูนฉาบของผนัง โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่มี 1 ช่วงเสาและความสูง 1 ชั้น ขนาดเท่าโครงสร้างจริง โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียว (ductile) โดยทำการทดสอบภายใต้แรงด้านข้างในระนาบร่วมกับแรงนอกระนาบ (in-plane and out-of-plane loads) จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า การเสริมเหล็กในผนังอิฐก่อถึงแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแรงและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังได้ การเสริมด้วยเหล็กตะแกรงในชั้นปูนฉาบมีประสิทธิภาพดีกว่าการเสริมเหล็กเส้นกลมในชั้นปูนก่อ ทั้งในด้านกำลังต้านทานแรง สติฟเนส และความสามารถในการสลายพลังงานของโครงสร้าง

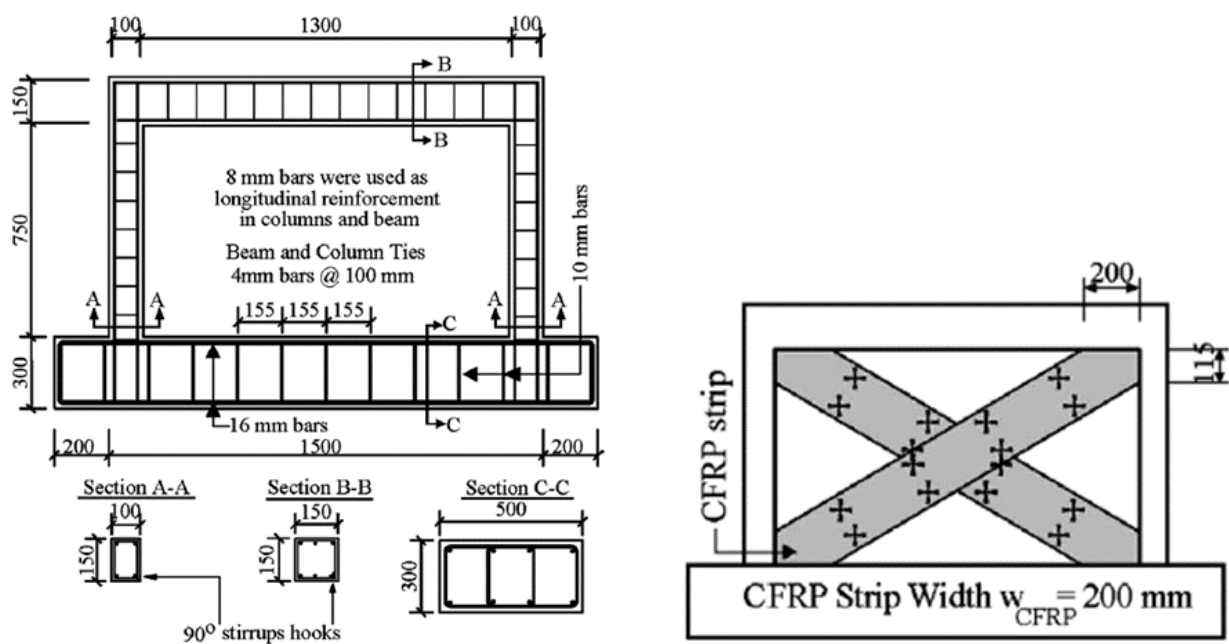
Acun และ Sucuoglu (2006) ทำการทดสอบโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ โดยใช้ตัวอย่างที่มี 1 ช่วงเสา ความสูง 2 ชั้น ขนาด 1/3 เท่าของโครงสร้างจริง โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด (non-ductile) ผนังอิฐก่อมีการเสริมกำลังโดยการเพิ่มชั้นปูนฉาบที่มีการเสริมเหล็กตะแกรงทับชั้นปูนฉาบที่มีอยู่เดิม และใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือน (steel shear dowels) เชื่อมต่อระหว่างชั้นปูนฉาบและโครงต้านแรงดัด จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังทำให้ตัวอย่างทดสอบมีสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น

Erdem และคณะ (2006) ทำการทดสอบตัวอย่างโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มี 3 ช่วงเสา 2 ชั้น ขนาด 1/3 เท่าของขนาดจริง ช่วงเสากลางมีผนังอิฐก่อ โดยมีการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ในผนังอิฐก่อและส่วนล่างของเสาที่ติดกับผนัง ดังแสดงในรูปที่ 2.2-1 จากผลการทดสอบพบว่ากำลังต้านทานแรงและสติฟเนสของโครงสร้างเพิ่มขึ้น 4 และ 10 เท่าของโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์เพียง 0.50% กำลังต้านทานจะลดลงอย่างกะทันหันเนื่องจากแผ่น CFRP ที่ยึดกับโครงสร้างหลุดออกทำให้กำลังต้านทานโดยรวมลดเหลือประมาณร้อยละ 40 ของกำลังต้านทานสูงสุด



รูปที่ 2.2-1 ตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP (Erdem และคณะ 2006)

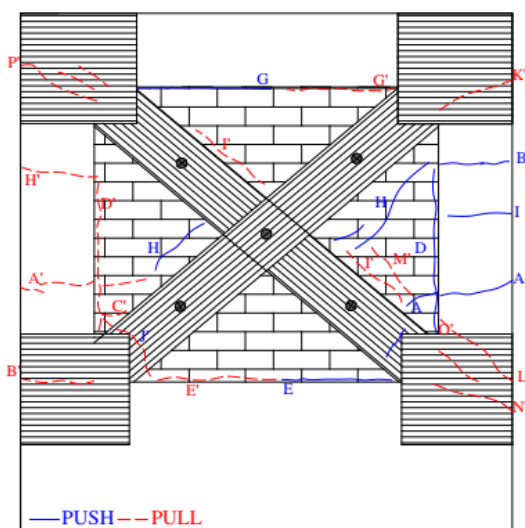
Altin และคณะ (2008) ได้เสนอเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อ โดยการทดสอบตัวอย่างโครงสร้างแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่มี 1 ช่วงเสา 1 ชั้น ขนาด 1/3 เท่าของขนาดโครงสร้างจริง โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด และใช้แผ่น CFRP หลายขนาดความกว้างเสริมในแนวทแยงของผนังดังแสดงในรูปที่ 2.2-2 จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังโดยแผ่น CFRP ทำให้กำลังต้านทานแรงสูงสุดและสติฟเนสของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมด้วยแผ่น CFRP ประมาณ 0.54-1.61 เท่า และ 2.81-5.40 เท่า ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อกำลังต้านทานเลยจุดสูงสุดจะลดลงอย่างกะทันหันเนื่องจากแผ่น CFRP ฉีกขาดหรือหลุดร่อนออกจากผนังอิฐก่อ ส่งผลให้โครงสร้างสูญเสียกำลังต้านทานอย่างมากและเกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์มีค่าน้อย กล่าวคือโครงสร้างมีความเหนียวต่ำ (low ductility)



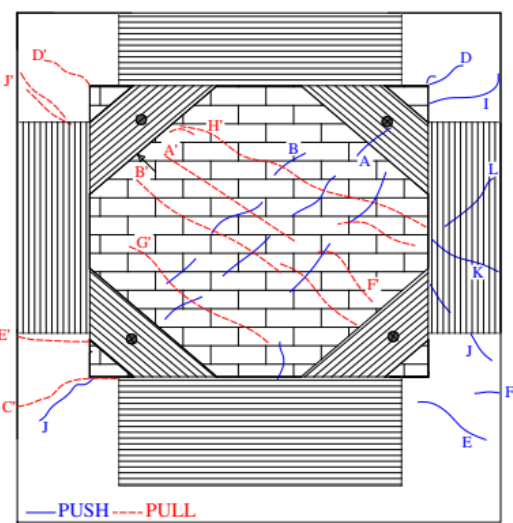
รูปที่ 2.2-2 โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กและรูปแบบการติดตั้ง CFRP (Altin และคณะ 2008)

Billington และคณะ (2009) ได้เสนอวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยใช้เหล็กตะแกรงเสริมในชั้นปูนฉาบที่ทำจาก Engineered Cementitious Composite (ECC) และใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนเป็นตัวยึดระหว่างชั้นปูนฉาบและโครงสร้างแรงดัด โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างที่มี 1 ช่วงเสา 1 ชั้น ขนาด 1/5 และ 2/3 เท่าของขนาดโครงสร้างจริงภายใต้แรงดัดและแรงดัดข้างแบบวิถัจกร โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างขนาด 1/5 เท่าของขนาดจริง มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 1.0%-4.0% ณ ตำแหน่งที่กำลังต้านทานของตัวอย่างลดลงเหลือร้อยละ 80 ของกำลังสูงสุด อย่างไรก็ตามกรณีของตัวอย่างทดสอบขนาด 2/3 เท่าของขนาดจริงพบว่าโครงสร้างจะเกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) เมื่อกำลังต้านทานเลยจุดสูงสุดที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์เท่ากับ 1.0% กำลังต้านทานของโครงสร้างลดลงอย่างกะทันหันเนื่องจากชั้นปูนฉาบเกิดความเสียหายและเดือยเหล็กรับแรงเฉือนหลุดออกจากชั้นปูนฉาบทำให้ไม่สามารถส่งถ่ายแรงจากโครงสร้างแรงดัดไปยังผนังอิฐก่อ

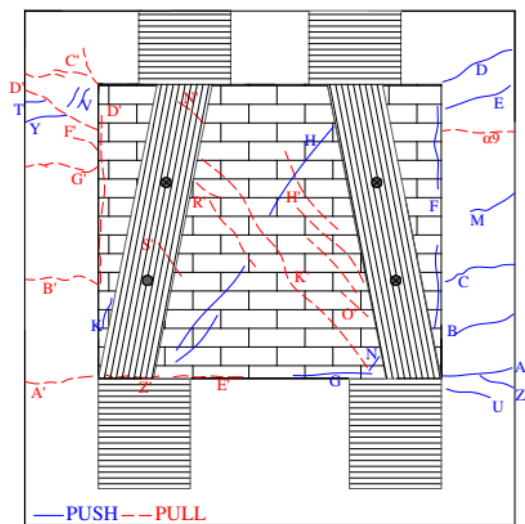
Yuksel และคณะ (2010) ได้เสนอเทคนิคการเสริมกำลังผนังอิฐก่อ โดยการทดสอบตัวอย่างโครงสร้างแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่มี 1 ช่วงเสา 1 ชั้น ขนาด 1/3 เท่าของขนาดโครงสร้างจริง โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด จำนวน 6 ตัวอย่าง โดยใช้แผ่น CFRP เสริมกำลังผนังอิฐก่อหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.2-3 จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังโดยใช้แผ่น CFRP ทำให้กำลังต้านทานแรงสูงสุดและสติเฟนสของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมด้วยแผ่น CFRP ประมาณ 0.12-0.53 เท่า และ 1.86-3.03 เท่า ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อกำลังต้านทานแรงเฉยจุดสูงสุดจะลดลงอย่างกะทันหัน เนื่องจากแผ่น CFRP หลุดร่อนออกจากผนังอิฐก่อ ส่งผลให้โครงสร้างสูญเสียกำลังอย่างมากที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์มีค่าอยู่ในช่วง 1.0%-1.7%



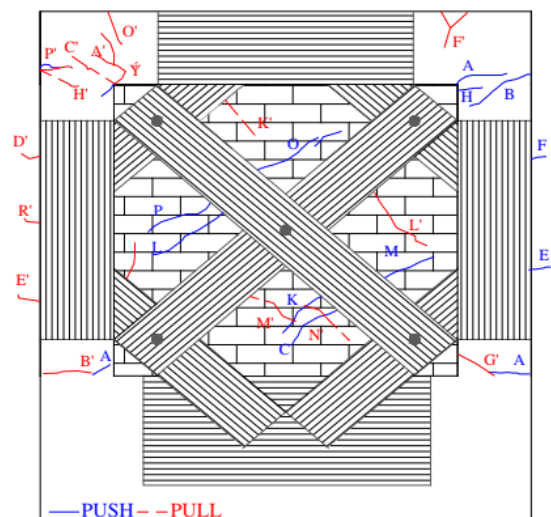
cross-braced pattern



diamond-braced pattern



off-diagonal-braced pattern



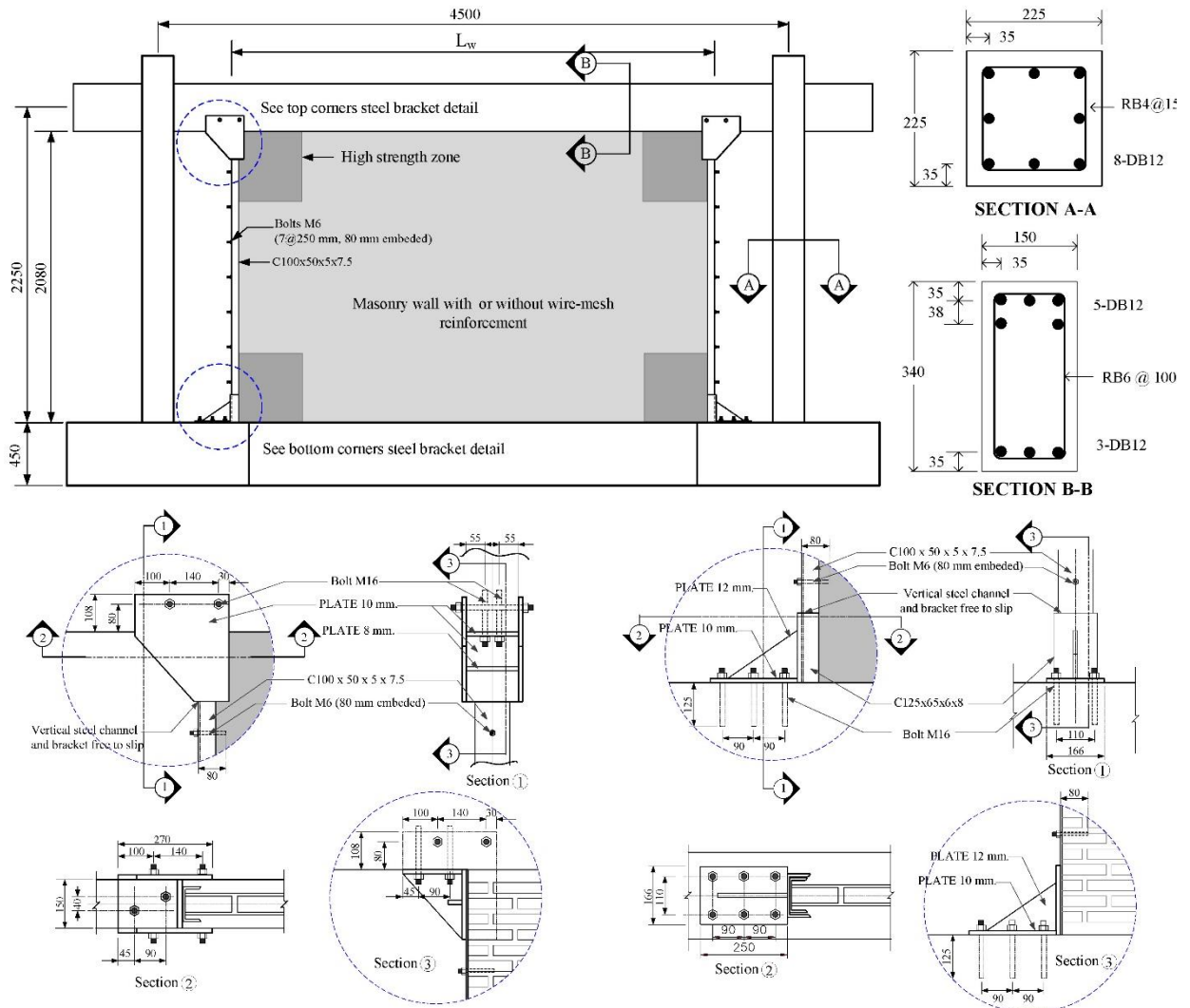
cross diamond-braced pattern

รูปที่ 2.2-3 รูปแบบการเสริมกำลังโครงสร้างดัดที่มีผนังอิฐก่อด้วย CFRP (Yuksel และคณะ 2010)

Erol และคณะ (2012) ทำการทดสอบตัวอย่างโครงสร้างแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่มี 1 ช่วงเสา 1 ชั้น ขนาด 1/2 เท่าของขนาดโครงสร้างจริง โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นประเภทที่มีความเหนียวจำกัด จำนวน 6

ตัวอย่าง โดยใช้แผ่น CFRP ในการเสริมกำลังผนังอิฐก่อหลายรูปแบบ จากผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังโดยแผ่น CFRP ทำให้กำลังต้านทานแรงสูงสุดและสติเฟนเนสของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมด้วยแผ่น CFRP ประมาณ 0.23-0.79 เท่า และ 0.77-1.62 เท่า ตามลำดับ

เมื่อใช้วิธีการเสริมกำลังแบบต่าง ๆ ดังที่กล่าวข้างต้นสามารถทำให้ตัวอย่างทดสอบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยมีความสามารถในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้วิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มสมรรถนะให้กับตัวอย่างทดสอบได้แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้มีราคาค่อนข้างสูงและขั้นตอนการติดตั้งวัสดุดังกล่าวมีความซับซ้อนต้องอาศัยความชำนาญของผู้ติดตั้ง อีกทั้งวิธีการปรับปรุงโครงสร้างในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาการวิบัติของเสาและบริเวณจุดต่อระหว่างเสากับคานเนื่องจากแรงที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังกับโครงอาคาร จากเหตุผลดังกล่าว [Srechai และ Lukkunaprasit \(2013\)](#) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยการแยกผนังออกจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและปรับปรุงวิธีการถ่ายแรงจากผนังไปสู่โครงต้านแรงดัดโดยใช้หูช้างเหล็ก (steel brackets) ดังแสดงในรูปที่ 2.2-4 ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าสามารถปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างให้ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยพบว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง เมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างทดสอบจะเกิดการแตกร้าวของผนังอิฐก่อบริเวณมุมที่รับแรงอัดและมีปูนฉาบหลุดร่อนออกมา โดยสามารถสังเกตเห็นการแตกร้าวนี้ได้ตั้งแต่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเพียงร้อยละ 0.25 ของความสูง ที่ตำแหน่งระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเดียวกันสามารถเห็นรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear crack) ในเสา ซึ่งรอยร้าวดังกล่าวมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อผนังอิฐก่อบริเวณมุมที่รับแรงอัดมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับร้อยละ 0.33 ของความสูง และกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนการทดสอบตัวอย่างที่มีการปรับปรุงโครงสร้าง พบว่าโครงอาคารมีสมรรถนะที่ดีขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับร้อยละ 1.25 ของความสูงและกำลังต้านทานแรงทางด้านข้างค่อยๆ ลดลงอย่างช้า ๆ กำลังต้านทานแรงด้านข้างของตัวอย่างทดสอบลดลงร้อยละ 20 ของกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างร้อยละ 1.5 ของความสูง ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าเดียวกันนี้ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างถึง 5 เท่า ทั้งนี้ไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนในเสาและจุดต่อเสากับคาน แม้ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสูงถึงร้อยละ 2.0 ของความสูง ก็จะมีเพียงการแตกร้าวในแนวทแยงขนาดใหญ่หลายรอยในผนังอิฐก่อ แต่ในส่วนของเสามีเพียงการแตกร้าวอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัด (flexural crack) และรอยแตกร้าวขนาดเล็กอันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือน (flexural-shear crack) จะเห็นได้ว่าวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อที่เสนอโดย [Srechai และ Lukkunaprasit \(2013\)](#) เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการปรับปรุงโครงสร้างที่เสนอโดย [Srechai และ Lukkunaprasit \(2013\)](#) นั้นยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.2-4 กลไกการถ่ายแรงระหว่างผนังอิฐก่อและโครงด้านแรงดัด (Srechai และ Lukunprasit 2013)

2.3 อิฐและลักษณะการก่อสร้างอาคารทั่วไปที่ใช้ผนังอิฐก่อในประเทศไทย

งานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับ ชนิดและคุณสมบัติทางกลของอิฐก่อ รูปแบบการก่อและการเสริมเหล็กในผนัง ผนังอิฐมีการก่อสร้างด้วยอิฐหลากหลายชนิด เช่น อิฐมอญ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา (รูปที่ 2.3-1) ในการก่อและฉาบผนังทั้งปูนก่อและปูนฉาบก็มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสะดวกในการทำงานและความต้องการของช่าง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงกำลังของวัสดุ ด้วยปัจจัยข้างต้น จึงส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของผนังอิฐมีความแตกต่างกัน จากการรวบรวมข้อมูลและการทดสอบของ **กาญจนาภิ (2559)** และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ (f'_m) มีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (3 – 10 MPa) และค่าอีลาสติกโมดูลัสของอิฐก่อ (E_m) มีค่าอยู่ในช่วง 5000 ถึง 70000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (500-7000 MPa) โดยค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างค่าอีลาสติกโมดูลัสและกำลังอัดสำหรับ ปริซึมอิฐก่อที่มีปูนฉาบมีค่าประมาณ 650 หรือ $E_m = 650f'_m$



อิฐมอดุตัน (ขนาดที่นิยมใช้คือ 3×
16×14 เซนติเมตร)



อิฐบล็อก (ขนาดที่นิยมใช้คือ
7× 19×39 เซนติเมตร)



อิฐมวลเบา (ขนาดที่นิยมใช้คือ
7.5×20×60 เซนติเมตร)

รูปที่ 2.3-1 ประเภทของอิฐที่ใช้ในงานก่อสร้างผนังโดยทั่วไป (กาญจนิก 2559)

ลีลาทวิวัฒน์ และคณะ (2561) ได้ทำการสำรวจลักษณะการก่อสร้างอาคารที่ใช้ผนังอิฐก่อ ในสามพื้นที่คือ กรุงเทพมหานคร และพื้นที่ในบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงจากภัยแผ่นดินไหว ได้แก่ อ.เมืองตาก จ.ตาก และเขตพื้นที่ ตำบลแม่ลาว ตำบลปากอดำ และ อ.เมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย ซึ่งกลุ่มอาคารที่ได้สำรวจมีตั้งแต่อาคารที่พักอาศัย โรงเรียน และอาคารพาณิชย์ **รูปที่ 2.3-2** และ **รูปที่ 2.3-3** แสดงตัวอย่างการก่อสร้างอาคารในพื้นที่ต่าง ๆ ขั้นตอนการสำรวจประกอบด้วย การเก็บลักษณะทางกายภาพของอาคาร มิติที่สำคัญต่าง ๆ อาทิ ความสูง ช่วงเสา ฯลฯ การเก็บลักษณะการก่อสร้างผนังได้แก่ ประเภทอิฐ ความหนาปูนก่อ ความหนาปูนฉาบ การใช้และรายละเอียดของเสาเอ็น คานทับหลัง และการสอบถามข้อมูลวิธีการก่อสร้างผนังอิฐก่อจากช่างท้องถิ่นที่พบ นอกจากการสำรวจสถานที่ก่อสร้าง **ลีลาทวิวัฒน์ และคณะ (2561)** ยังได้ทำการรวบรวมแบบก่อสร้างของอาคารที่ใช้ในการขออนุญาตก่อสร้าง ที่เทศบาลตำบลปากอดำและเทศบาลดงมาดะ ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี 2553 จนถึงปี 2558 จากข้อมูลที่ทำการศึกษาการก่อสร้างอาคารข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า อิฐที่ได้รับความนิยมได้แก่ อิฐมอดุตัน อิฐบล็อก ขนาด 7×19×39 เซนติเมตร และอิฐมวลเบาประเภทอบไอน้ำ ขนาด 7.5×20×60 เซนติเมตร โดยมีการใช้อย่างแพร่หลายพอๆ กัน ลักษณะการก่อสร้างอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางที่มีความสูงไม่เกิน 4 ชั้น สามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.3-1



รูปที่ 2.3-2 อาคารที่ใช้อิฐมอดุตันในการก่อสร้างผนัง (ลีลาทวิวัฒน์ และคณะ 2561)



รูปที่ 2.3-3 อาคารที่ใช้อิฐบล็อกในการก่อสร้างผนัง (ลีลาทวีวัฒน์ และคณะ 2561)

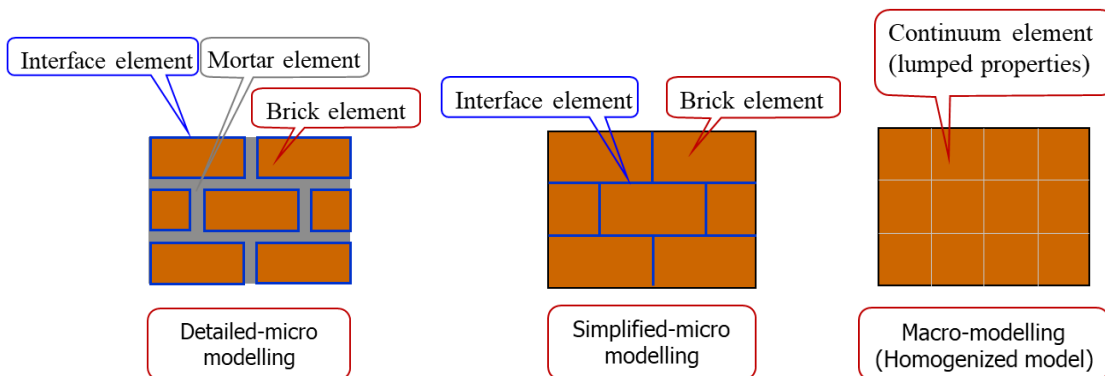
ตารางที่ 2.3-1 สรุปผลที่ได้จากการสำรวจอาคาร (ลีลาทวีวัฒน์ และคณะ 2561)

หัวข้อ	ผลที่ได้จากการสำรวจ
ประเภทอิฐที่ได้รับความนิยม	- อิฐมอญมือต้น ขนาด 14x6x4 ซม. - อิฐมอญใหญ่ ขนาด 19x9x6 ซม. - อิฐบล็อก ขนาด 39x19x7 ซม. - อิฐมวลเบาแบบอบไอน้ำ ขนาด 30x20x7 ซม.
ความยาวจากเสาถึงเสา	3 และ 4 เมตร
ความสูงจากพื้นถึงท้องพื้นชั้นบน	3 เมตร
ขนาดและหน้าตัดเหล็กเสาเอ็น	ขนาด 15-20 ซม. 2-RB6 เหล็กปลอก RB6@15 ซม.
ขนาดและหน้าตัดและเหล็กคานทับหลัง	ขนาด 10-20 ซม. 2-RB6 เหล็กปลอก RB6@15 ซม.
ขนาดและระยะห่างเหล็กหมวดกึ่ง	RB6 ระยะห่างขึ้นอยู่กับประเภทอิฐ -อิฐมอญและอิฐบล็อก ชั้นแรกห่าง 20 ซม.จากพื้น ชั้นถัดไป 40 ซม. -อิฐบล็อกตันเล็ก ชั้นแรกห่าง 25 ซม. ชั้นถัดไป 50 ซม. (กล่าวคือ ชั้นแรกเว้นเท่าไร ชั้นถัดๆไปจะคูณ2ของชั้นแรก)
ระยะฝังเหล็กหมวดกึ่งในเสา	เหล็กยาว 50 ซม. ฝังในเสา 10 ซม. โผล่ 40 ซม. (เฉพาะที่ จ.เชียงราย จะใช้น้ำยา Epoxy ปูนขาว weber ทาบริเวณระยะฝัง)
ความหนาปูนก่อ (แนวตั้ง/แนวราบ)	แนวตั้ง 1-2 ซม. / แนวราบ 2-3 ซม.
ความหนาปูนฉาบ	2-3 ซม.
อัตราส่วนผสมปูนก่อ	ทรายหยาบ 8-12 ถัง / ปูน 1 กระสอบ
อัตราส่วนผสมปูนฉาบ	ทรายละเอียด 12-15 ถัง / ปูน 1 กระสอบ

2.4 แบบจำลองคอมพิวเตอร์ของโครงสร้างแรงตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

โครงสร้างแรงตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อเป็นระบบโครงสร้างที่มีความซับซ้อน ภายใต้แรงกระทำด้านข้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวจะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง อันเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ (material nonlinearity) เช่น การแตกร้าวของผนังอิฐ การแตกร้าวของคอนกรีตในเสาและคาน การครากและโก่งเดาะของเหล็กเสริม ฯลฯ อีกทั้งยังมีปัจจัยที่สำคัญคือความไม่ต่อเนื่องระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้างดัดที่ล้อมรอบ (Torrasi และคณะ 2012) นอกเหนือจากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแรงตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยการทดสอบแล้ว การศึกษาโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นอีกวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถศึกษารายละเอียดต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม เช่น แรงภายในและความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างและผนัง มีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดต้นทุนในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ใช้จำเป็นต้องพัฒนาขึ้นอย่างถูกต้องเหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง ที่ผ่านมามีการจำลองผนังอิฐก่อด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จึงมีหลากหลายรูปแบบ มีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองรวมถึงให้ผลการวิเคราะห์ในระดับที่แตกต่างกันด้วย Lourenco (1996) ได้แบ่งประเภทของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับผนังอิฐก่อออกเป็น 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4-1 แบบจำลองในแต่ละระดับจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

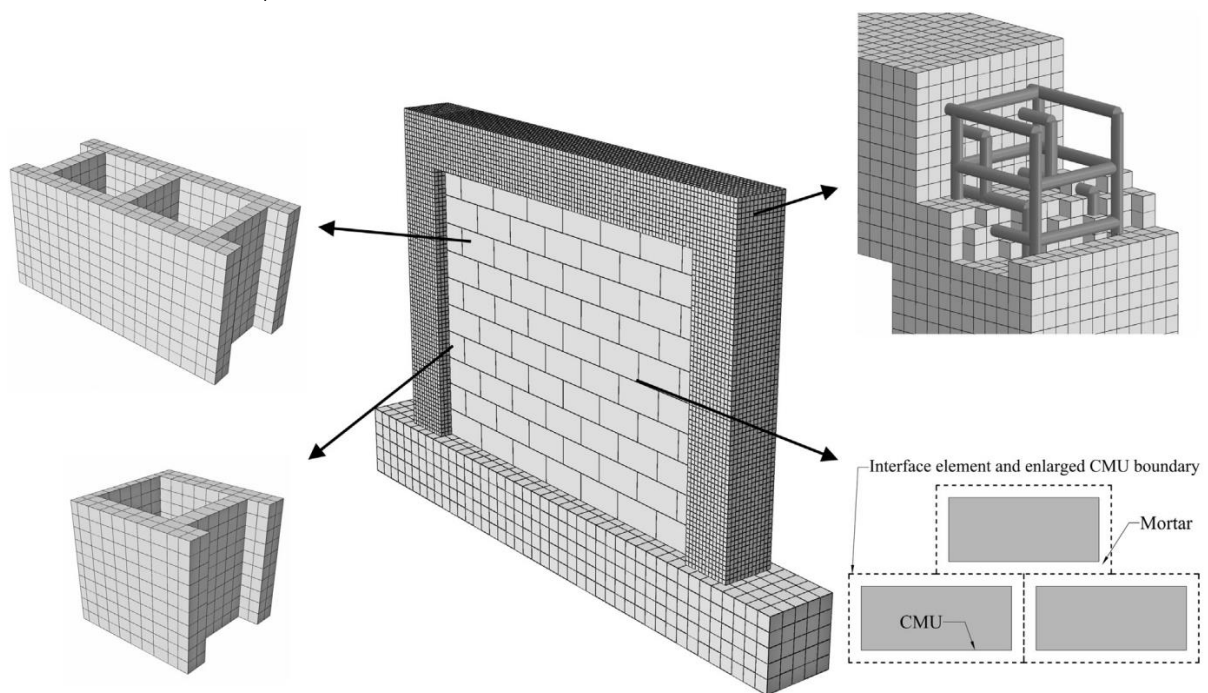
- 1) Detailed-micro modelling แบบจำลองในระดับนี้จะพิจารณาให้อิฐ ปูนก่อ และจุดต่อระหว่างอิฐและปูนก่อเป็นเอลิเมนต์ที่มีคุณสมบัติและพฤติกรรมที่แตกต่างกัน จากนั้นใช้ interface element เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างแต่ละเอลิเมนต์
- 2) Simplified-micro modelling หรือ meso-modelling เพื่อลดความยุ่งยากและจำนวนเอลิเมนต์แบบจำลองในระดับนี้จะรวมคุณสมบัติทางกลของอิฐและปูนก่อเข้าด้วยกัน (lumped mechanical property) และจำลองให้เป็นเอลิเมนต์เดียว จากนั้นใช้ interface element เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเอลิเมนต์เหล่านั้นเพื่อจำลองพฤติกรรมของจุดต่อระหว่างอิฐและปูนก่อ
- 3) Macro-modelling (Homogenized model) แบบจำลองรูปแบบนี้มีความซับซ้อนน้อยที่สุด จึงมีความสะดวกในการสร้างแบบจำลองและใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย โดยจะรวมคุณสมบัติทางกลของอิฐและปูนก่อเข้าด้วยกัน (lumped mechanical property) และจำลองให้เป็นเอลิเมนต์เดียว โดยไม่มีการพิจารณาผลกระทบของรอยต่อระหว่างอิฐและปูนก่อ (ไม่มี interface element)



รูปที่ 2.4-1 แบบจำลองผนังอิฐก่อแบบ Detailed-micro Simplified-micro และ Macro modelling

แบบจำลองทั้ง 3 ระดับสามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างอิฐก่อได้ทั้งในรูปแบบ 2 และ 3 มิติ Mohyeddin และคณะ (2013) Nasiri และ Liu (2017) และ Nasiri และ Liu (2019) จำลองโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐด้วยแบบจำลอง FEA แบบ 3 มิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงทั้งในระนาบและนอกระนาบ โดยจำลองผนังอิฐด้วย แบบจำลอง simplified-micro model ด้วย solid element และ interface element ดังแสดงในรูปที่ 2.4-2 ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งกรณีแรงในระนาบและนอกระนาบ สามารถจำลองความไม่ต่อเนื่องระหว่างผนังอิฐและโครงสร้างแรงดัดได้ กรณีที่มีช่องเปิดในผนังอิฐก่อแบบจำลองก็สามารถจำลองพฤติกรรมได้ในระดับดี อย่างไรก็ตามพบว่าคุณสมบัติเชิงกลที่จำเป็นของ interface element เช่น พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับพื้นผิวการวิบัติ (failure surface parameter) และมุมของการเสียรูป (dilation angle) มีผลกระทบที่สำคัญต่อกำลังสูงสุด ความสติเฟ่นสหลังการแตกร้าวและพฤติกรรมในช่วงที่เลยจุดที่ผนังอิฐก่อมีกำลังสูงสุดไปแล้ว

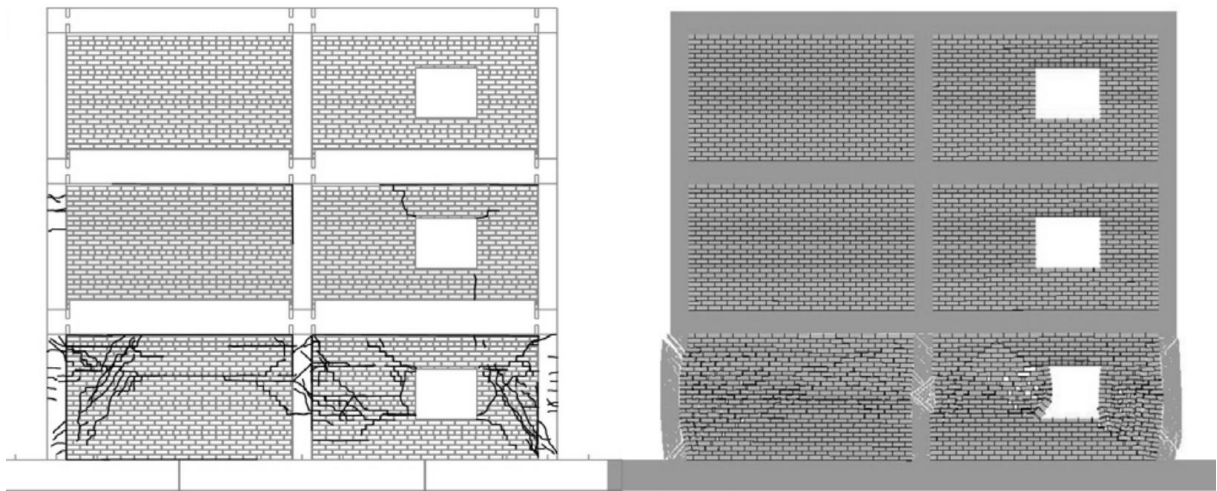
Yuen และ Kuang (2015) ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete-finite element method) 3 มิติ จำลองโครงสร้างแรงดัดที่มีผนังอิฐเพื่อศึกษาผลตอบสนองและรูปแบบความเสียหายของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยพิจารณาผลกระทบของช่องเปิดในผนังและโครงสร้างที่มีลักษณะชั้นล่างอ่อน (soft story) ในส่วนของผนังอิฐใช้แบบจำลองระดับ simplified-micro model จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองพบว่ามีความสอดคล้องกันในระดับดี ทั้งผลตอบสนองโดยรวมของโครงสร้างและความเสียหายเฉพาะจุดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.4-2 แบบจำลองโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐ 3 มิติ (Nasiri และ Liu (2017))

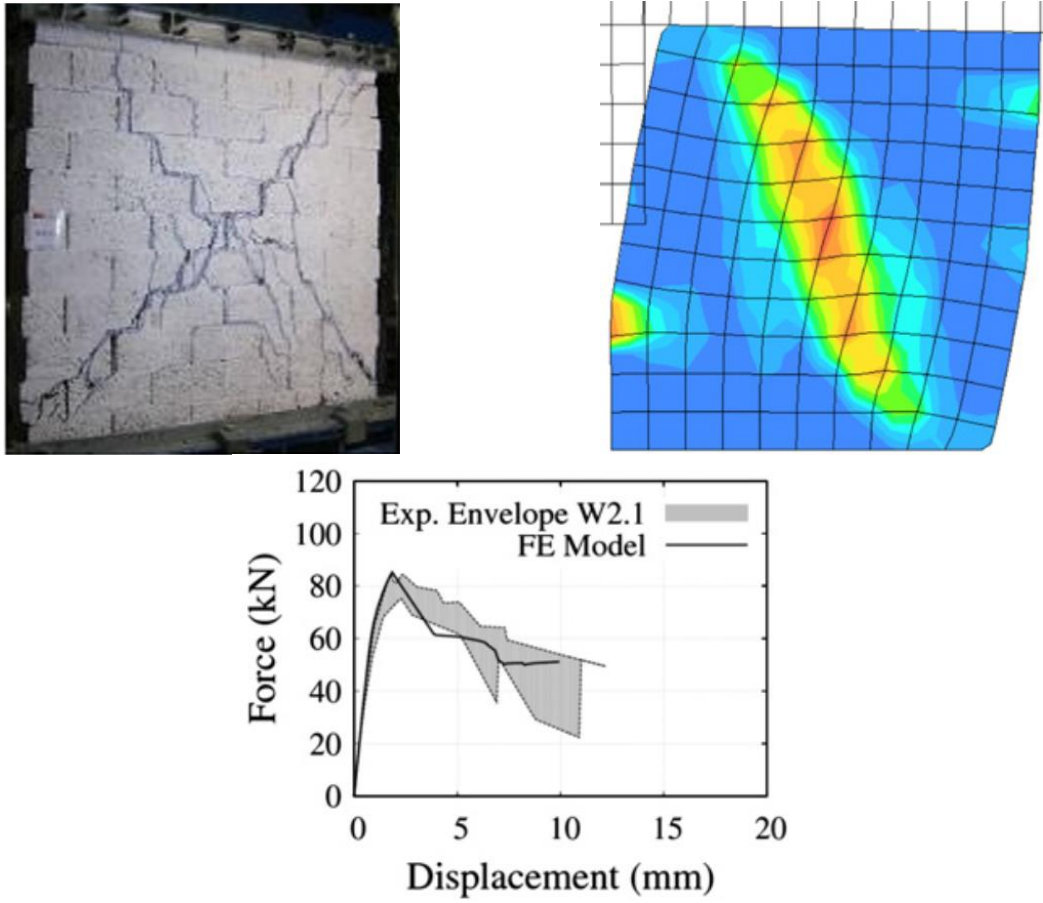
อย่างไรก็ตามแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิตินั้นจะมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์มากกว่าแบบจำลองแบบ 2 มิติ ในกรณีที่ไม่มีพิจารณาผลของแรงนอกระนาบเนื่องจากผนังอิฐมีความหนาแน่นเมื่อเทียบกับความกว้างและความสูงของผนัง ดังนั้นจึงสามารถจำลองโดยใช้แบบจำลองในรูปแบบ 2 มิติได้

Ozturkoglu และคณะ (2017) แบบจำลองในลักษณะนี้จึงได้รับความนิยมเนื่องจากใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลน้อยกว่าแบบ 3 มิติ จากงานวิจัยในอดีตพบว่าแบบจำลองประเภทนี้สามารถให้ผลการวิเคราะห์อยู่ในระดับที่ดี แบบจำลองโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐแบบ 2 มิติ จะจำลอง เสา คาน และผนังอิฐก่อด้วยเอลิเมนต์ที่สามารถต้านความเค้นได้เฉพาะในระนาบ (plane stress element) จำลองเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยเอลิเมนต์ 1 มิติ (line element) และจำลองจุดต่อในผนังและจุดต่อระหว่างผนังกับโครงต้านแรงดัดด้วยเอลิเมนต์ที่ไม่มี ความหนาทางกายภาพ (zero-thickness interface element) โดยปกติแบบจำลองที่จำลองผนังอิฐด้วยแบบจำลองระดับ detail และ simplified micro modelling มักนิยมใช้ในกรณีที่รอยต่อระหว่างอิฐและปูนก่อมีผลกระทบที่ชัดเจนต่อพฤติกรรมโดยรวมของผนังและโครงต้านแรงดัด เช่น ในกรณีที่เกิดรอยแตกร้าวของผนังตามแนวปูนก่อในลักษณะการเลื่อนไถล (sliding) ซึ่งการจำลองผนังในรูปแบบนี้จะสามารถทำนายรูปแบบการแตกร้าวและกำลังต้านทานแรงของผนังได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ เช่นในงานวิจัยของ Lotfi และ Shing (1994) Mehrabi และ Shing (1997) Lourenco และ Rots (1997) Oliveira และ Lourenco (2004) Stavridis และ Shing (2010) Koutromanos และคณะ (2011) และ Sattar (2013) ตัวอย่างรูปแบบความเสียหายจากการวิเคราะห์ที่จำลองผนังอิฐด้วยแบบจำลองระดับ micro model เทียบกับผลการทดสอบจากการศึกษาของ Koutromanos และคณะ (2011) แสดงในรูปที่ 2.4-3



รูปที่ 2.4-3 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจากการศึกษาของ (Koutromanos และคณะ 2011)

ในกรณีที่ผนังอิฐก่อมีคุณสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางไม่แตกต่างกันมากนัก (low level degree of anisotropy) หรือกรณีที่รอยต่อระหว่างอิฐและปูนก่อมีผลกระทบต่อพฤติกรรมโดยรวมของผนังอิฐเพียงเล็กน้อย แบบจำลองในระดับ macro-modelling (homogenized model) ซึ่งมีความซับซ้อนน้อย สะดวกในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว สามารถใช้ในการจำลองพฤติกรรมของผนังอิฐ โดยแบบจำลองในระดับนี้สามารถทำนายรูปแบบความเสียหายและความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างได้ในระดับที่น่าพอใจ ยกตัวอย่างเช่นผลการศึกษาของ Basili และคณะ (2016) และผลการศึกษาของ Medeiros และคณะ (2013) ดังแสดงในรูปที่ 2.4-4



รูปที่ 2.4-4 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจากการศึกษาของ (Medeiros และคณะ 2013)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

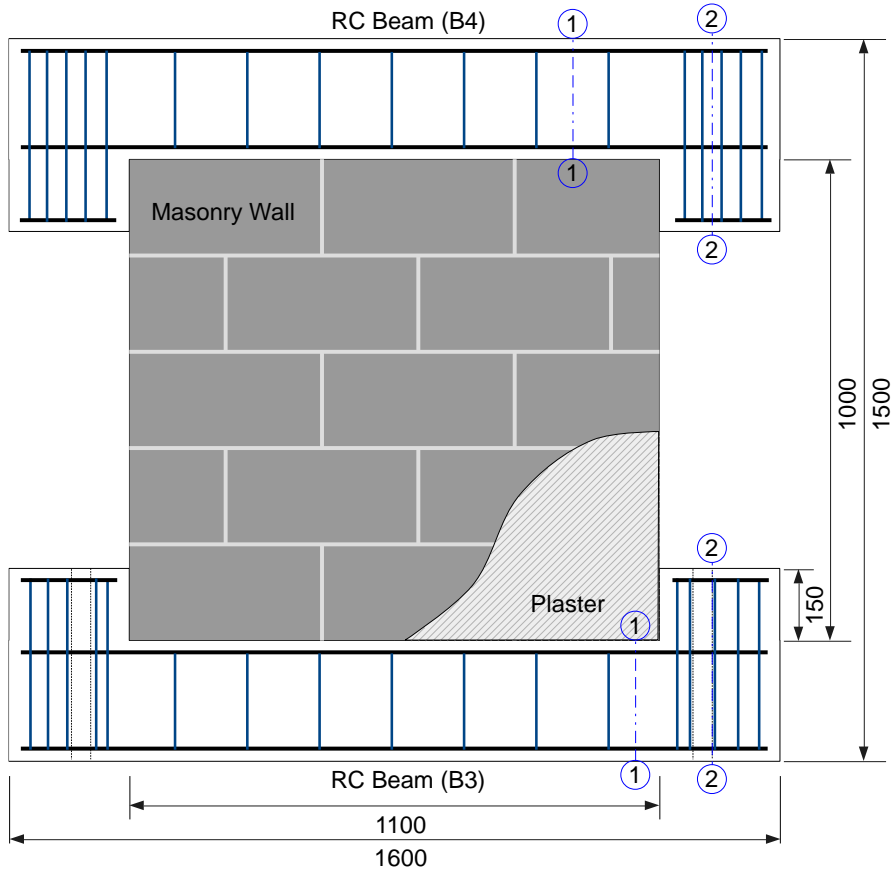
โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ และลดความเสียหายที่จะเกิดกับเสาและจุดต่อเสาคานที่ล้อมรอบผนังอิฐก่อ โดยใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Computer Modeling)

3.1 ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

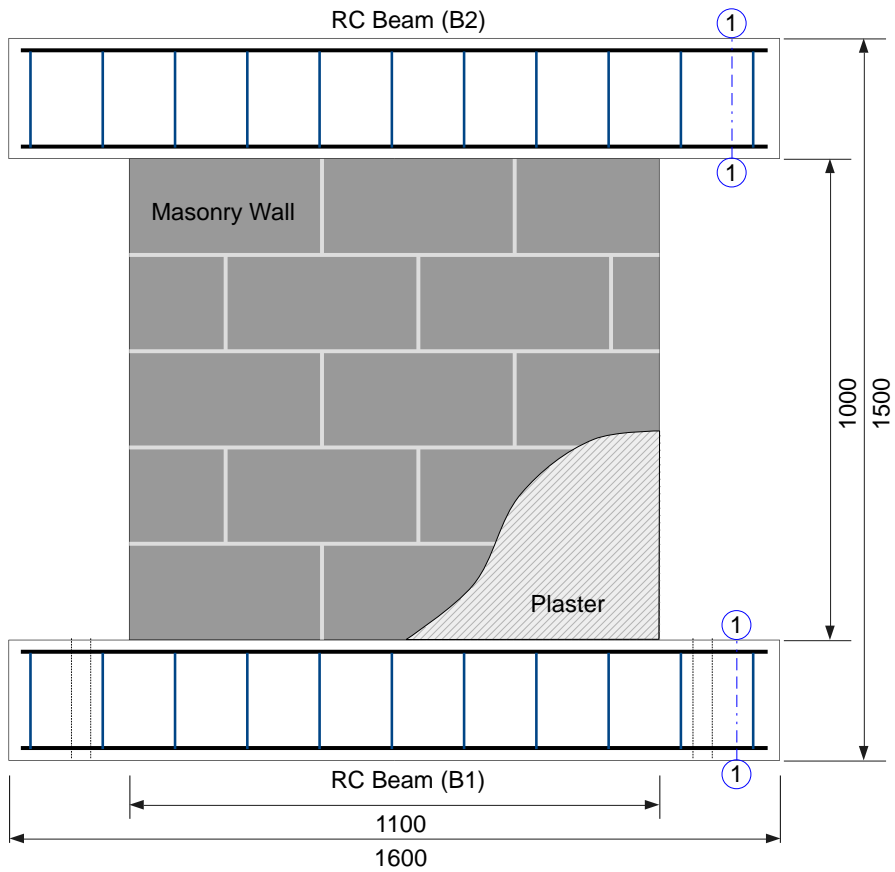
การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบดำเนินการโดยเริ่มจากการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติเชิงกลของอิฐก่อ จุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการใช้กันโดยทั่วไปในงานก่อสร้าง รวมไปถึงเทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งถ่ายแรงจากผนังไปสู่โครงต้านแรงดัดโดยรอบตั้งอธิบายในบทก่อนหน้า จากนั้นจะทำการศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงทางด้านข้างของผนังอิฐก่อ โดยทำการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดเล็กของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและคานแบบที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้แรงทางด้านข้างในระนาบแบบวัฏจักร (in-plane lateral cyclic loading) โดยใช้วิธีการให้แรงแบบควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) เพื่อใช้เป็นต้นแบบและนำข้อมูลผลการทดสอบมาใช้ในการพัฒนาวิธีการออกแบบจุดต่อระหว่างผนังและคานให้มีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงที่ดีขึ้น จากนั้นจะทำการศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงแผ่นดินไหวของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังแบบต่าง ๆ โดยทำการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดเล็กของผนังอิฐก่อเช่นเดียวกับการทดสอบในขั้นก่อนหน้า

3.1.1 การออกแบบและเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การออกแบบตัวอย่างผนังอิฐก่อที่จะใช้ในการทดสอบ จะกำหนดให้ตัวอย่างผนังอิฐก่อที่ใช้ในการทดสอบเป็นผนังที่ก่อด้วยอิฐบล็อกและฉาบผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยปูนฉาบหนา 1.5 ถึง 2.0 เซนติเมตร และมีความหนาโดยรวมของผนังประมาณ 9.5 ถึง 10.0 เซนติเมตร ตัวอย่างผนังอิฐก่อมีขนาดความสูง 1.0 เมตร และความกว้าง 1.1 เมตร มีคานคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณขอบล่างของผนังเพื่อใช้เป็นฐานในการยึดกับโครงเฟรมเหล็ก (strong frame) ในขณะทดสอบ และคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านบนซึ่งจำลองส่วนของคานที่มีในโครงสร้างอาคารโดยทั่วไป โดยกำหนดให้มีลักษณะการส่งถ่ายแรงต้านจากผนังอิฐก่อไปยังโครงต้านแรงดัดโดยรอบสองรูปแบบ กล่าวคือ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 (SP1) ใช้หูช้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อจำลองส่วนของเสาในโครงต้านแรงดัดเพื่อทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด โดยมีรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1-1 และตัวอย่างทดสอบที่ 2 (SP2) กำหนดให้แรงต้านจากผนังส่งถ่ายไปยังโครงต้านแรงดัดโดยผ่านจุดสัมผัสระหว่างผนังอิฐก่อและคานเพียงอย่างเดียวรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1-2 ตัวอย่าง SP2 เป็นการจำลองโครงสร้างในกรณีที่มีช่องว่างระหว่างผนังอิฐก่อและเสาเพื่อลดแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและเสาซึ่งเป็นสาเหตุของการวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสา

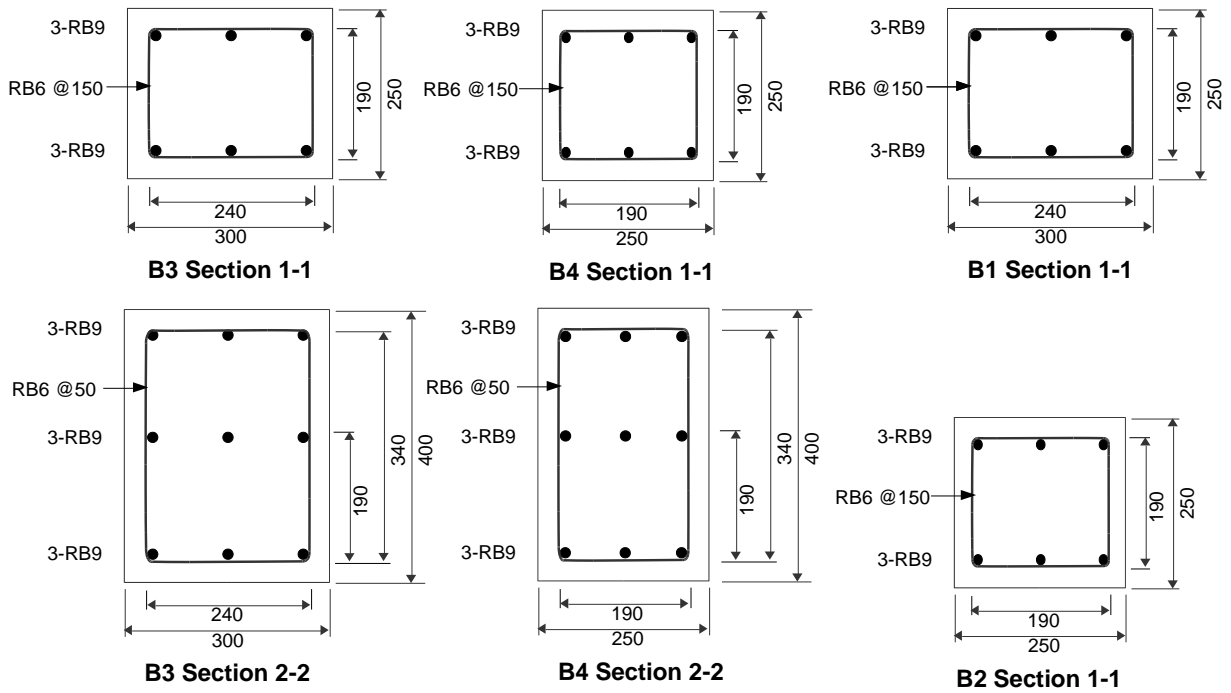


รูปที่ 3.1-1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1 (SP1)



รูปที่ 3.1-2 ตัวอย่างทดสอบที่ 2 (SP2)

ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านบนและด้านล่างแสดงดังรูปที่ 3.1-3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 ที่เตรียมเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.1-4 และ รูปที่ 3.1-5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1-3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.1-4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP1

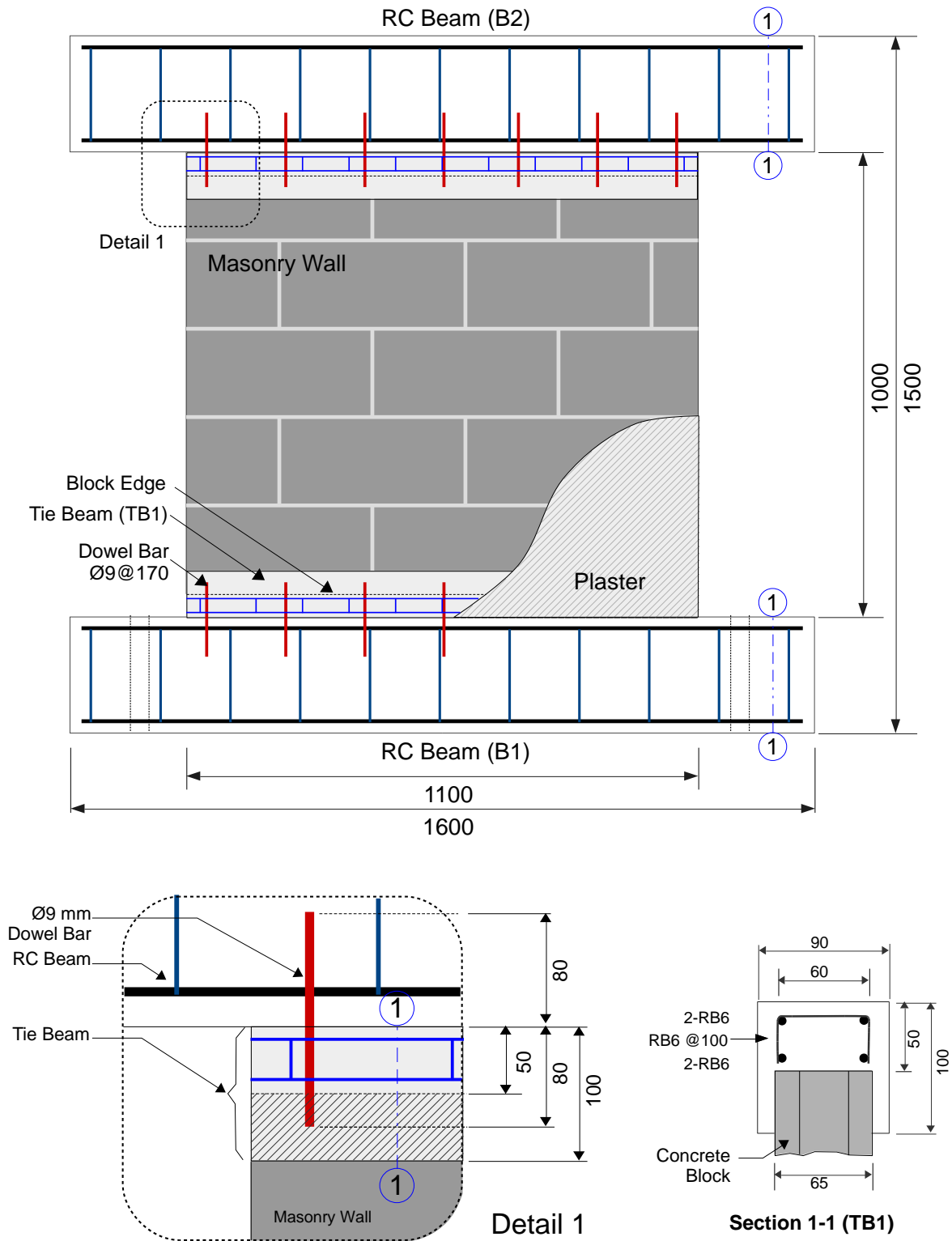


รูปที่ 3.1-5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP1

ผู้วิจัยได้ศึกษาวิธีการประเมินกำลังรับแรงของผนังอิฐก่อเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบจุดต่อระหว่างผนังและคานให้สามารถส่งถ่ายแรงได้อย่างเหมาะสม ศึกษาวิธีการออกแบบจุดต่อแบบต่าง เช่น เตี้ยเหล็กต้านแรงเฉือน (steel shear dowel) หูช้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete bracket) เพื่อใช้เป็นแนวทางปรับปรุงจุดต่อระหว่างผนังอิฐและคาน โดยได้ทำการออกแบบวิธีการเสริมกำลังจุดต่อจำนวน 2 รูปแบบ ดังนี้

- 1) ตัวอย่างทดสอบที่ 3 (SP3) ทำการปรับปรุงการส่งถ่ายแรงจากผนังอิฐไปสู่คานด้านบนและล่างโดยใช้เตี้ยเหล็กต้านแรงเฉือน (steel shear dowels) ร่วมกับคานทับหลัง (tie beams) แสดงดังรูปที่ 3.1-6 โดยจะทำการเจาะรูที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กและฝังเหล็กเตี้ยในคานโดยใช้อีพ็อกซี่ (epoxy) เป็นตัวประสานระหว่างคอนกรีตและเหล็กเตี้ย จากนั้นจะตั้งแบบหล่อคานทับหลังและติดตั้งเหล็กเสริมสำหรับคานทับหลังและเติมด้วยมอร์ตาร์เพื่อให้หุ้มเหล็กเตี้ยโดยมีความหนาประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร จากนั้นทำการก่ออิฐและเติมมอร์ตาร์เพื่อหุ้มส่วนที่เหล็กเตี้ยฝังในผนังอิฐเพื่อเพิ่มความแข็งแรง รายละเอียดและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1-7
- 2) ตัวอย่างทดสอบที่ 4 (SP4) การปรับปรุงการส่งถ่ายแรงจากผนังอิฐไปสู่คานด้านบนและล่างโดยใช้เตี้ยเหล็กต้านแรงเฉือน (steel shear dowels) ร่วมกับคานทับหลังและหูช้าง โดยที่ไม่มีการเสริมเหล็กในคานทับหลังและหูช้างดังแสดงดังรูปที่ 3.1-8 โดยจะทำการเจาะรูที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กและฝังเหล็กเตี้ยในคานโดยใช้อีพ็อกซี่เป็นตัวประสานระหว่างคอนกรีตและเหล็กเตี้ยเช่นเดียวกับตัวอย่าง SP3 จากนั้นจะตั้งแบบหล่อคานทับหลังและหูช้าง และเติมด้วยมอร์ตาร์เพื่อให้หุ้มเหล็กเตี้ยโดยมีความหนาประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร จากนั้นทำการก่ออิฐและเติมมอร์ตาร์เพื่อหุ้มส่วนที่เหล็กเตี้ยฝังในผนังเพื่อเพิ่มความแข็งแรง รายละเอียดและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1-9

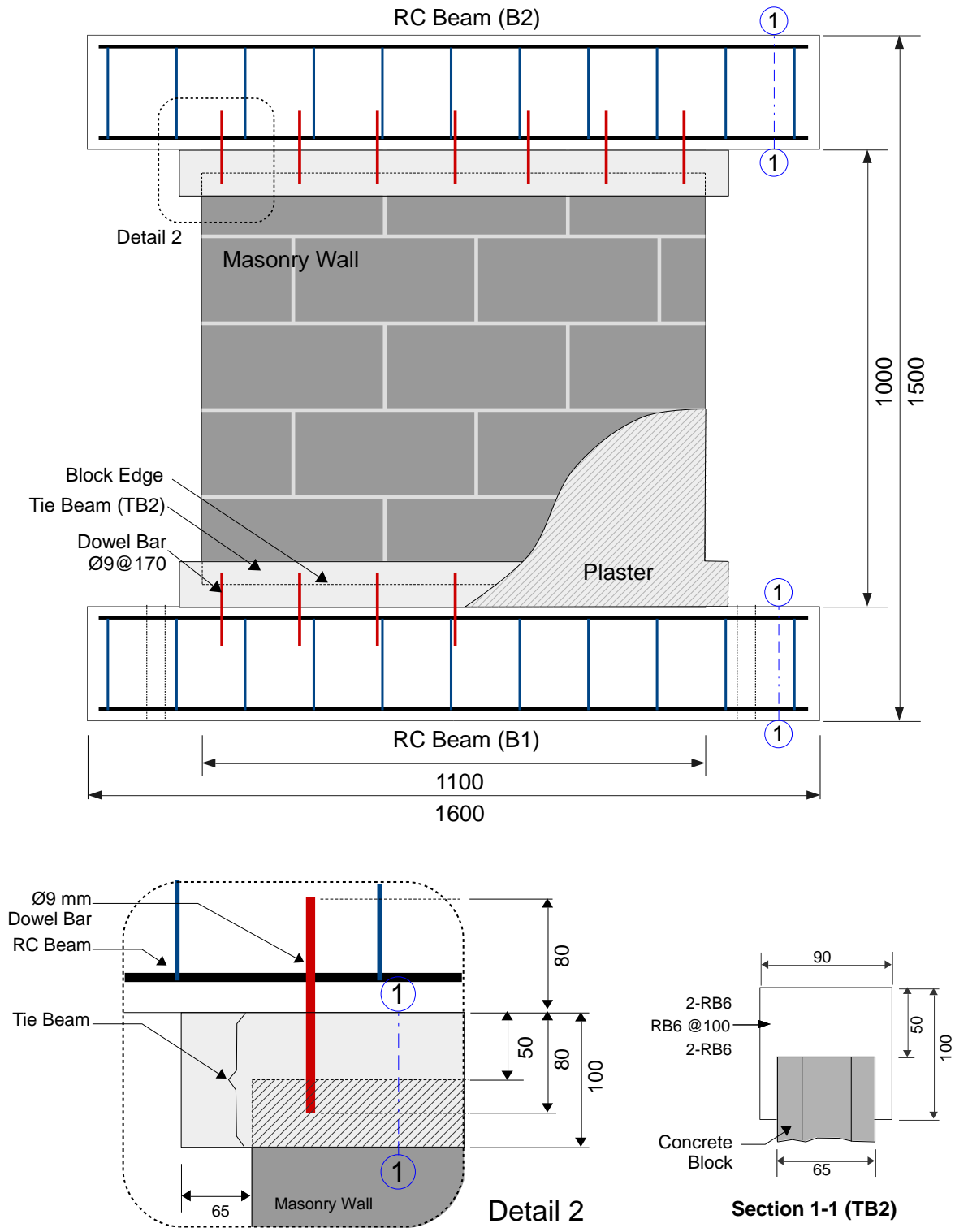
ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ SP3 และ SP4 แสดงดังรูปที่ 3.1-3



รูปที่ 3.1-6 ตัวอย่างทดสอบที่ 3 (SP3)



รูปที่ 3.1-7 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP3



รูปที่ 3.1-8 ตัวอย่างทดสอบที่ 4 (SP4)



รูปที่ 3.1-9 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ SP4

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ (prisms) ที่มีการฉาบผิวหน้าทั้งสองด้านตามมาตรฐาน ASTM C1314 ทั้งทิศทางตั้งฉากและขนานกับแนวก่อ (bed-joint) โดยใช้ตัวอย่างอิฐก่อที่มีขนาด 40 × 40 หน้า 10 เซนติเมตร ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 / C39M โดยใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ก่อและฉาบผนังตามมาตรฐาน ASTM C109 / C109M และทดสอบกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (yield strength) และกำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate strength) ของเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 9 มิลลิเมตร (RB6 และ RB9) ตามมาตรฐาน ASTM A370 กำลังอัดของอิฐก่อ คอนกรีต มอร์ตาร์ และกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1-1

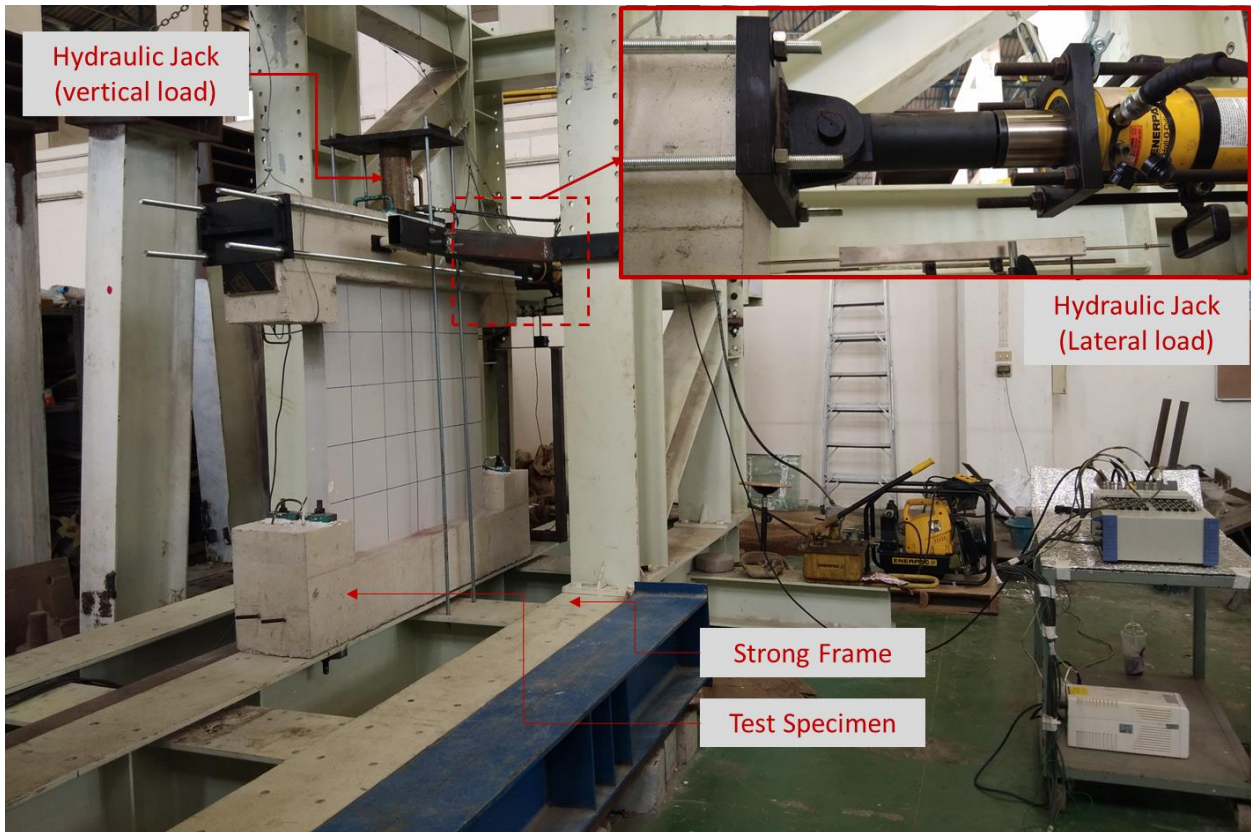
ตารางที่ 3.1-1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

คุณสมบัติ	(MPa)
กำลังอัดของอิฐก่อในแนวตั้งฉากกับแนวก่อ (f_m)	5.91
กำลังอัดของอิฐก่อในแนวขนานกับแนวก่อ (f_{mb})	4.90
กำลังอัดของคอนกรีต (f_c)	10.19
กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ก่อ (f_{cm})	10.00
กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ฉาบ (f_{cp})	6.87
กำลังดึงที่จุดครากของเหล็ก (f_y)	
RB6	328
RB9	309
กำลังดึงสูงสุดของเหล็ก (f_u)	
RB6	436
RB9	397

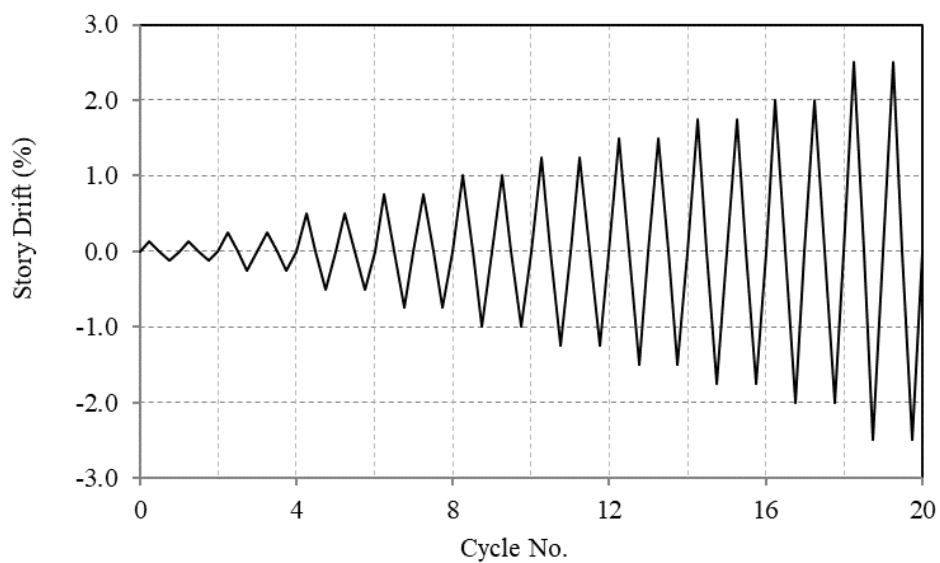
3.1.2 การทดสอบผนังอิฐก่อ

การทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดเล็กของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและคานแบบที่มีและไม่มีเสริมกำลังภายใต้แรงทางด้านข้างในระนาบแบบวัฏจักร (in-plane lateral cyclic loading test) จะใช้วิธีการให้แรงโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) การทดสอบจะใช้โครงเฟรมเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง (strong frame) ดังแสดงในรูปที่ 3.1-10 ในการยึดตัวอย่างทดสอบให้อยู่กับที่และยึดชุดกระบอกไฮดรอลิกสำหรับให้แรงด้านข้างต่อตัวอย่างทดสอบ ลักษณะการจับยึดตัวอย่างและอุปกรณ์ให้แรง (test setup) แสดงดังรูปที่ 3.1-10 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงกระทำในแนวตั้ง (vertical load) มีค่าคงที่เท่ากับร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดของผนัง ($0.1f'_m A_g$) เมื่อ A_g คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของผนังอิฐก่อ และกำหนดให้แรงกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างของผนัง แรงด้านข้างกำหนดให้เป็นแบบวัฏจักรหรือแรงสลับทิศ กล่าวคือการให้แรงแบบผลัดไปด้านหนึ่งและดึงกลับในทิศทางตรงข้ามเป็นวงรอบ โดยการค่อย ๆ เพิ่มระยะผลัดและดึงขึ้นจนกระทั่งตัวอย่าง

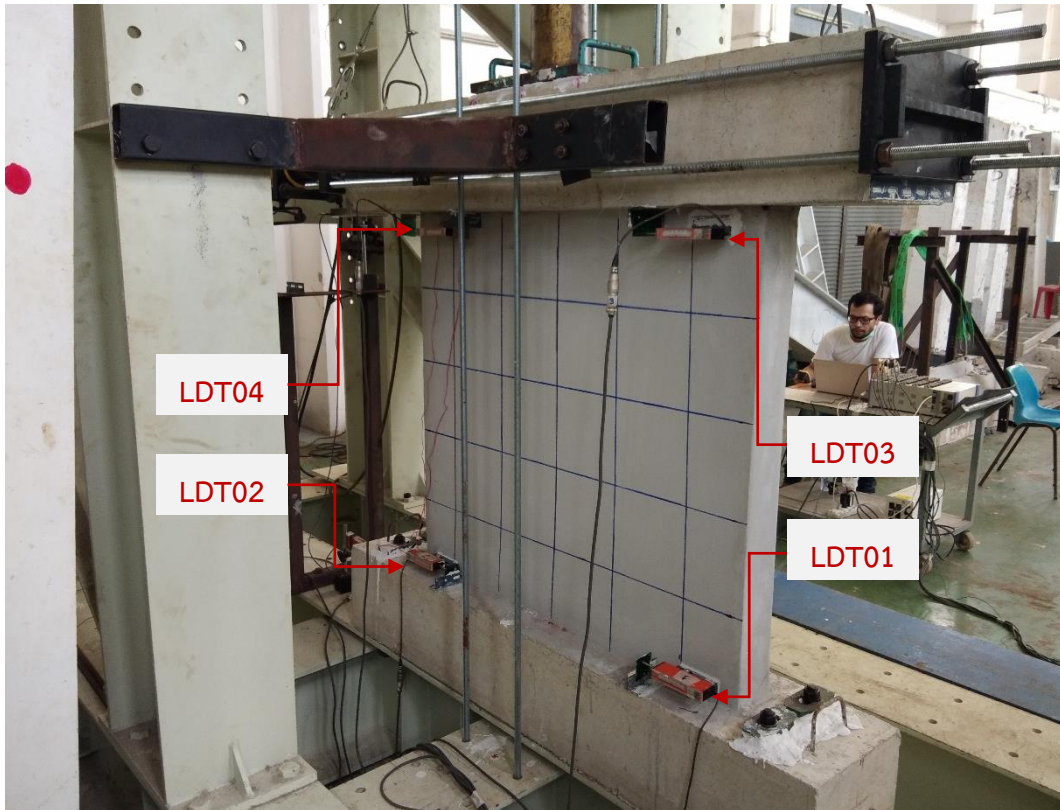
ทดสอบเกิดการวิบัติ รูปแบบของแรงกระทำด้านข้างแสดงดังรูปที่ 3.1-11 ในการทดสอบจะทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ เช่น แรงด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่าง ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่าง และการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างคานด้านบนและด้านล่างกับผนังอิฐก่อตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ โดยใช้อุปกรณ์วัดระยะการยืดหดตัว linear displacement transducer (LDT) ดังแสดงในรูปที่ 3.1-12



รูปที่ 3.1-10 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.1-11 รูปแบบการให้แรงกระทำด้านข้างในระนาบ



รูปที่ 3.1-12 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระยะเคลื่อนตัว

3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมในการต้านทานแรงดัดด้านข้างของผนังอิฐก่อโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีไร้เชิงเส้นด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (nonlinear finite elements analysis) ในการสร้างแบบจำลองจะทำการสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบในขั้นก่อนหน้าเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความสามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างถูกต้องเหมาะสม เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วจะนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างขนาดใหญ่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้าง โดยกระบวนการดังกล่าวจะมีการทำซ้ำจนกระทั่งได้รูปแบบและวิธีการออกแบบจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากผนังอิฐก่อที่ก่อสร้างในประเทศไทยโดยปกติจะมีการฉาบผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยปูนฉาบที่มีความหนาประมาณ 1-2 ซม. ซึ่งส่งผลให้ผนังมีคุณสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางไม่แตกต่างกันมากนัก ส่งผลให้การแตกร้าวของผนังอิฐตามแนวปูนก่อนั้นพบได้น้อยมาก การสำรวจความเสียหายของผนังและอาคารจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีตและการศึกษาวิจัยโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การศึกษาวิจัยของ [เกริกฤทธิ์ พรหมดวง \(2553\)](#) [Srechai และ Lukkunaprasit \(2013\)](#) และ [Waruksajja และคณะ \(2018\)](#) พบว่ารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อส่วนใหญ่จะเป็นการแตกร้าวตามแนวทแยงและเกิดการวิบัติด้วยความเค้นอัดบริเวณมุม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของการเสียรูปและการแตกร้าวของแนวปูนก่อที่มีขนาดเล็ก (minor deformation and micro crack) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในผนังอิฐก่อ ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประเภท simplified-micro modeling แบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.2-1 ซึ่งเป็น

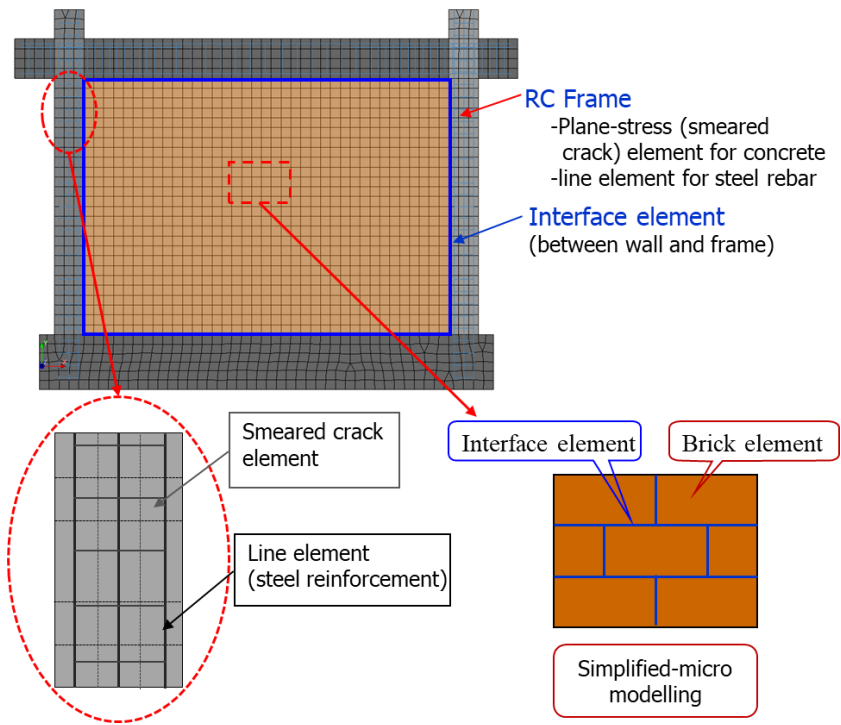
แบบจำลองที่สามารถลดความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองและจำนวนเอลิเมนต์ลงเมื่อเทียบกับแบบจำลองประเภท detailed-micro modeling แบบจำลองในระดับนี้จะรวมคุณสมบัติทางกลของอิฐ ปูนก่อ และปูนฉาบเข้าด้วยกัน (lumped mechanical property) และจำลองให้เป็นเอลิเมนต์เดียว จากนั้นใช้ interface element เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเอลิเมนต์เหล่านั้นเพื่อจำลองพฤติกรรมของจุดต่อระหว่างอิฐและปูนก่อรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้ แบบจำลองจะใช้เอลิเมนต์ (elements) สามประเภทซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DIANA FEA (DIANA FEA BV, 2019) ในการสร้างแบบจำลองคือ (รูปที่ 3.2-2)

- 1) เอลิเมนต์แบบ 8-nodes quadrilateral และ 6-nodes triangular isoparametric plane stress ที่มี 3×3 และ 4 integration points สำหรับจำลองชิ้นส่วนที่เป็นคอนกรีตและผนังอิฐก่อ
- 2) เอลิเมนต์แบบ 6-nodes interface ที่มี 3 Newton-Cotes integration points สำหรับจำลองจุดต่อในผนังอิฐและจุดต่อระหว่างผนังอิฐและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3) เอลิเมนต์แบบ bonded embedded reinforcement สำหรับจำลองเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยไม่พิจารณาผลของการเลื่อนหลุด (bond slip) ระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม

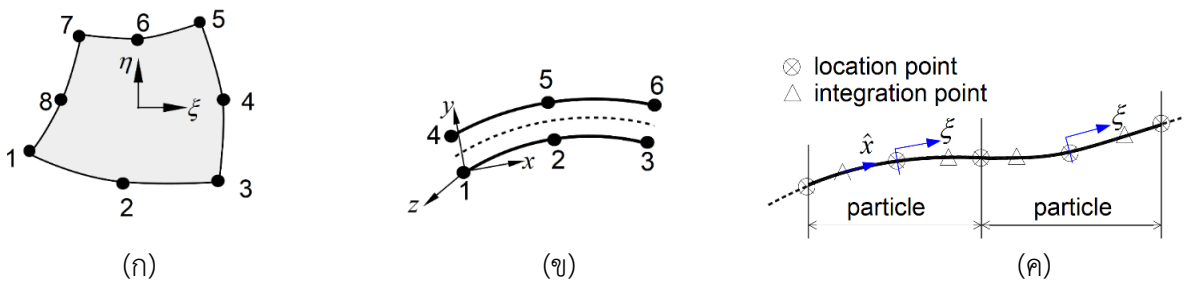
แบบจำลองคุณสมบัติของวัสดุ (material constitutive model) สำหรับคอนกรีตและผนังอิฐก่อจะใช้แบบจำลองชนิด isotropic smeared crack แบบ total strain crack model ซึ่งสามารถจำลองคุณสมบัติหลังการแตกร้าวของวัสดุโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยกำหนดให้ทิศทางของรอยแตกร้าวสามารถเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของความเครียดหลัก (rotation crack orientation) โดยมีคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการกำหนดพฤติกรรมของเอลิเมนต์ที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก กล่าวคือ

- 1) คุณสมบัติทางกลพื้นฐานเช่น ค่าอิลาสติกโมดูลัส (modulus of elasticity, E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (poisson's ratio, ν)
- 2) คุณสมบัติในการต้านทานความเค้นดึงเช่น กำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด (tensile strength) พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (tensile fracture energy, G_f)
- 3) คุณสมบัติในการต้านทานความเค้นอัดเช่น กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด (compressive strength) และพลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (compression fracture energy, G_c)

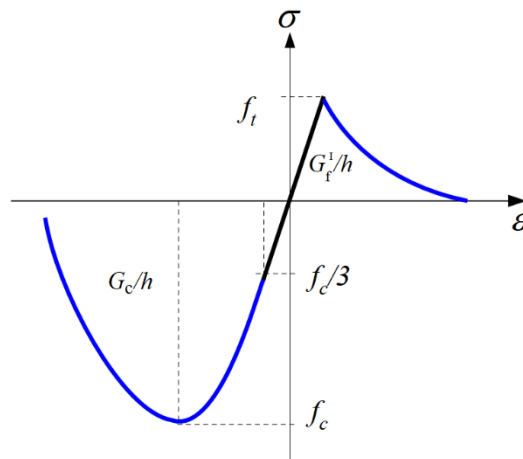
คุณสมบัติดังกล่าวของคอนกรีตและอิฐก่อ บางส่วนสามารถรวบรวมจากผลการทดสอบและผลการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และบางส่วนจะใช้วิธีการประมาณค่าโดยใช้สมการที่แนะนำโดยมาตรฐาน CEB-FIP (2010) ACI (2014) และ งานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Lourenco (1996) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดต้องทำการสอบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและอิฐก่อแสดงในรูปที่ 3.2-3 โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียด และความเค้นดึงและความเครียดเป็นแบบพาราโบลิคและเอกซ์โพเนนเชียลตามลำดับ



รูปที่ 3.2-1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างแรงคัตคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

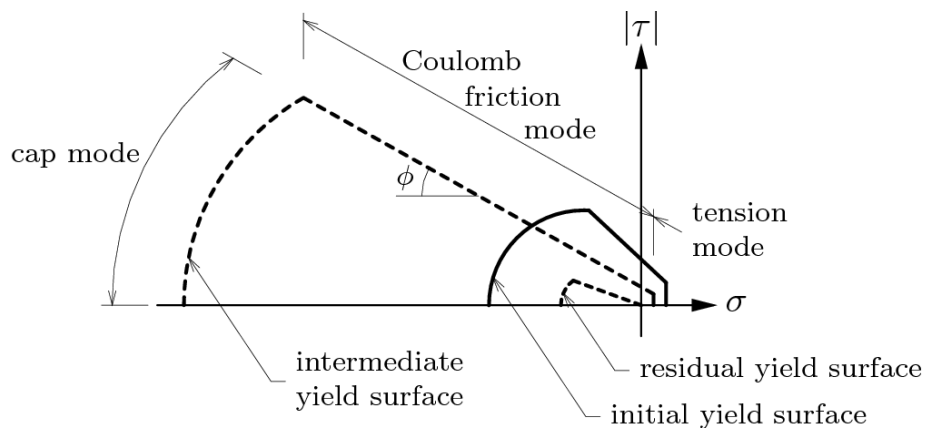


รูปที่ 3.2-2 เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง (ก) Plane stress element (ข) Interface element และ (ค) Reinforcement element (DIANA 2019)

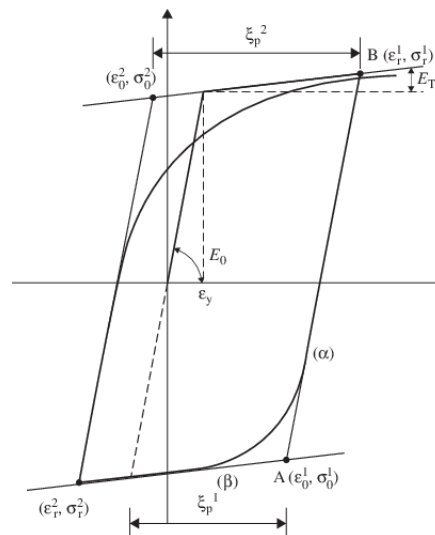


รูปที่ 3.2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและอิฐก่อ (DIANA FEA BV 2019)

จุดต่อในผนังอิฐก่อและจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (interface material) ใช้แบบจำลองวัสดุที่เสนอโดย Lourenco และ Rots (1997) ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมร่วมกันของการแตกร้าว การเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือนและความเสียหายเนื่องจากการบดอัด (Combined Cracking-Shearing-Crushing) ดังแสดงในรูปที่ 3.2-4 โดยคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมจะประมาณค่าจากการสอบเทียบแบบจำลองด้วยผลการทดสอบอิฐก่อ (prisms) และผลการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เหล็กเสริมในคอนกรีต (reinforcement bar) ใช้แบบจำลองของ Menegotto-Pinto โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 3.2-5 และการศึกษานี้จะไม่พิจารณาผลกระทบของการเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตและเหล็ก (bond slip effect)



รูปที่ 3.2-4 แบบจำลองจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (interface material)



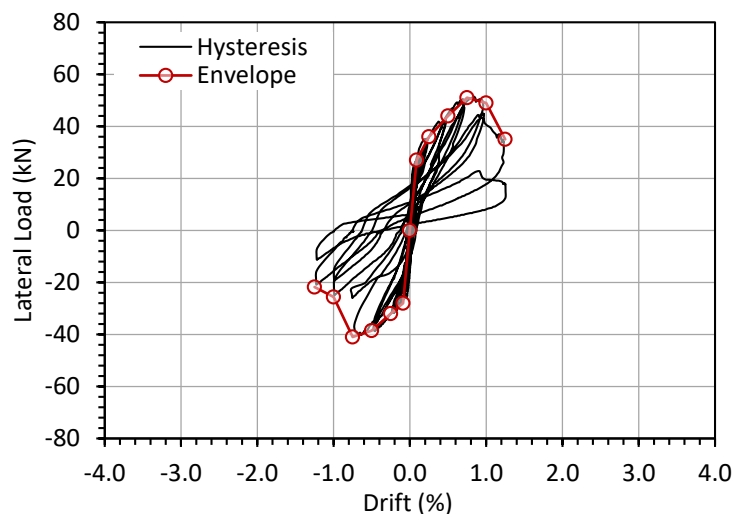
รูปที่ 3.2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม (Menegotto-Pinto model)

บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย

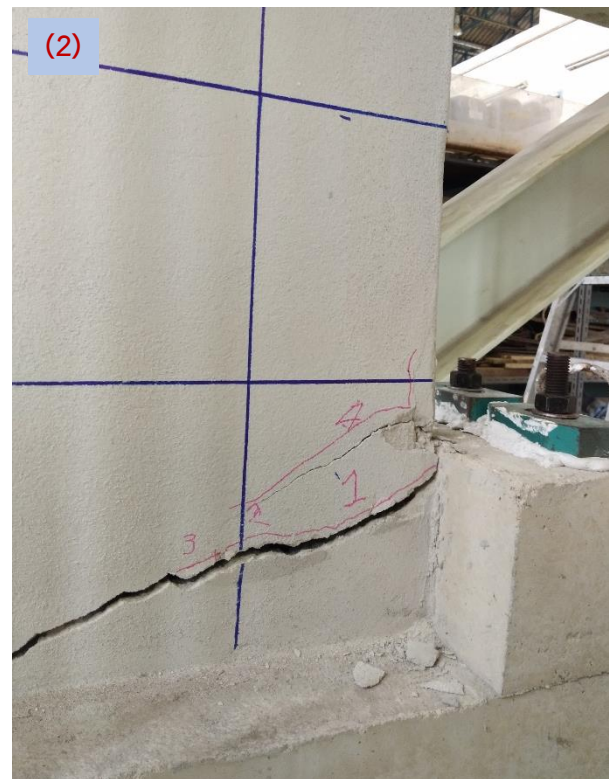
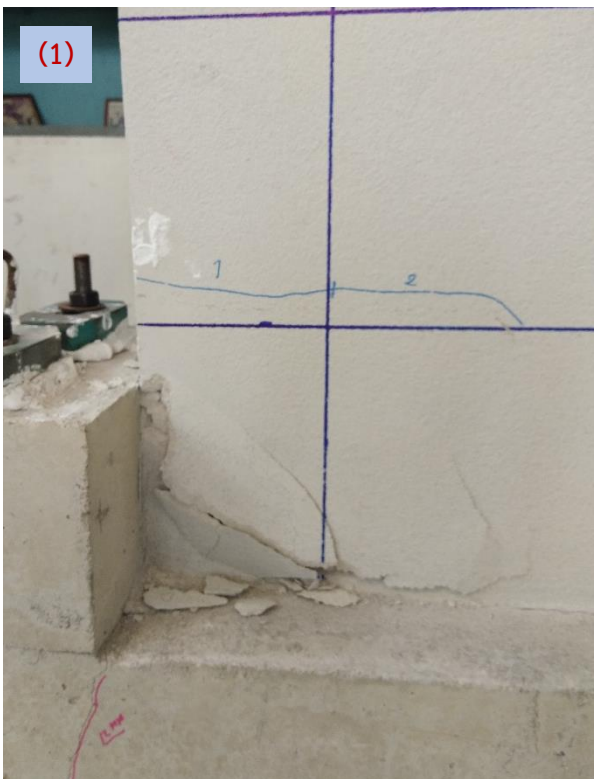
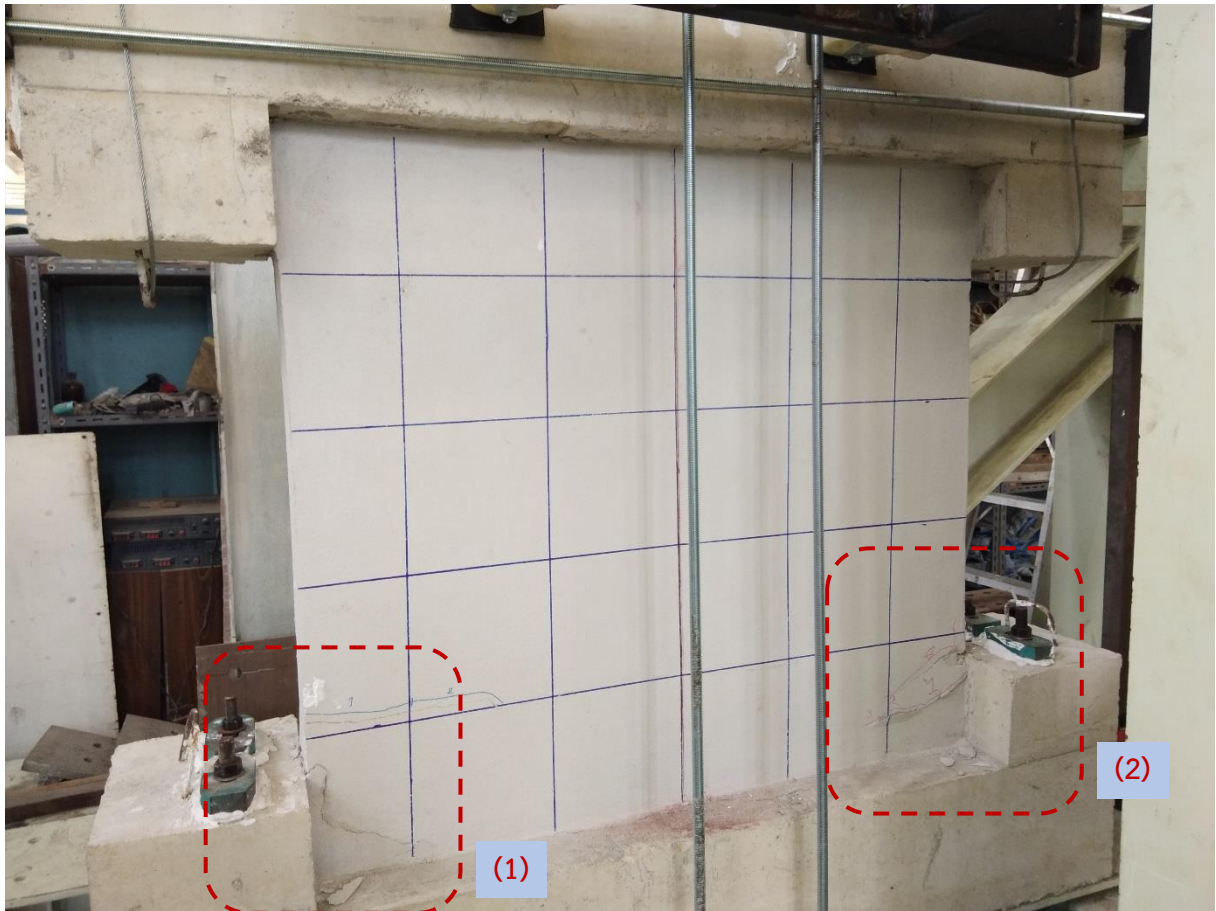
ในบทนี้ส่วนแรกจะเป็นการนำเสนอผลการศึกษาวิจัยที่ได้จากการทดสอบผนังอิฐก่อที่มีและไม่มีเสริมกำลังระหว่างจุดต่อผนังและคาน โดยมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมในการต้านทานแรงต้านข้างและรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อและจุดต่อระหว่างผนังและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนที่สองจะนำเสนอผลการสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และส่วนที่สามจะนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อและโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างผนังอิฐก่อขนาดเล็ก

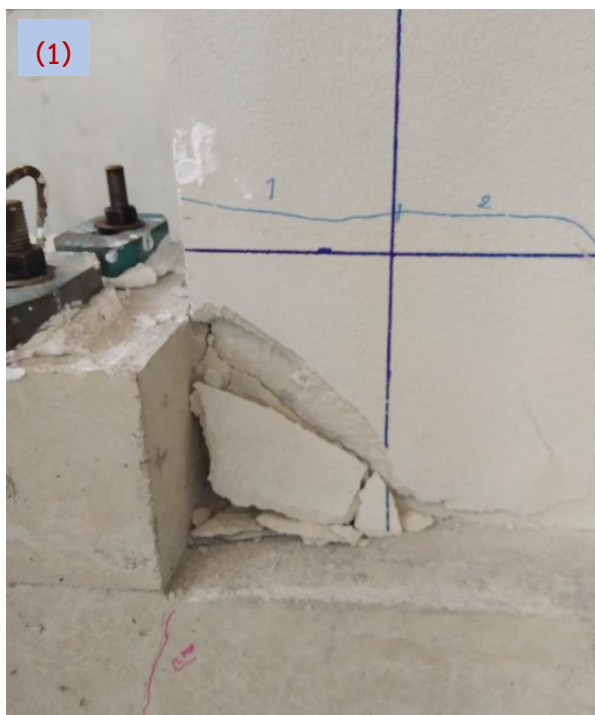
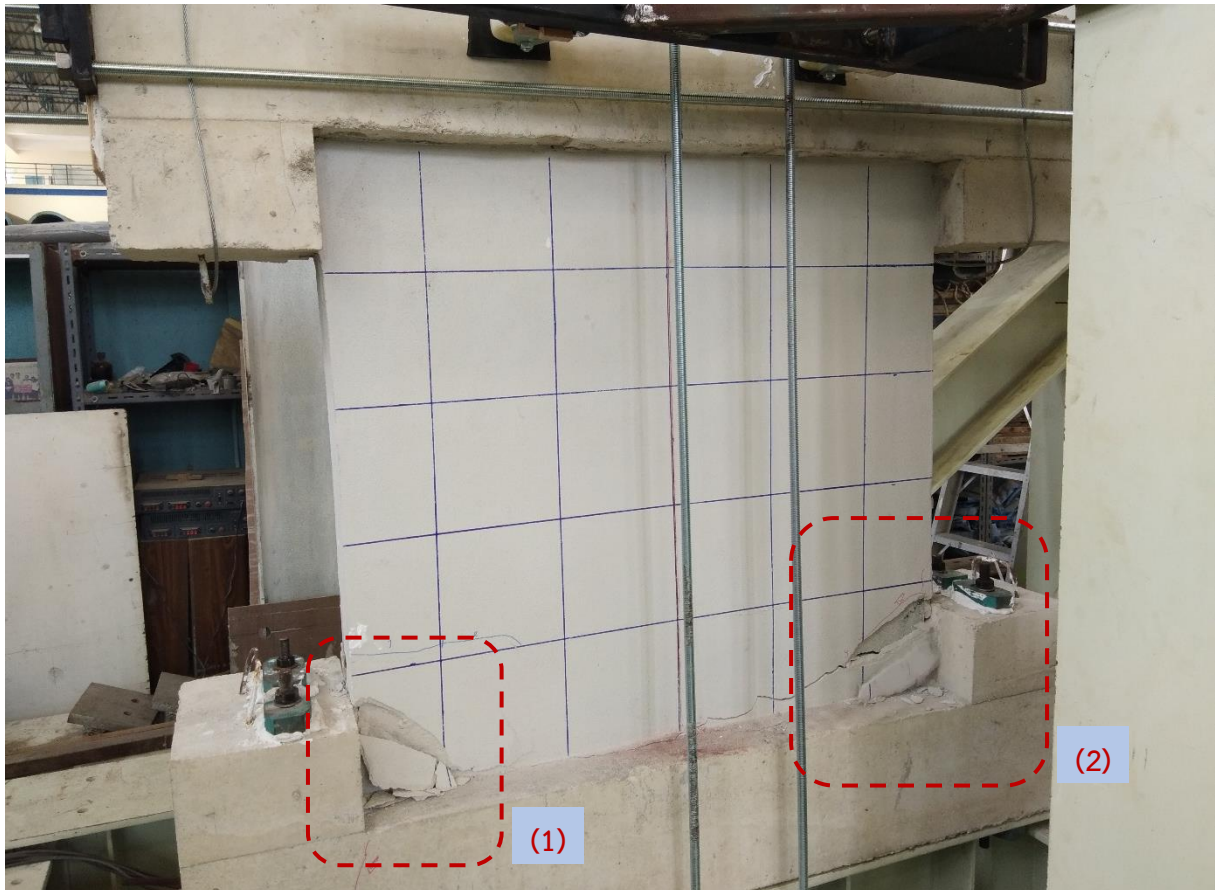
รูปที่ 4.1-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของตัวอย่างทดสอบ SP1 ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง (drift) มีค่า 0.125% พบว่าเกิดรอยแตกกว้างขึ้นในผนังอิฐก่อบริเวณมุมล่างซ้ายและขวา โดยการแตกร้าวดังกล่าวเกิดขึ้นในขณะที่ผนังต้องต้านทานความเค้นดัดในบริเวณดังกล่าว รอยแตกร้าวมีลักษณะวางตัวตามแนวราบขนานกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านล่าง ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ตัวอย่างทดสอบมีค่าการต้านทานแรงต้านข้างในทิศทางบวกและลบเท่ากับ 27 kN และ -28 kN ตามลำดับ เมื่อระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นรอยแตกร้าวดังกล่าวจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นและขยายตัวเข้ามาสู่ส่วนกลางของผนังอิฐก่อ ตัวอย่างทดสอบ SP1 มีกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวเท่ากับ 0.75% โดยมีค่าเท่ากับ 51 kN และ -41 kN สำหรับทิศทางบวกและทิศทางลบตามลำดับ เมื่อระยะการเคลื่อนตัวมีค่าเท่ากับ 1.00% ผนังบริเวณมุมล่างทั้งด้านซ้ายและขวาเกิดความเสียหายในลักษณะแตกร้าวเนื่องจากการบดอัด (crushing) และมีส่วนของปูนฉาบหลุดร่อนดังแสดงในรูปที่ 4.1-2 และกำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบลดลงเหลือ 49 kN และ -26 kN สำหรับทิศทางบวกและทิศทางลบตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 96 และ 63 ของกำลังสูงสุด การทดสอบหยุดที่ระยะการเคลื่อนตัวเท่ากับ 1.25% เนื่องจากผนังบริเวณมุมด้านล่างทั้งสองด้านเกิดความเสียหายมากดังแสดงในรูปที่ 4.1-3 ที่จุดดังกล่าวกำลังต้านทานแรงลดลงอย่างมาก โดยตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงเหลือประมาณร้อยละ 40 และ 25 ของกำลังสูงสุด



รูปที่ 4.1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP1



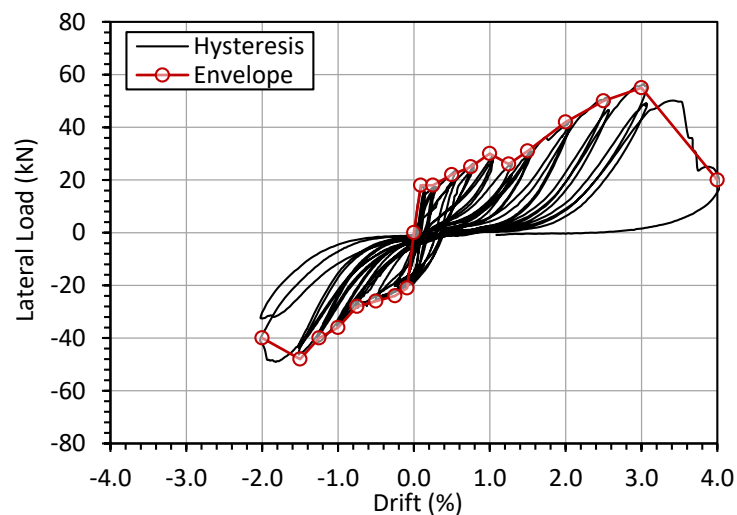
รูปที่ 4.1-2 ความเสียหายของ SP1 ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%



รูปที่ 4.1-3 ความเสียหายของ SP1 ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.25%

รูปที่ 4.1-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบ SP2 ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง (drift) มีค่า 0.125% พบว่าเกิดรอยแตกร้าวขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผนังและคาน

ตรงมุมด้านล่างของผนัง โดยการแตกร้าวดังกล่าวเกิดขึ้นในขณะที่ผนังต้องต้านทานความเค้นดึงในบริเวณดังกล่าว ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ตัวอย่างทดสอบมีค่าการต้านทานแรงดันทันข้างในทิศทางบวกและลบเท่ากับ 18 kN และ -21 kN ตามลำดับ เมื่อระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างเพิ่มขึ้นรอยแตกร้าวดังกล่าวจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นและขยายตัวเข้ามาสู่ส่วนกลางของผนังอิฐก่อ ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.25% รอยแตกร้าวดังกล่าวขยายตัวเต็มความกว้างผนัง และเกิดการเลื่อนไถล (slip) ระหว่างผนังและคานด้านล่าง (รูปที่ 4.1-5) ตัวอย่างทดสอบ SP2 มีกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.00% โดยมีค่าเท่ากับ 55 kN สำหรับทิศทางบวก ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย บริเวณมุมรับแรงอัดที่ระยะเคลื่อนตัว 4.00% และกำลังต้านทานแรงลดลงเหลือเพียงร้อยละ 36 ของกำลังสูงสุด สำหรับทิศทางลบกำลังสูงสุดเท่ากับ -48 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว -1.50% และกำลังต้านทานลดลงเนื่องจากผนัง บริเวณมุมเกิดความเสียหายในลักษณะแตกร้าวเนื่องจากการบดอัด การทดสอบหยุดที่ระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 4.0% และ -2.0% สำหรับทิศทางบวกและลบตามลำดับ การทดสอบหยุดที่ระยะเคลื่อนตัวสองทิศทางไม่เท่ากัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบเมื่อจบการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1-6



รูปที่ 4.1-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP2



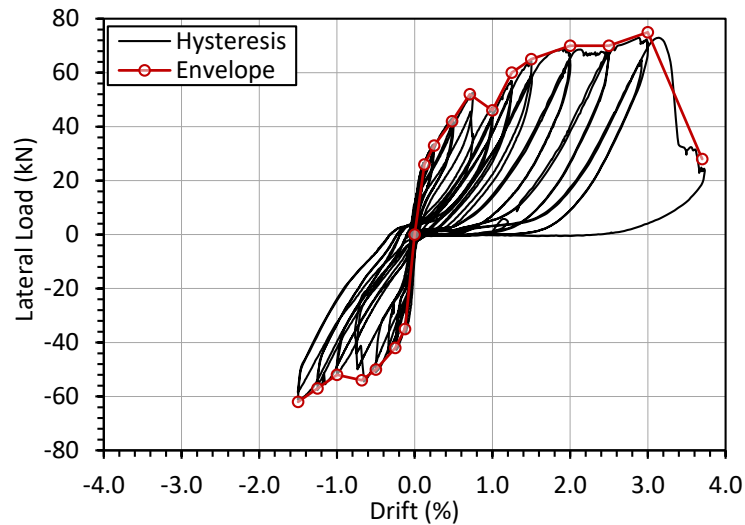
รูปที่ 4.1-5 ความเสียหายของ SP2 ที่ระยะเคลื่อนตัว -0.25%



รูปที่ 4.1-6 ความเสียหายของ SP2 ที่ระยะเคลื่อนตัว 4.0%

รูปที่ 4.1-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของตัวอย่างทดสอบ SP3 ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่า 0.125% เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผนังและคานบริเวณมุมด้านล่างของผนัง มีความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ตัวอย่างทดสอบมีค่าการต้านทานแรงด้านข้างในทิศทางบวกและลบเท่ากับ 26 kN และ -35 kN ตามลำดับ เมื่อระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างเพิ่มขึ้นรอยแตกร้าวดังกล่าวจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นและขยายตัวเข้ามาสู่ส่วนกลางของผนังอิฐก่อ ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.25% รอยแตกดังกล่าวขยายตัวจนมีความยาวประมาณ 2/3 ของความกว้างผนังและเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงขนาดเล็กบริเวณมุมของผนังเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.1-8) ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.75% รอยแตกร้าวดังกล่าวขยายตัว

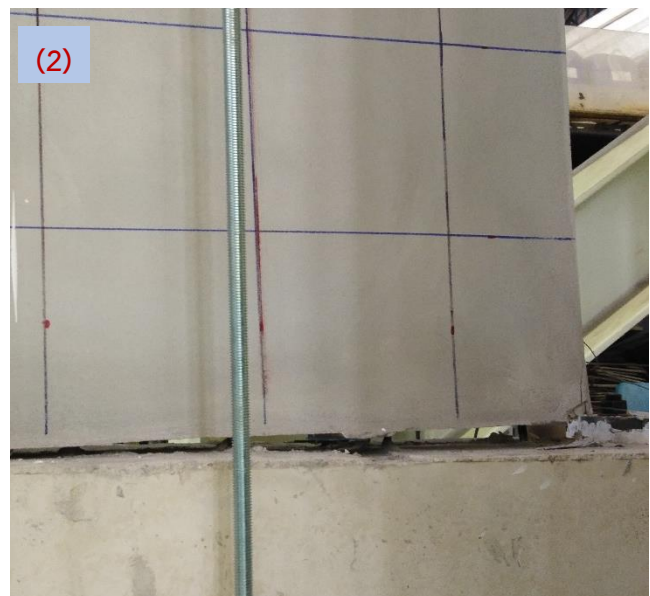
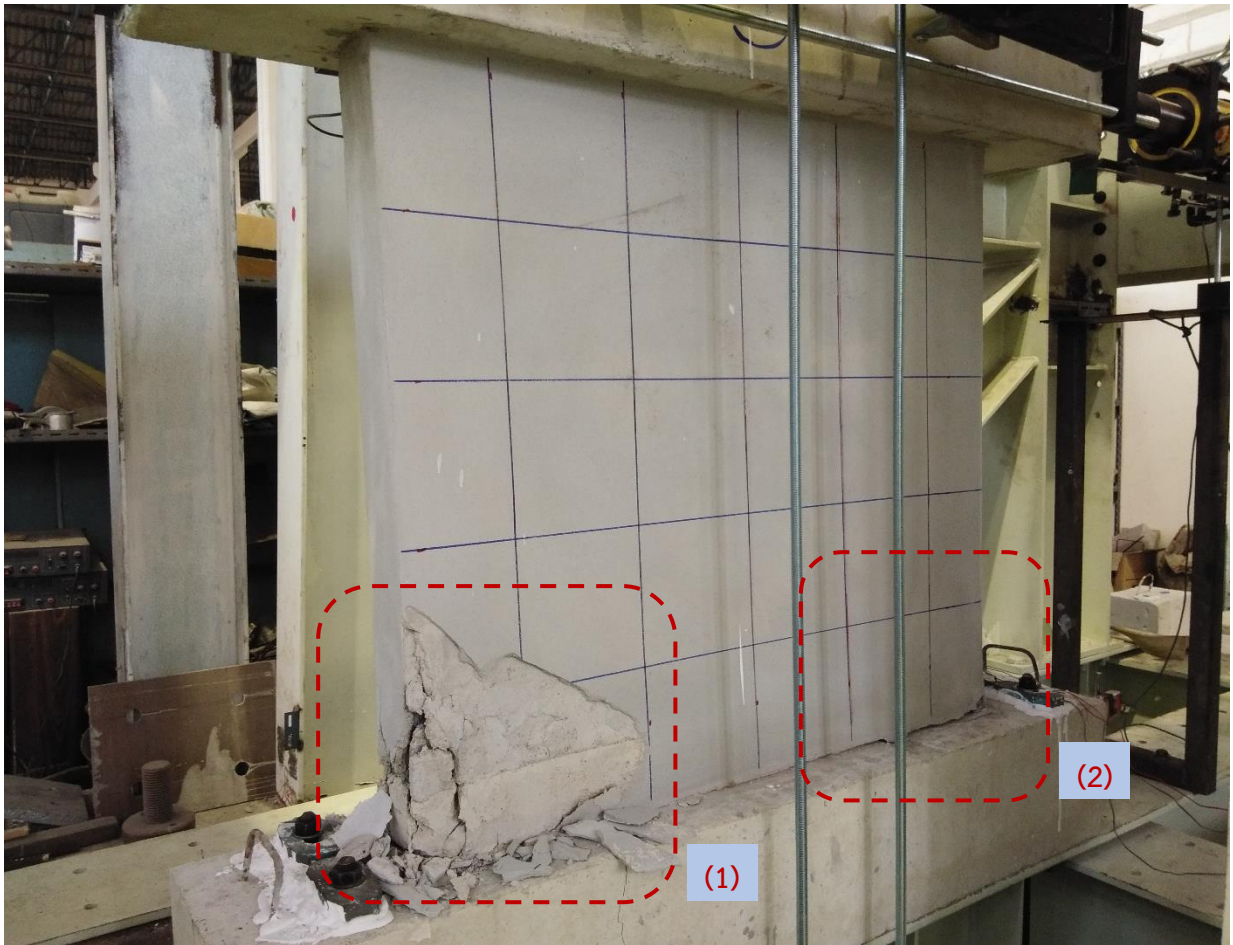
เพิ่มความกว้างผนังและเกิดการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคานด้านล่าง ตัวอย่างทดสอบ SP3 มีกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.00% โดยมีค่าเท่ากับ 75 kN สำหรับทิศทางบวก ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย บริเวณมุมรับแรงอัดที่ระยะเคลื่อนตัว 3.70% และกำลังต้านทานแรงลดลงเหลือเพียงร้อยละ 37 ของกำลังสูงสุดสำหรับทิศทางลบกำลังสูงสุดเท่ากับ -62 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว -1.50% การทดสอบหยุดที่ระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.70% และ -1.50% สำหรับทิศทางบวกและลบตามลำดับ การทดสอบหยุดที่ระยะเคลื่อนตัวสองทิศทางไม่เท่ากัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบเมื่อจบการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1-9



รูปที่ 4.1-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP3



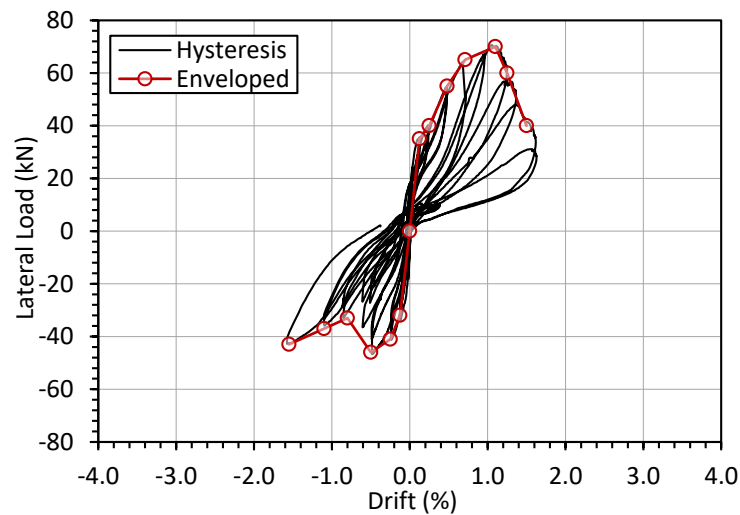
รูปที่ 4.1-8 ความเสียหายของ SP3 ที่ระยะเคลื่อนตัว -0.25%



รูปที่ 4.1-9 ความเสียหายของ SP3 ที่ระยะเคลื่อนตัว 3.70%

รูปที่ 4.1-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบ SP4 ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่า 0.25% เกิดรอยแตกกว้างขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผนังและคานบริเวณมุมด้านล่างของผนัง มีความยาวถึงกึ่งกลางความกว้างของผนัง ที่ระยะการเคลื่อนตัวนี้ตัวอย่างทดสอบมีค่าการต้านทานแรง

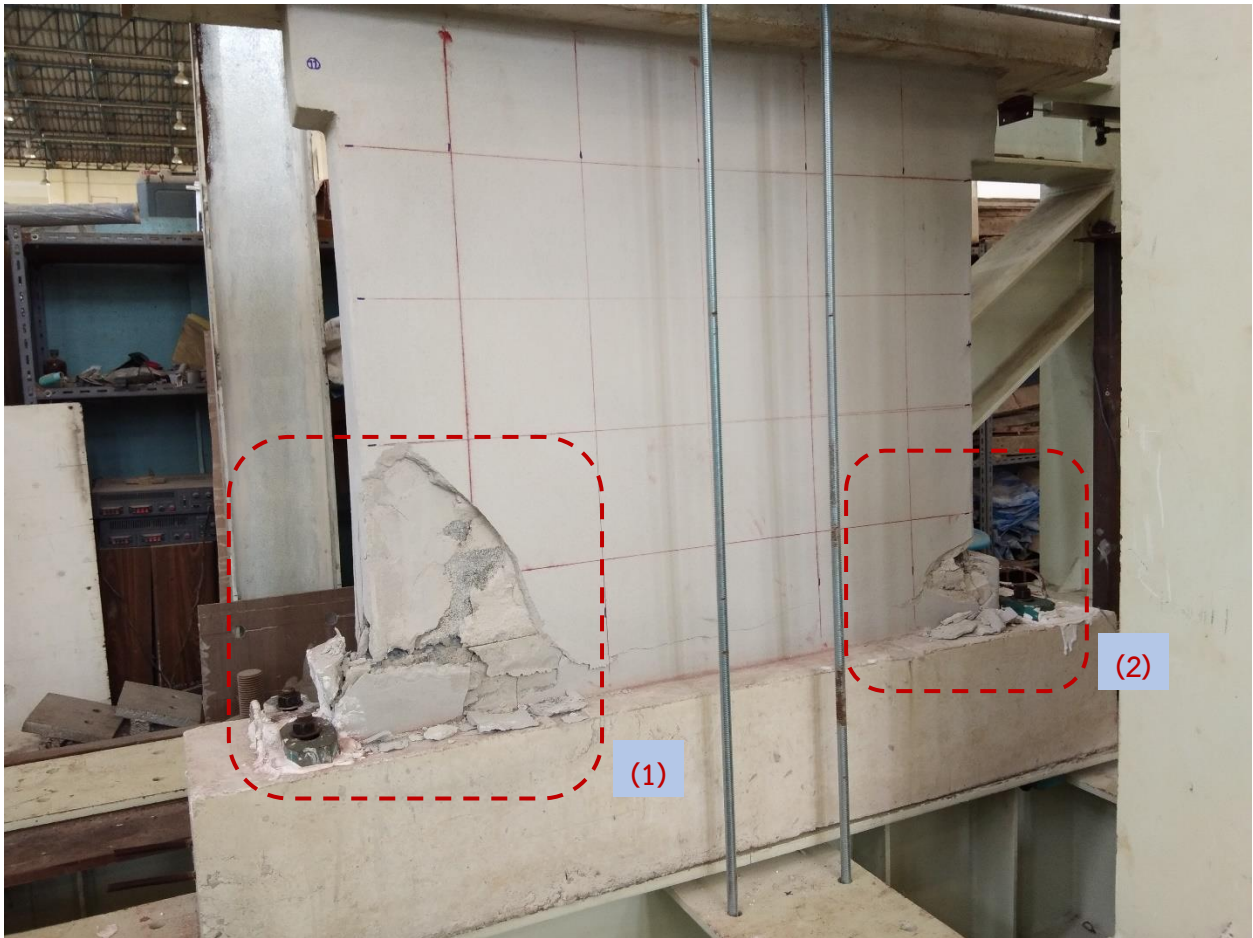
ด้านข้างในทิศทางบวกและลบเท่ากับ 35 kN และ -32 kN ตามลำดับ เมื่อระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่าง เพิ่มขึ้นรอยแตกกว้างดังกล่าวจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นและขยายตัวเข้ามาสู่ส่วนกลางของผนังอิฐก่อ ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50% รอยแตกดังกล่าวขยายตัวจนมีความยาวประมาณ 4/5 ของความกว้างผนังและเกิดรอยแตกกว้างในแนว ทแยงและปูนฉาบหลุดร่อนบริเวณมุมของผนัง (รูปที่ 4.1-11) ที่ระยะเคลื่อนตัว 0.75% รอยแตกดังกล่าวขยายตัว เต็มความกว้างผนังและเกิดการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคานด้านล่าง รอยแตกกว้างบริเวณมุมมีความกว้างและ ความยาวเพิ่มขึ้น ตัวอย่างทดสอบ SP4 มีกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 1.10% โดยมีค่าเท่ากับ 70 kN สำหรับทิศทางบวก ก่อนที่จะเกิดความเสียหายบริเวณมุมรับแรงอัดที่ระยะเคลื่อนตัว 1.5% และกำลัง ต้านทานแรงลดลงเหลือเพียงร้อยละ 40 ของกำลังสูงสุด สำหรับทิศทางลบกำลังสูงสุดเท่ากับ -46 kN ที่ระยะ เคลื่อนตัว -0.50% การทดสอบหยุดที่ระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 1.50% และ -1.55% สำหรับทิศทางบวกและลบ ตามลำดับ ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบเมื่อจบการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1-12



รูปที่ 4.1-10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ SP4



รูปที่ 4.1-11 ความเสียหายของ SP4 ที่ระยะเคลื่อนตัว -0.50%

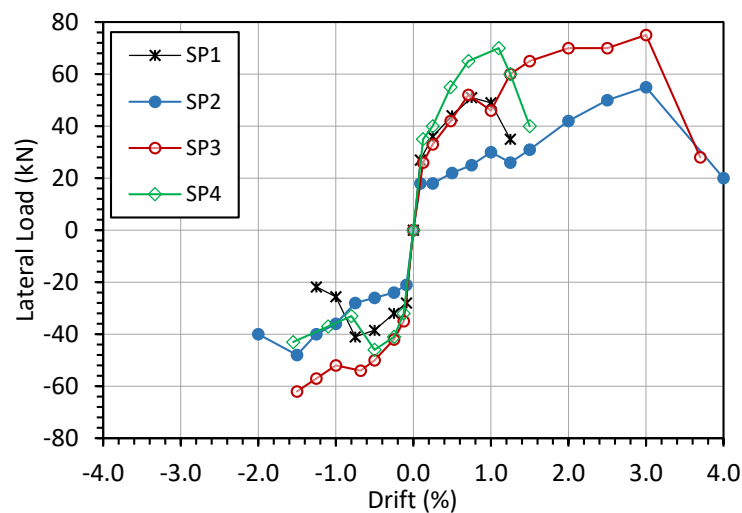


รูปที่ 4.1-12 ความเสียหายของ SP4 ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.5%

รูปที่ 4.1-13 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง (enveloped curves) ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด จากรูปพบว่ากำลังต้านทานแรงดัดด้านข้างสูงสุดของตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน (SP1 และ SP2) มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในทิศทางการเคลื่อนตัวเป็นบวกและลบ เนื่องจากกำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบถูกควบคุมโดยการวิบัติเนื่องจากการบดอัด (crushing) ของผนังอิฐก่อ

บริเวณมุมรับความเค้นอัด อย่างไรก็ตามระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง ณ ตำแหน่งที่ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ SP2 มีค่ามากกว่าตัวอย่างทดสอบ SP1 ประมาณ 4 เท่าในทิศทางบวก เนื่องจากผนังอิฐในตัวอย่างทดสอบ SP1 ไม่สามารถเลื่อนไถล (slip) ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบเนื่องจากการยึดรั้งของหูช้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงทำให้ผนังอิฐเกิดความเสียหายที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำ ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบ SP2 เกิดการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคานส่งผลให้ผนังเกิดความเสียหายน้อยที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างเดียวกัน ที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.75% พบว่าตัวอย่างทดสอบ SP2 มีกำลังต้านทานแรงเพียงร้อยละ 49 และ 68 ของตัวอย่างทดสอบ SP1 ในทิศทางการเคลื่อนตัวด้านข้างบวกและลบตามลำดับ

กำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน (SP3 และ SP4) มีค่าใกล้เคียงกันในทิศทางการเคลื่อนตัวที่เป็นบวก เนื่องจากกำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบถูกควบคุมโดยการวิบัติเนื่องจากการบดอัดของผนังอิฐก่อบริเวณมุมรับความเค้นอัด โดยพบว่ากำลังสูงสุดมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อประมาณร้อยละ 37 เนื่องจากคานทับหลังส่งผลให้ผนังบริเวณมุมรับความเค้นอัดได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง ณ ตำแหน่งที่ตัวอย่างมีกำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ SP3 มีค่ามากกว่าตัวอย่างทดสอบ SP4 ประมาณ 2.7 เท่าในทิศทางบวก เนื่องจากคานทับหลังในตัวอย่างทดสอบ SP3 มีการเสริมเหล็กส่งผลให้มีความเหนียว (ductility) เพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานความเค้นดึงภายหลังการแตกร้าวของคอนกรีตได้ดีกว่าคานทับหลังที่ไม่มีการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบ SP3 ซึ่งเมื่อเกิดการแตกร้าวจะสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรงดึงและส่งผลให้กำลังต้านทานแรงด้านข้างของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างไม่เกิน 0.50% พบว่าตัวอย่างทดสอบ SP3 และ SP4 มีกำลังต้านทานแรงที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1-13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ

4.2 การสอบเทียบแบบจำลอง

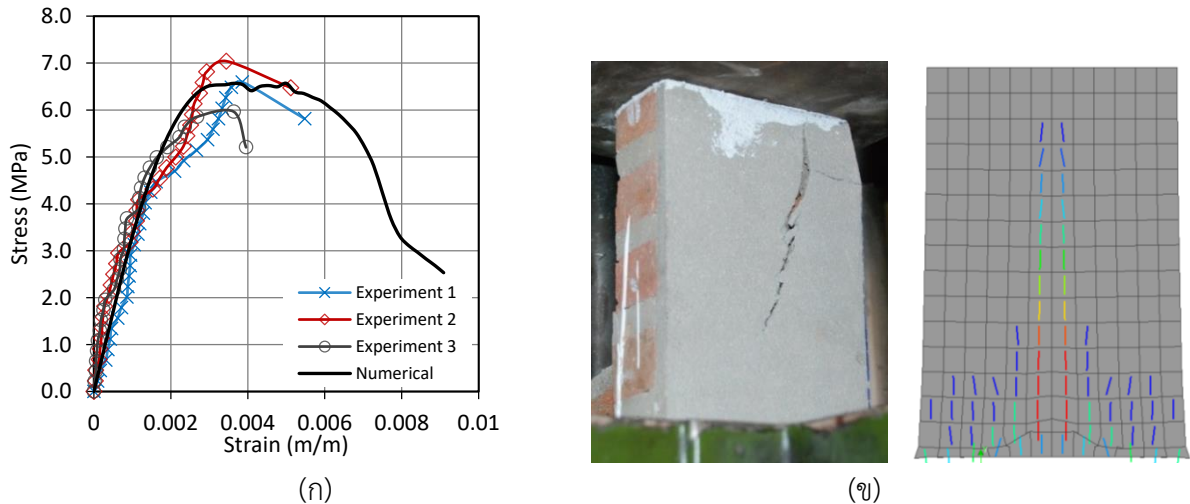
เพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element modeling) ที่สามารถทำนายพฤติกรรมโครงสร้างได้ถูกต้องเพียงพอ ในการศึกษาวิจัยนี้จึงทำการสอบเทียบแบบจำลองที่ใช้กับผลการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะทำการสอบเทียบแบบจำลองของอิฐก่อและแบบจำลองของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อหารูปแบบและคุณสมบัติที่เหมาะสมของอิฐก่อ คอนกรีต และเหล็กเสริมสำหรับการนำไปใช้สร้างแบบจำลองของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อในขั้นต่อไป

การสอบเทียบแบบจำลองของอิฐก่อจะทำการสอบเทียบกับผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐก่อที่ทำการทดสอบโดย Srechai และ Lukkunaprasit (2013) ซึ่งจะทำการจำลองอิฐก่อโดยใช้แบบจำลองดังที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น การให้แรงจะกระทำโดยการกำหนดระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ขอบบนของอิฐก่อและกำหนดให้จุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น (fixed) ตามแนวขอบล่างของอิฐก่อ คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.2-1 โดยค่าดังกล่าวบางส่วนได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบแล้ว

ตารางที่ 4.2-1 คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง

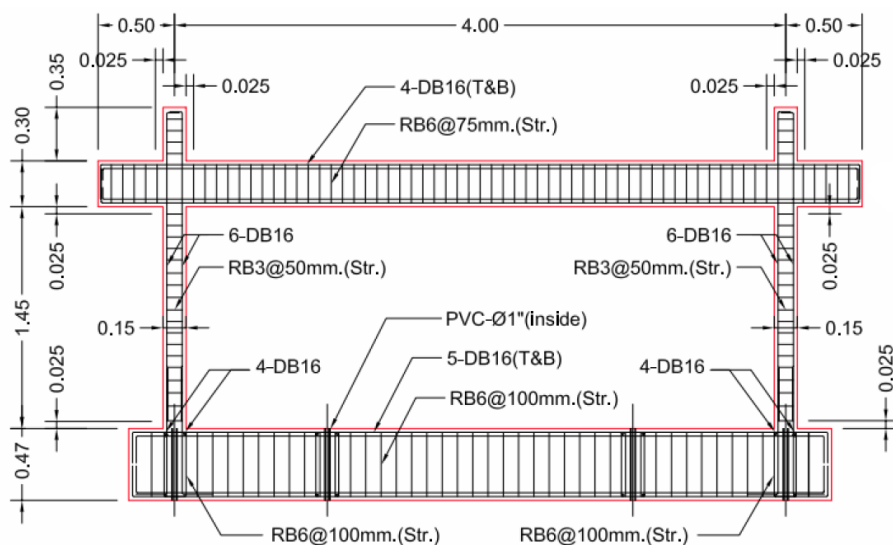
คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง	หมายเหตุ
กำลังอัดสูงสุด (f'_m)	MPa	6.57	ได้จากการทดสอบ
กำลังดึงสูงสุด (f'_{mt})	MPa	0.657	สมมติเท่ากับ $0.1f'_m$
อีลาสติกโมดูลัส (E_m)	MPa	3300	ได้จากการทดสอบ
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (G_c)	N/m	10500	$G_c = d_u(f'_m)$ d_u is ductility factor (for masonry = 1.6 mm) [Lourenco, 2009]
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (G_f)	N/m	102	$G_f = 73f'_m{}^{0.18}$ [CEB-FIP, 2010]
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	-	0.20	-

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด รูปแบบการแตกร้าว ของอิฐก่อที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.2-1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมของอิฐก่อภายใต้แรงอัดได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยเฉพาะค่าอีลาสติกโมดูลัส (E_m) และความเค้นอัดสูงสุด (f'_m) อย่างไรก็ตามพฤติกรรมในช่วงหลังจากความเค้นสูงสุด (post-peak) ไม่สามารถเปรียบเทียบได้เนื่องจากขาดข้อมูลจากการทดสอบในช่วงดังกล่าว ลักษณะการแตกร้าวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองมีความสอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในการทดสอบในระดับที่ยอมรับได้

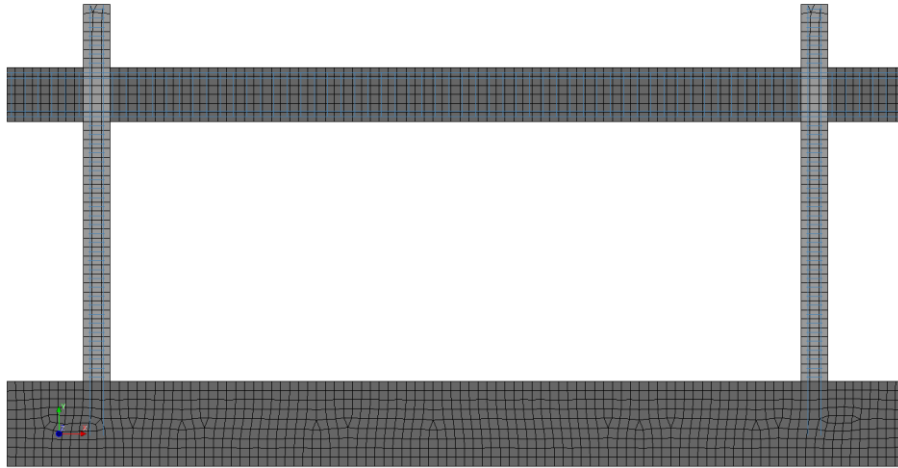


รูปที่ 4.2-1 เปรียบเทียบ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (ข) รูปแบบการแตกร้าวของอิฐก่อ

การสอบเทียบแบบจำลองของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำการสอบเทียบกับผลการทดสอบโครงต้านแรงดัดภายใต้แรงสลับทิศทางที่ทำการทดสอบโดย [คชนิล \(2552\)](#) ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2-2 การจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้แบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างและแบบจำลองวัสดุตั้งที่อธิบายข้างต้น รูปที่ 4.2-3 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงต้านแรงดัด ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้แรงผลกระทบที่กึ่งกลางของความลึกของคานและกำหนดให้จุดรองรับที่ฐานเป็นแบบยึดแน่น (fixed support) การให้แรงกระทำต่อโครงสร้างจะใช้วิธีกำหนดระยะการเคลื่อนตัวด้านของตัวอย่างทดสอบ (displacement control) และใช้วิธีการวิเคราะห์แบบอินอีลาสติกไม่เชิงเส้น (nonlinear inelastic analysis) คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.2-2 โดยค่าดังกล่าวบางส่วนจะได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ



รูปที่ 4.2-2 ตัวอย่างทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก (คชนิล 2552)

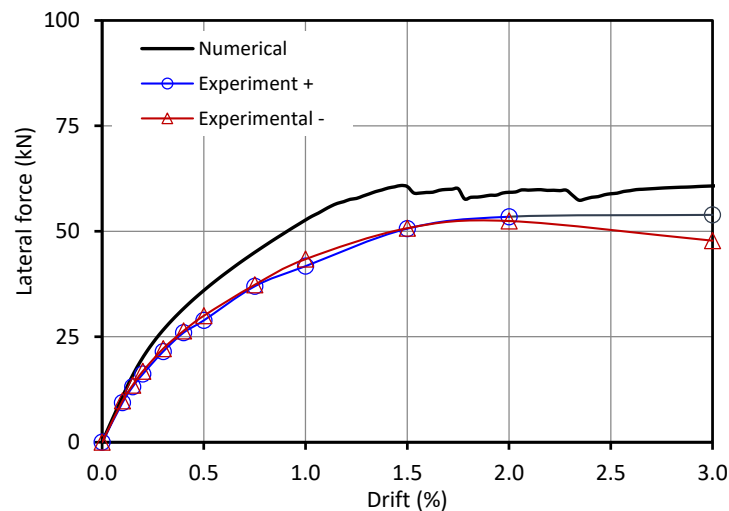


รูปที่ 4.2-3 แบบจำลองโครงสร้างด้านแรงตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 4.2-2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างด้านแรงตัด

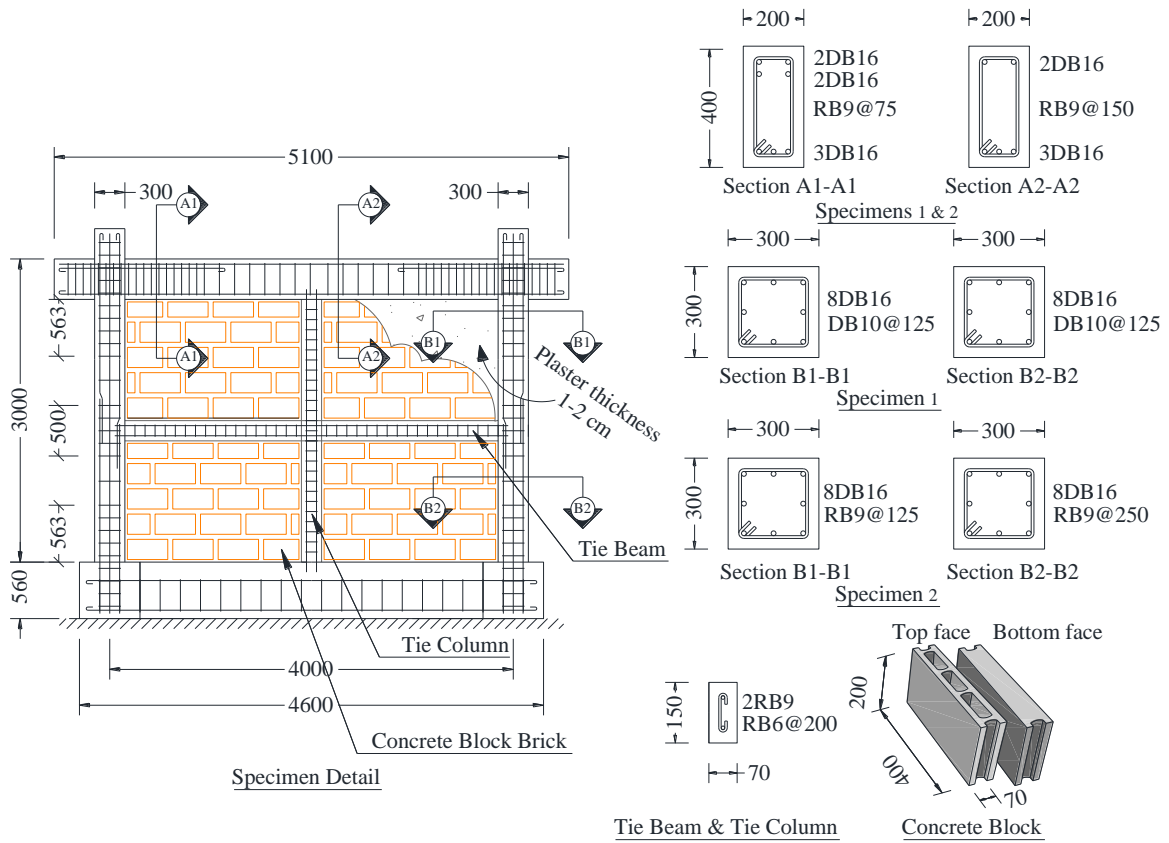
คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ใน แบบจำลอง	หมายเหตุ
คอนกรีต			
กำลังอัดสูงสุด (f'_c)	MPa	17.95	ได้จากการทดสอบ
กำลังดึงสูงสุด (f'_t)	MPa	1.795	สมมติเท่ากับ $0.1f'_c$
อีลาสติกโมดูลัส (E_c)	MPa	20095	ACI318 (2014)
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (G_c)	N/m	12200	$G_c = [15 + 0.43f'_c - 0.0036(f'_c)^2] * 1000$ [Lourenco, 2009]
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (G_t)	N/m	130	$G_t = 73f'_m^{0.18}$ [CEB-FIP, 2010]
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	-	0.20	-
เหล็กเสริม			
RB3 - กำลังที่จุดคราก (f_y)	MPa	400	
-กำลังประลัย (f_u)	MPa	560	
-อีลาสติกโมดูลัส (E)	MPa	196200	
-สเตรนฮาร์ดนิ่ง	-	0.02	
RB6 - กำลังที่จุดคราก (f_y)	MPa	380	
-กำลังประลัย (f_u)	MPa	469	
-อีลาสติกโมดูลัส (E)	MPa	196200	
-สเตรนฮาร์ดนิ่ง	-	0.02	
DB16 - กำลังที่จุดคราก (f_y)	MPa	390	
-กำลังประลัย (f_u)	MPa	556	
-อีลาสติกโมดูลัส (E)	MPa	196200	
-สเตรนฮาร์ดนิ่ง	-	0.01	

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ (drift) ในช่วงอีลาสติกมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ รูปที่ 4.2-4 อย่างไรก็ตามเมื่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นถึง 0.20% ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวอย่างทดสอบเริ่มมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่เชิงเส้นเนื่องจากการแตกร้าวของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบเล็กน้อยและส่งผลให้กำลังต้านทานแรงสูงสุดมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดสอบประมาณร้อยละ 10 ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมซึ่งมีการต่อทาบบริเวณโคนเสา อีกทั้งได้รับผลกระทบจากแรงแบบสลับทิศ ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้ไม่ได้นำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง อย่างไรก็ตามแบบจำลองสามารถจำลองการแตกร้าวของคอนกรีตและการครากของเหล็กเสริมในเสาได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

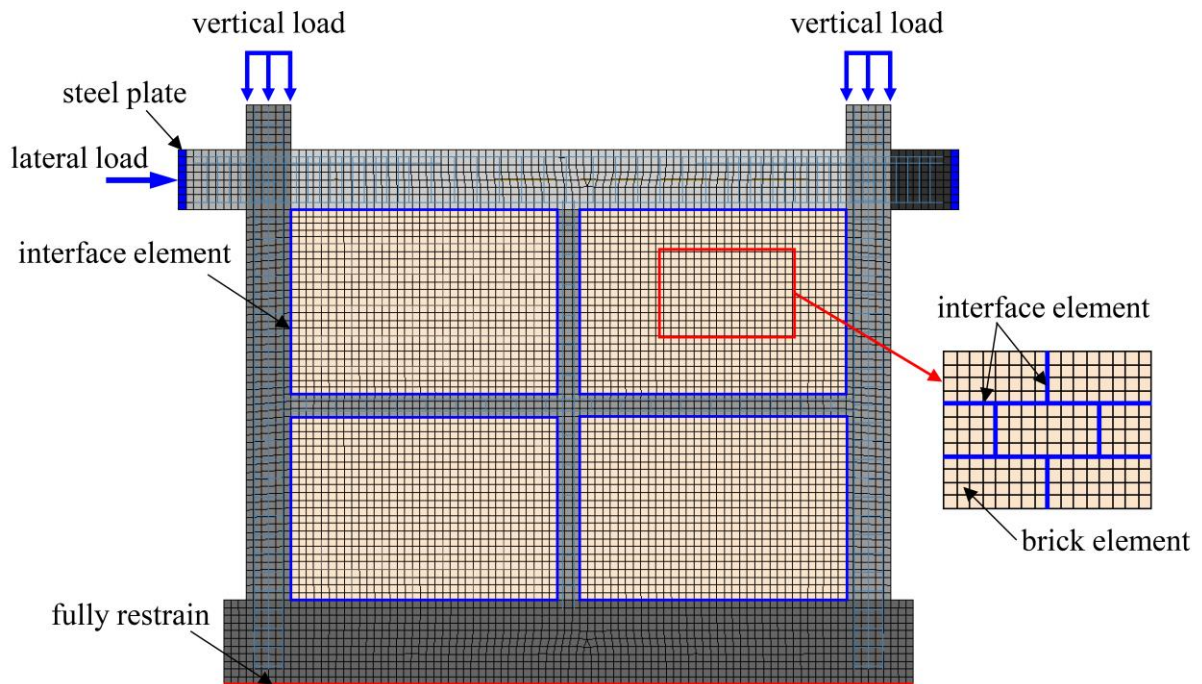


รูปที่ 4.2-4 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กจากผลการทดสอบและการวิเคราะห์

การสอบเทียบแบบจำลองของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐ จะทำการสอบเทียบกับผลการทดสอบของ Waruaksajja และคณะ (2018) Specimen 2 โดยมีขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2-5 ซึ่งต่อไปจะเรียกตัวอย่าง WS02 การจำลองโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะจำลองโดยใช้แบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างและแบบจำลองวัสดุตั้งที่อธิบายข้างต้น โดยกำหนดให้แรงผลักดันข้างกระทำที่กึ่งกลางของความลึกของคานและกำหนดให้จุดรองรับที่ฐานเป็นแบบยึดแน่น (fixed support) ตลอดแนวขอบล่างของฐาน การให้แรงจะกระทำโดยการกำหนดระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ (displacement control) ดังแสดงในรูปที่ 4.2-6 และใช้วิธีวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้นแบบอินอีลาสติก (static nonlinear inelastic analysis) คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต อิฐก่อ และเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.2-3 ถึง ตารางที่ 4.2-5 เนื่องจากที่ผ่านมาไม่มีผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของจุดต่อระหว่างผนังอิฐและโครงต้านแรงดัด (WFI) รวมไปถึงจุดต่อระหว่างอิฐและปูนก่อ (WI) ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะทำการสอบเทียบแบบจำลองจุดต่อ (interface element model) เพื่อหาคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.2-6



รูปที่ 4.2-5 ตัวอย่างทดสอบโครงสร้างต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ (Wararuksajja และคณะ 2018)



รูปที่ 4.2-6 แบบจำลองโครงสร้างต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

ตารางที่ 4.2-3 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง			หมายเหตุ
		คาน	เสา	เสาเอ็น และคาน ทับหลัง	
กำลังอัดสูงสุด (f'_c)	MPa	19.42	19.52	10.43	ได้จากการทดสอบ
กำลังดึงสูงสุด (f'_t)	MPa	1.94	1.95	1.04	สมมติเท่ากับ $0.1f'_m$
อีลาสติกโมดูลัส (E_c)	MPa	20902	20956	15318	ACI318 (2014)
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (G_c)	N/m	21993	22022	19093	$G_c = [15 + 0.43f'_c - 0.0036(f'_c)^2] * 1000$ [Lourenco, 2009]
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (G_f)	N/m	125	125	111	$G_f = 73f'_c{}^{0.18}$ [CEB-FIP, 2010]
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	-	0.20	0.20	0.20	-

ตารางที่ 4.2-4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ขนาดเหล็กเสริม	
		RB9	DB16
กำลังที่จุดคราก (f_y)	MPa	308.28	579.15
กำลังประลัย (f_u)	MPa	433.8	687.1
อีลาสติกโมดูลัส (E)	MPa	207950	207950
สเตรนฮาร์เดนนิ่ง	-	0.01	0.01

ตารางที่ 4.2-5 คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ใน แบบจำลอง	หมายเหตุ
กำลังอัดสูงสุด (f'_m)	MPa	6.27	ได้จากการทดสอบ
กำลังดึงสูงสุด (f'_{mt})	MPa	0.627	สมมติเท่ากับ $0.1f'_m$
อีลาสติกโมดูลัส (E_m)	MPa	3139	ได้จากการทดสอบ
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (G_c)	N/m	10032	$G_c = d_u(f'_m)$ d_u is ductility factor (for masonry = 0.7 mm) [Lourenco, 2009]
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (G_f)	N/m	100	$G_f = 73f'_m{}^{0.18}$ [CEB-FIP, 2010]
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	-	0.20	-

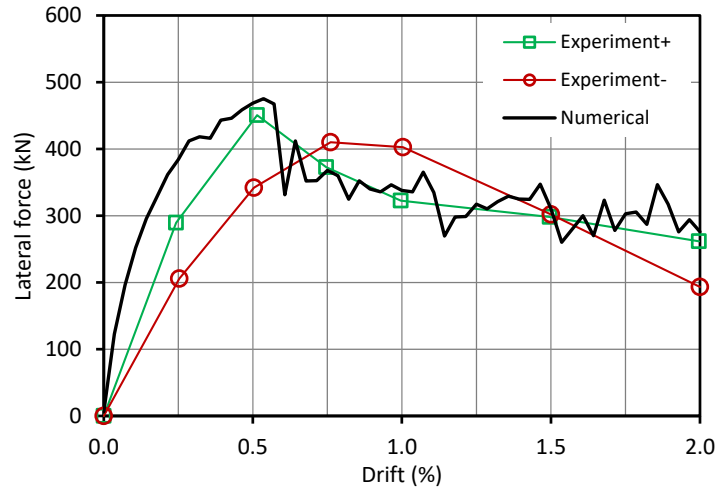
ตารางที่ 4.2-6 คุณสมบัติทางกลของจุดต่อในผนังและระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง		หมายเหตุ
		WFI	WI	
Normal Stiffness (K_{nn})	N/m ³	2.44×10^{11}	4.88×10^{12}	(1)
Shear Stiffness (K_{ss})	N/m ³	2.44×10^{10}	1.95×10^{12}	(2)
Cohesion (C)	MPa	0.01155	1.155	(2)
Friction angle (ϕ)	degree	30	30	(2)
Residual Friction angle (ϕ_r)	degree	25	25	(2)
Dilatancy angle (ψ)	degree	0.3	0.3	(2)
Confining normal stress (σ_v)	MPa	-0.77	-0.77	(3)
Exponential degradation coefficient (δ)	-	2	2	(2)
Tensile Strength (f'_t)	MPa	0.0077	0.77	(2)
Tensile Fracture Energy (G_f^I)	N/m	20	112	(2)
Shear Fracture Energy (G_f^II)	N/m	2000	2000	(2)
Compressive Strength (f'_c)	MPa	7.70	10.43	(5)
Compressive Fracture Energy (G_c)	N/m	5390	7427	(4)
Shear traction control factor (C_s)	-	1	1	(2)
Equivalent plastic relative displacement (K_p)	-	0.006	0.003	(2)

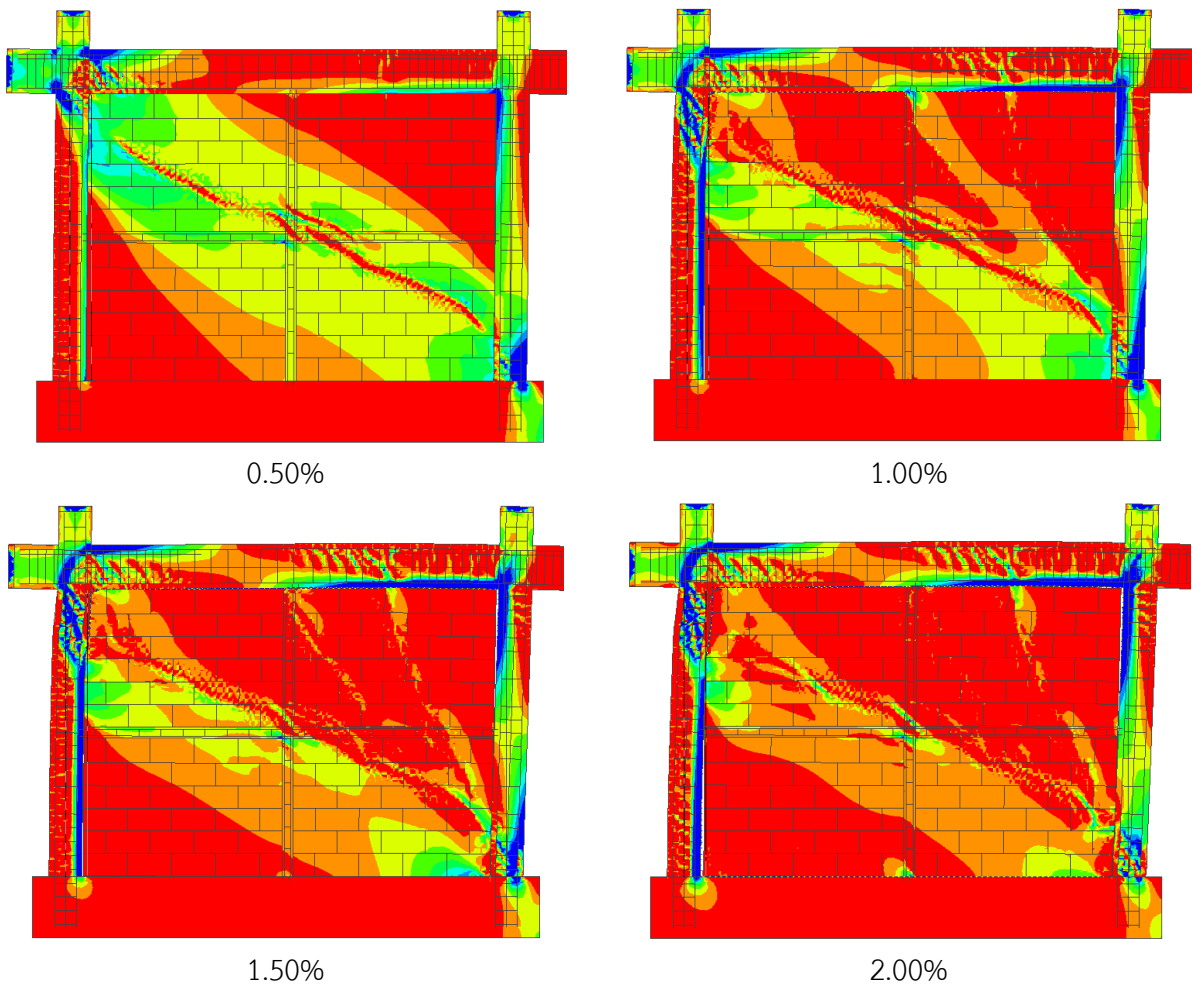
(1) สมมติเท่ากับ E_m /thickness (2) Trial (3) สมมติเท่ากับ $0.1f'_m$ (4) $G_c = du(f'_m)$, du is ductility factor (for masonry = 0.7 mm) [Lourenco, 2009] (5) สมมติเท่ากับกำลังอัดของอิฐก่อหรือปูนก่อ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองข้างต้นพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของตัวอย่าง WS02 มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี (รูปที่ 4.2-7) กำลังต้านทานแรงด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบประมาณร้อยละ 6 และ 15 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบในทิศทางบวกและลบตามลำดับ ค่าสติฟเนสที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบในช่วงที่ผนังอิฐก่อยังไม่แตกร้าว ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเป็นผลกระทบเนื่องจากแรงแบบวิจุกักรที่ใช้ในการทดสอบซึ่งไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง รูปที่ 4.2-8 แสดงการกระจายของความเค้นอัดหลัก (minimum principal stress) ที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อและชิ้นส่วนเสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากรูปจะเห็นว่าเมื่อระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นความเค้นในผนังจะมีค่ามากขึ้นตามแนวทแยง โดยมีค่าสูงสุดที่บริเวณมุมบนซ้ายและมุมล่างขวาของผนัง ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับ 0.54% ซึ่งเป็นจุดที่ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงสูงสุด ผนังบริเวณมุมบนซ้ายเกิดความเสียหายเนื่องจากความเค้นอัด (crushing) จากนั้นความเค้นอัดในบริเวณดังกล่าวจะลดลง ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับ 1.00% บริเวณที่เกิดความเค้นอัดสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาเป็นระยะประมาณ 600 มิลลิเมตร จากท้องคานและจะเลื่อนต่ำลงเมื่อระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มขึ้น โดยพฤติกรรมดังกล่าวก่อให้เกิดลักษณะการเสียรูปของเสาในลักษณะเสาสั้น (captive column) และ

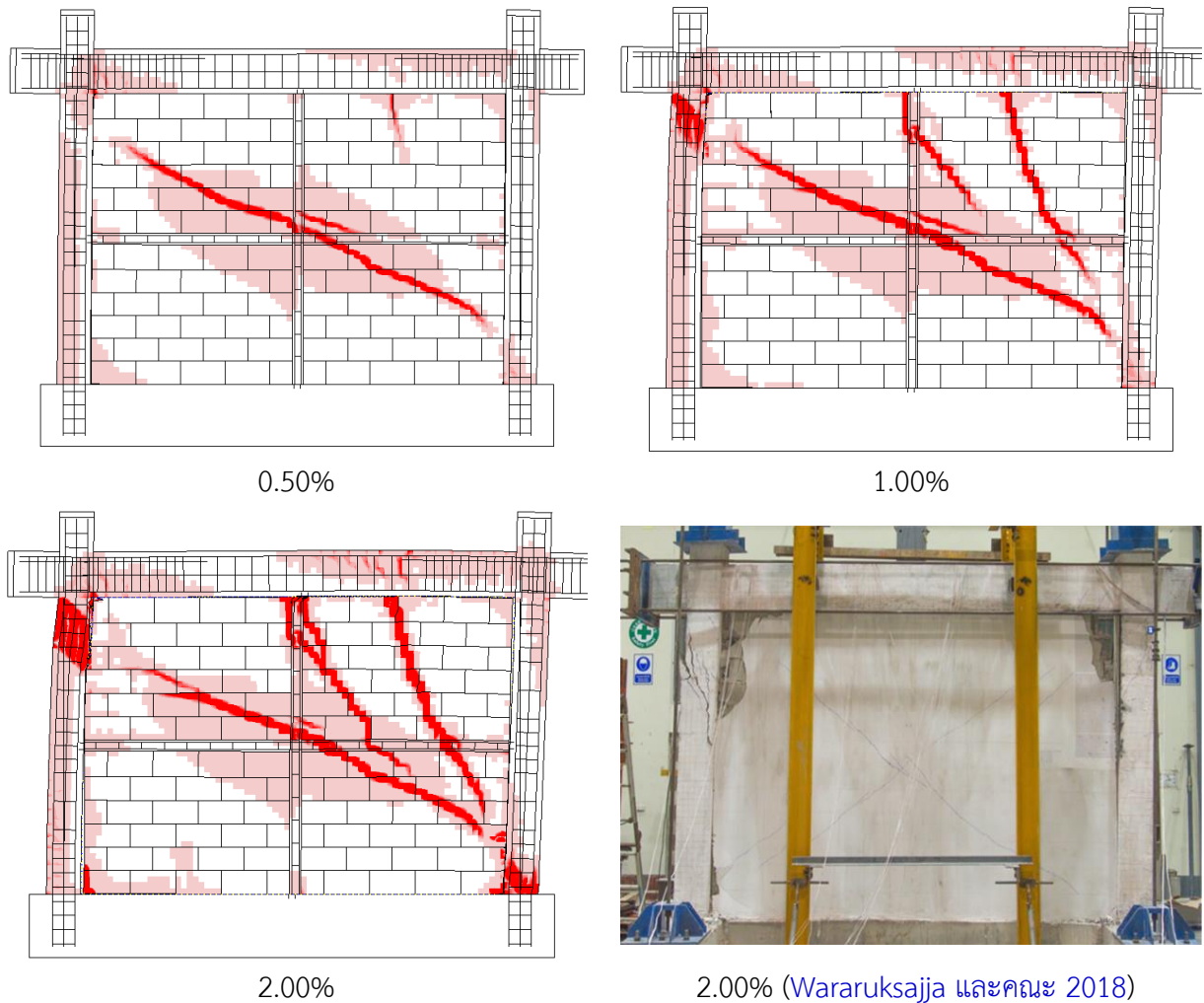
ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและการครากของเหล็กเสริมในเสาเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้น (รูปที่ 4.2-9) ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับลักษณะการแตกร้าวที่พบในการทดสอบ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถจำลองพฤติกรรมและความเสียหายของโครงสร้างได้ดี



รูปที่ 4.2-7 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของ WS02 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์



รูปที่ 4.2-8 การกระจายของความอัดหลัก (minimum principal stress) ที่ระยะการเคลื่อนตัวต่าง ๆ ของ WS02



รูปที่ 4.2-9 การแตกร้าวที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างต่างๆ ของตัวอย่าง WS02 เทียบกับผลการทดสอบ

4.3 การศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐก่อด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมในการต้านทานแรงและรูปแบบความเสียหายของผนังอิฐก่อที่มีและไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคานโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถจำลองผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังและคานแบบต่าง ๆ โดยจะทำการสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบตัวอย่างผนังอิฐก่อทั้งหมดที่ทำการทดสอบในการศึกษาวิจัยนี้ คานคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังอิฐก่อจะจำลองโดยใช้แบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างและแบบจำลองวัสดุตั้งที่อธิบายข้างต้น โดยกำหนดให้แรงผลัดด้านข้างกระทำที่กึ่งกลางของความลึกของคานด้านบนและกำหนดให้จุดรองรับที่ฐานเป็นแบบยึดแน่นตลอดแนวขอบล่างของคาน การให้แรงจะกระทำโดยการกำหนดระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ วิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้นแบบอินอีลาสติก คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต เหล็กเสริม และผนังอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.3-1 ถึง ตารางที่ 4.3-3 โดยในขั้นตอนนี้จะทำการสอบเทียบแบบจำลองจุดต่อระหว่างผนังอิฐและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (WBI) เพื่อหาคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับการเสริมกำลังแต่ละแบบดังแสดงในตารางที่ 4.3-4

ตารางที่ 4.3-1 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง		หมายเหตุ
		คาน	คานทับหลัง	
กำลังอัดสูงสุด (f'_c)	MPa	10.19	10.00	ได้จากการทดสอบ
กำลังดึงสูงสุด (f'_t)	MPa	1.02	1.00	สมมติเท่ากับ $0.1f'_m$
อีลาสติกโมดูลัส (E_c)	MPa	15141	14999	ACI318 (2014)
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (G_c)	N/m	19008	18940	$G_c = [15 + 0.43f'_c - 0.0036(f'_c)^2] * 1000$ [Lourenco, 2009]
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (G_f)	N/m	111	110	$G_f = 73f'_c^{0.18}$ [CEB-FIP, 2010]
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	-	0.20	0.20	-

ตารางที่ 4.3-2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ขนาดเหล็กเสริม	
		RB9	RB6
กำลังที่จุดคราก (f_y)	MPa	309	328
กำลังประลัย (f_u)	MPa	397	436
อีลาสติกโมดูลัส (E)	MPa	196200	196200
สเตรนฮาร์เดนนิ่ง	-	0.01	0.01

ตารางที่ 4.3-3 คุณสมบัติทางกลของอิฐก่อที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง	หมายเหตุ
กำลังอัดสูงสุด (f'_m)	MPa	5.91	ได้จากการทดสอบ
กำลังดึงสูงสุด (f'_{mt})	MPa	0.59	สมมติเท่ากับ $0.1f'_m$
อีลาสติกโมดูลัส (E_m)	MPa	3251	ได้จากการทดสอบ
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นอัด (G_c)	N/m	4137	$G_c = d_u(f'_m)$ d_u is ductility factor (for masonry = 0.7 mm) [Lourenco, 2009]
พลังงานการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง (G_f)	N/m	101	$G_f = 73f'_m^{0.18}$ [CEB-FIP, 2010]
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	-	0.20	-

ตารางที่ 4.3-4 คุณสมบัติทางกลของจุดต่อในผนังและระหว่างผนังและโครงต้านแรงดัด

คุณสมบัติวัสดุ	หน่วย	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง				หมายเหตุ
		SP1 และ SP2		SP3 และ SP4		
		WIB	WI	WIB	WI	
Normal Stiffness (K_{nn})	N/m ³	1.63×10 ¹¹	3.25×10 ¹²	7.50×10 ¹¹	3.25×10 ¹²	(1)
Shear Stiffness (K_{ss})	N/m ³	1.63×10 ¹⁰	1.30×10 ¹²	3.00×10 ¹¹	1.30×10 ¹²	(2)
Cohesion (C)	MPa	8.87×10 ⁻³	0.8865	0.015	0.8865	(2)
Friction angle (ϕ)	degree	30	30	30	30	(2)
Residual Friction angle (ϕ_r)	degree	25	25	25	25	(2)
Dilatancy angle (ψ)	degree	0.3	0.3	0.3	0.3	(2)
Confining normal stress (σ_w)	MPa	-0.591	-0.591	-1	-0.591	(3)
Exponential degradation coefficient (δ)	-	2	2	2	2	(2)
Tensile Strength (f'_t)	MPa	5.91×10 ⁻³	0.59	1.00×10 ⁻²	0.59	(2)
Tensile Fracture Energy (G_f^t)	N/m	20	101	20	101	(2)
Shear Fracture Energy (G_f^h)	N/m	2000	2000	2000	2000	(2)
Compressive Strength (f'_c)	MPa	5.91	10.00	10.00	10.00	(5)
Compressive Fracture Energy (G_c)	N/m	4137	7000	7000	7000	(4)
Shear traction control factor (C_s)	-	1	1	1	1	(2)
Equivalent plastic relative displacement (K_p)	-	0.006	0.003	0.006	0.003	(2)

(1) สมมติเท่ากับ E_m /thickness (2) Trial (3) สมมติเท่ากับ 0.1f'm (4) $G_c = du(f'm)$, du is ductility factor (for masonry = 0.7 mm) [Lourenco, 2009] (5) สมมติเท่ากับกำลังอัดของอิฐก่อหรือปูนก่อ

สำหรับตัวอย่าง SP3 และ SP4 ที่มีการเสริมจุดต่อโดยใช้เดือยเหล็กต้านแรงเฉือน (steel shear dowels) จะจำลองเดือยเหล็กโดยใช้ embedded reinforcement element เช่นเดียวกับเหล็กเสริมในคานคอนกรีต เนื่องจากกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength) ระหว่างเดือยเหล็กและคานทับหลังมีค่าต่ำ และแบบจำลองที่ใช้ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการถอนออกของเดือยเหล็กได้โดยตรง ในการศึกษาวิจัยนี้จึงใช้วิธีการจำลองพฤติกรรม การวิบัติแบบถอนออก (pull-out failure) ของเดือยเหล็กโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เสมือน (equivalent stress-strain relation) ในการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของเดือยเหล็ก โดยกำหนดให้ กำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดของเดือยเหล็กเท่ากับกำลังต้านทานการถอนออกระหว่างเดือยเหล็กและคานทับหลัง ซึ่งสามารถประมาณค่าโดยใช้สมการที่แนะนำโดย CEB-FIP, 2010 สำหรับเหล็กเส้นผิวเรียบ (plain surface bar) ดังแสดงในสมการที่ 4.3-1

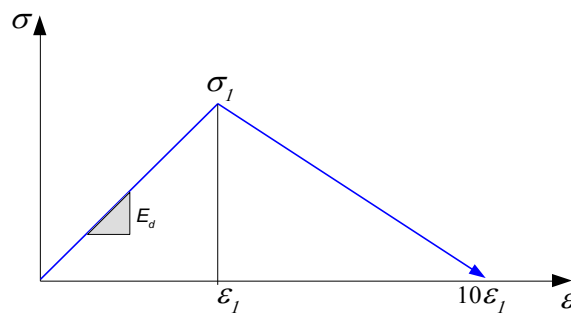
$$T = 0.15A_s\sqrt{f'_c} \quad (4.3-1)$$

โดยที่ T คือกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเดือยเหล็ก A_s คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมและคานทับหลัง f'_c คือกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้หล่อคานทับหลัง

จากการสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบพบว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสเสมือน (E_g) ของเดือยเหล็กที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 200 MPa ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเสมือนของเดือยเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3-1 โดยที่

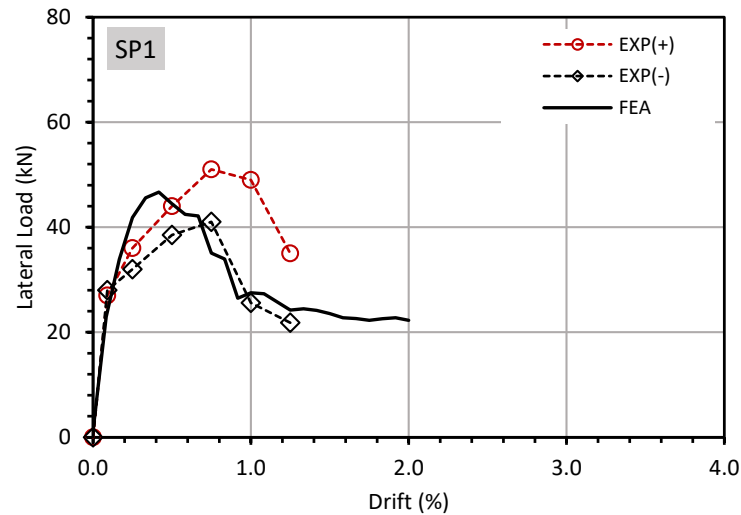
$$\sigma_l = T/A_g \quad (4.3-2)$$

เมื่อ A_g คือพื้นที่ภาคตัดของเดือยเหล็ก

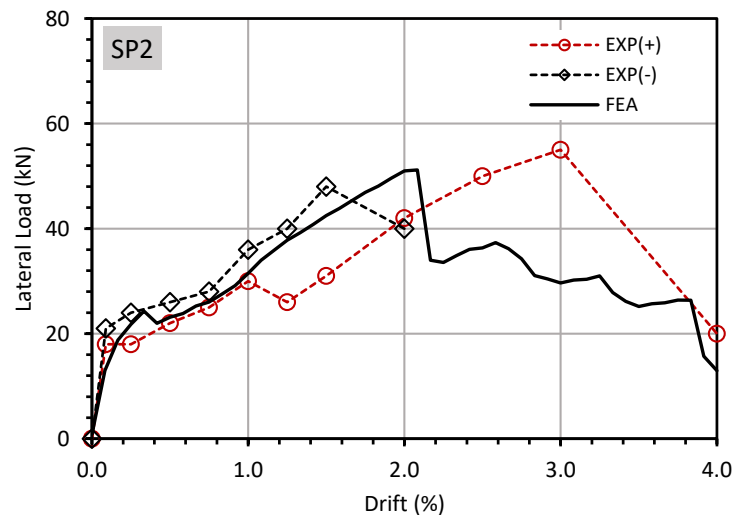


รูปที่ 4.3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเสมือนของเดือยเหล็ก

ผลการศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน รูปที่ 4.3-2 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ (FEA) ของตัวอย่างทดสอบ SP1 พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงต้านข้างของผนังอิฐก่อได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แบบจำลองสามารถจำลองสติฟเนสในช่วงที่มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างไม่เกิน 0.125% กำลังต้านทานแรงสูงสุดและการลดลงของกำลังต้านทาน (strength degradation) ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามค่าสติฟเนสที่ได้จากการวิเคราะห์ในช่วงระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.125% - 0.50% มีค่าสูงกว่าผลการทดสอบ เนื่องจากในการทดสอบที่ 0.125% ผนังเกิดการแตกร้าวในแนวราบในขณะที่ผลการวิเคราะห์ไม่พบการแตกร้าวในลักษณะดังกล่าว รูปที่ 4.3-3 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่างทดสอบ SP2 พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองกำลังต้านทานและสติฟเนสของผนังอิฐก่อได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยสามารถจำลองสติฟเนสในช่วงที่มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างไม่เกิน 1.50% กำลังต้านทานแรงสูงสุดและการเลื่อนไถล (slip) ระหว่างผนังอิฐและคานได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองเกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนตัวประมาณ 2.00% ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบในทิศทางบวกที่ 3.00% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเสียหายบริเวณรอยต่อระหว่างผนังและคานเนื่องจากแรงแบบวัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบ ส่งผลให้ผนังเกิดการเลื่อนไถลมากกว่าที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง



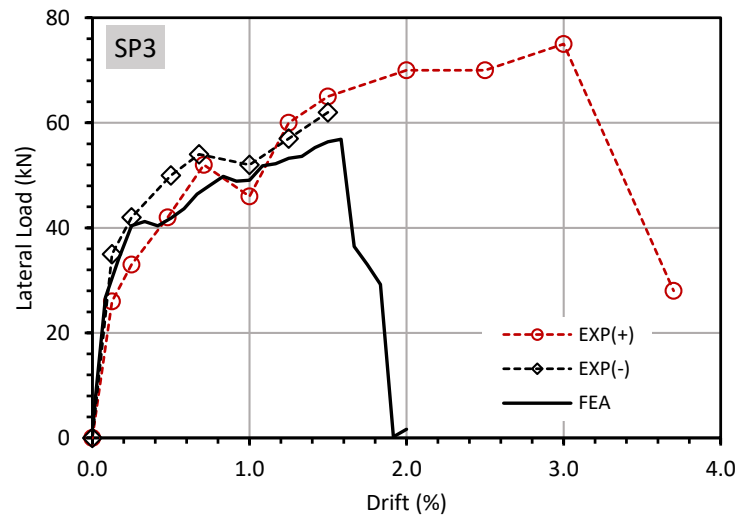
รูปที่ 4.3-2 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของ SP1 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์



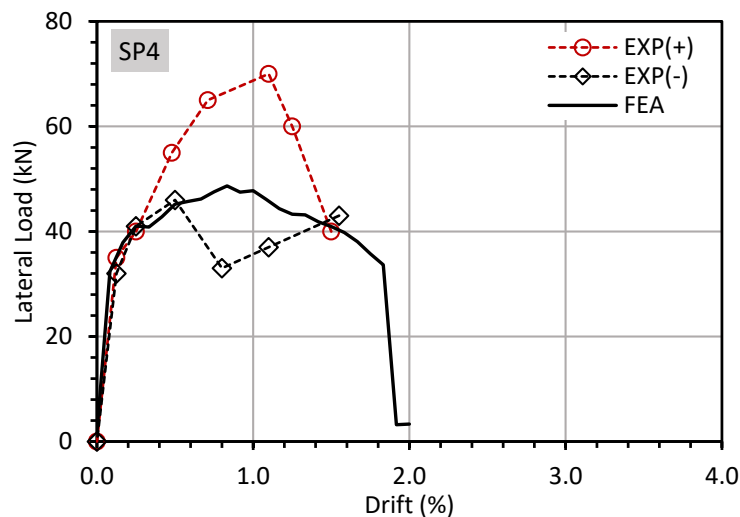
รูปที่ 4.3-3 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของ SP2 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์

กรณีของตัวอย่างที่เสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน รูปที่ 4.3-4 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ ของตัวอย่างทดสอบ SP3 พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองกำลังต้านทานและสติฟเนสของผนังอิฐก่อได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยสามารถจำลองสติฟเนสในช่วงที่มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างไม่เกิน 1.60% กำลังต้านทานแรงสูงสุดและการเลื่อนไถลระหว่างผนังอิฐและคานได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบประมาณร้อยละ 20 และเกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนตัวประมาณ 1.60% ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบในทิศทางบวกที่ 3.00% ซึ่งเป็นผลมาจากความเสียหายของคานทับหลังที่ได้จากการวิเคราะห์แตกต่างจากผลการทดสอบ กล่าวคือคานทับในแบบจำลองจะเกิดการวิบัติและสูญเสียกำลังต้านทานทันทีเมื่อเกิดการแตกร้าวซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบ รูปที่ 4.3-5 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่างทดสอบ SP4 พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองกำลังต้านทานและสติฟเนสของผนังอิฐก่อได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยสามารถจำลองสติฟ

เนสในช่วงที่มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างไม่เกิน 0.50% กำลังต้านทานแรงสูงสุดและการเลื่อนไถลได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามกำลังต้านทานแรงสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบในทิศทางบวกประมาณร้อยละ 28 และเกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนตัวประมาณ 0.80% ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบในทิศทางบวกที่ 1.10% ซึ่งเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนของกำลังต้านทานจากการทดสอบในทิศทางบวก เนื่องจากในการทดสอบทิศทางดังกล่าวผนังเกิดการเลื่อนไถลไปยันกับจุดยึดรั้งที่ฐานทำให้ผนังไม่สามารถเลื่อนไถลได้ตามปกติ ส่งผลให้กำลังต้านทานสูงขึ้น



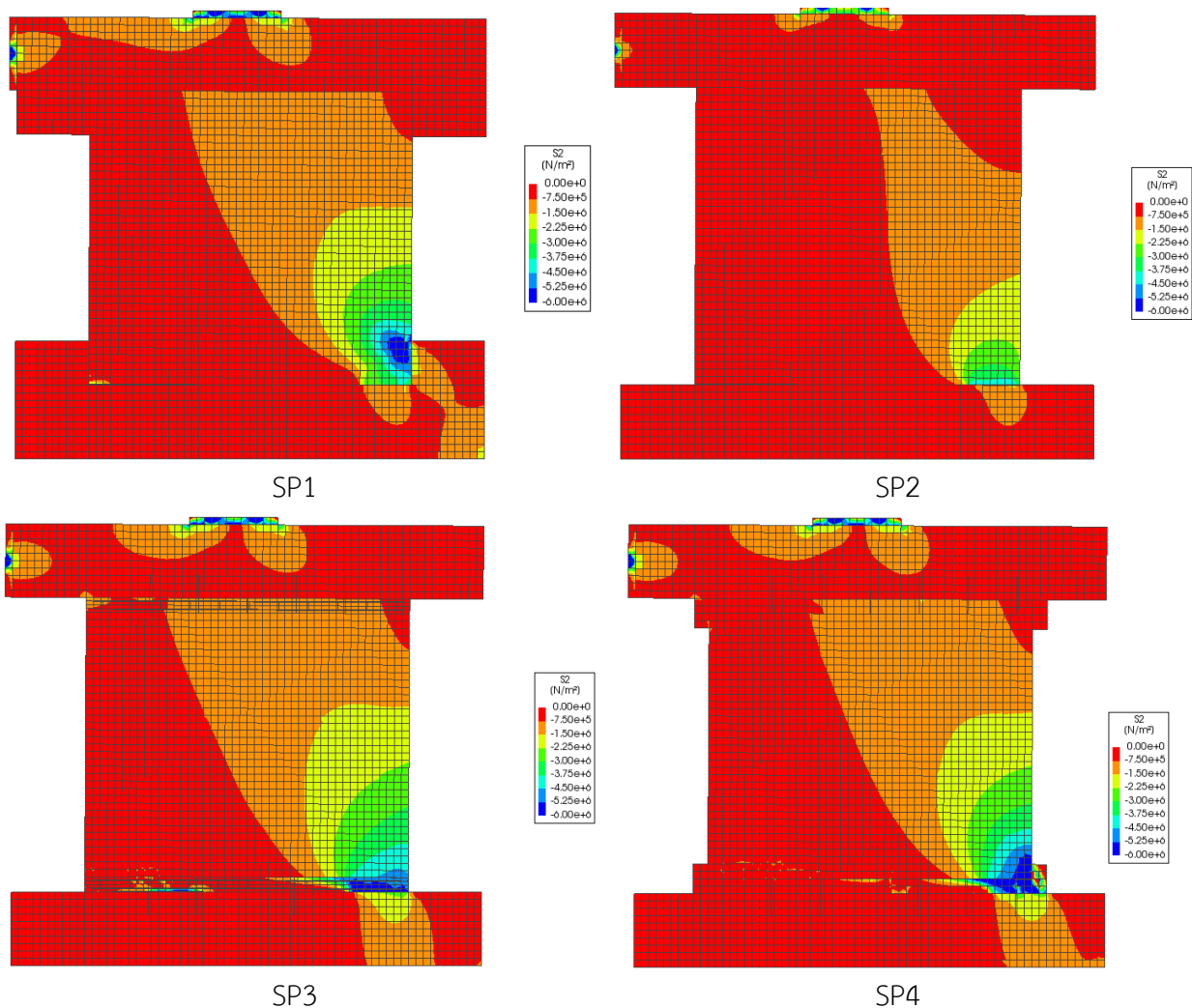
รูปที่ 4.3-4 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของ SP3 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์



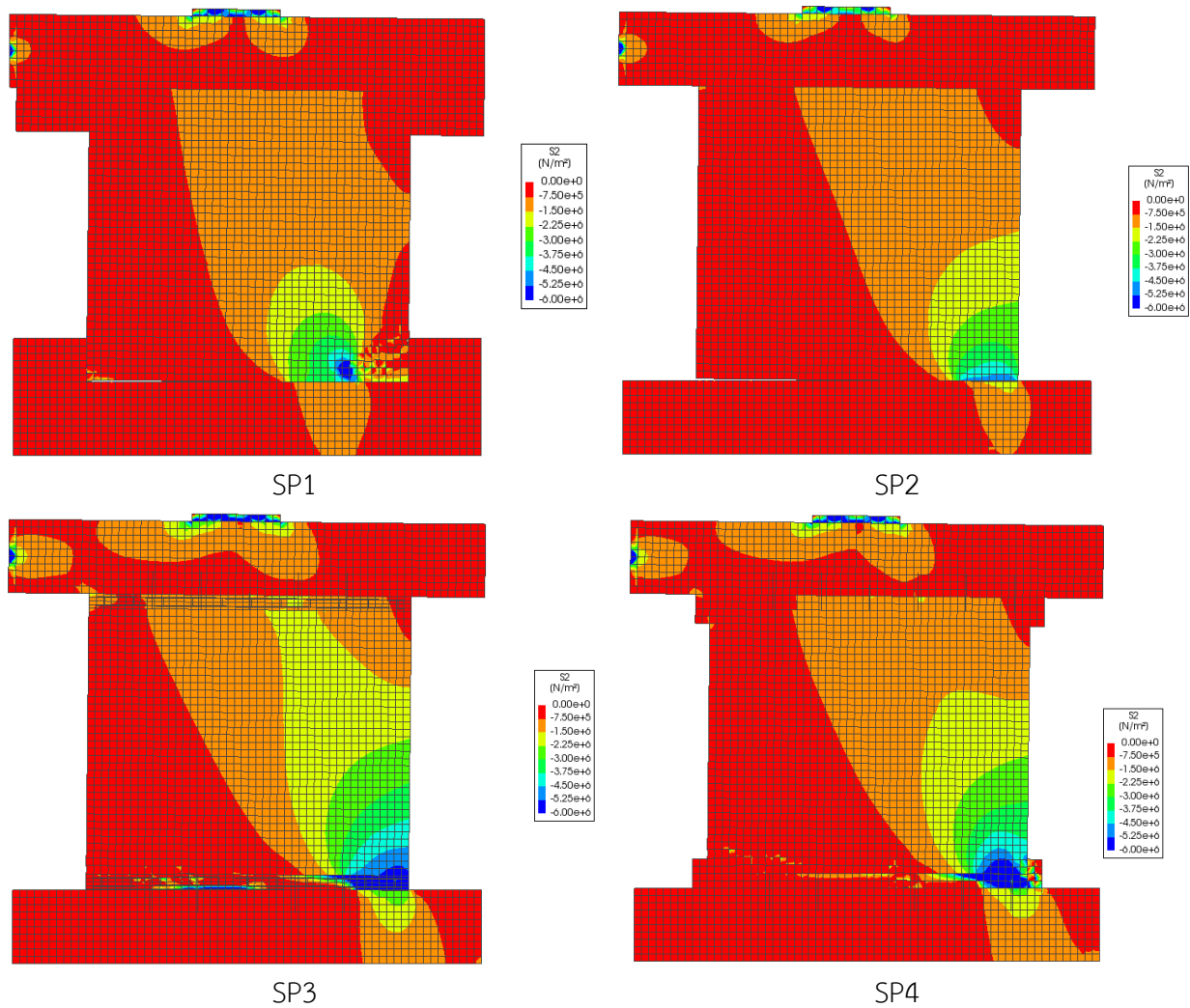
รูปที่ 4.3-5 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ของ SP4 จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์

รูปที่ 4.3-6 และ รูปที่ 4.3-7 แสดงรูปแบบการกระจายความเค้นอัดหลัก (minimum principal stress) ที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อและคานคอนกรีตเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ 0.50% และ 1.00% จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้าง ความเค้นในผนังจะมีค่ามากขึ้นตามแนวทแยงและมีค่าสูงสุดที่บริเวณมุมล่างขวาของผนัง ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์ 0.50% ผนัง

ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดบริเวณมุมเกิดการกระจุกตัวของความเค้นอัด (stress concentration) ตัวอย่าง SP2 มีค่าความเค้นอัดต่ำสุดเนื่องจากกำลังต้านทานการเลื่อนไถระหว่างผนังและคานต่ำ ความเค้นอัดในบริเวณดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตามระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง ที่ 1.00% พบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นอัดสูงสุดของตัวอย่าง SP1 เกิดการวิบัติและจุดที่มีค่าความเค้นสูงสุดเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านซ้าย (บริเวณที่ผนังยังไม่เกิดความเสียหาย) ตัวอย่าง SP2 ไม่เกิดความเสียหายและความเค้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คานทับหลังด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ SP3 เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึง บริเวณด้านล่างซ้ายของผนัง ตัวอย่าง SP4 หูช้างคอนกรีตเกิดความเสียหายส่งผลให้กำลังต้านทานแรงค้อย ๆ ลดลง จากผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการส่งถ่ายแรงของจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและคานมีผลกระทบต่อรูปแบบและขนาดของความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อ ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการต้านทานแรงด้านข้างและรูปแบบความเสียหายของผนังอย่างมาก กล่าวคือผนังที่จุดต่อมีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงไปยังคานสูงจะมีสมรรถนะในการต้านทานแรงที่ดีในระยะเคลื่อนตัวต่ำ ๆ แต่จะเกิดความเสียหายขึ้นที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำเช่นกัน ในขณะที่ผนังที่จุดต่อมีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงไปยังคานต่ำจะต้านทานแรงได้น้อยในระยะเคลื่อนตัวต่ำ ๆ แต่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในผนังที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำ

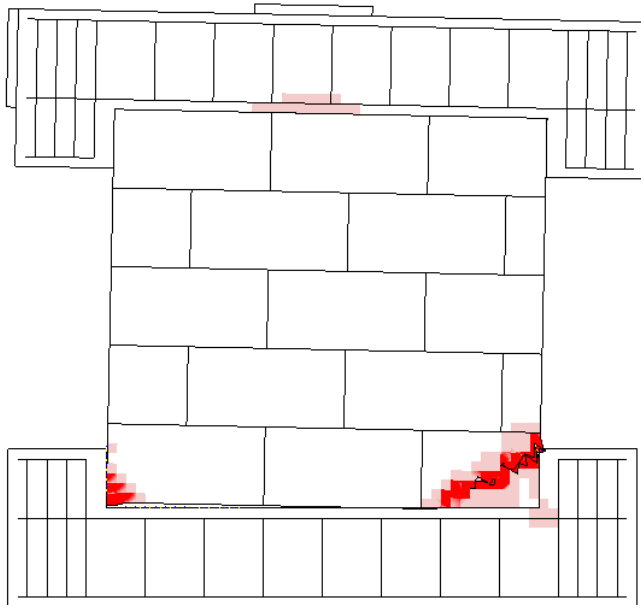


รูปที่ 4.3-6 การกระจายความเค้นอัดหลักในผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50%

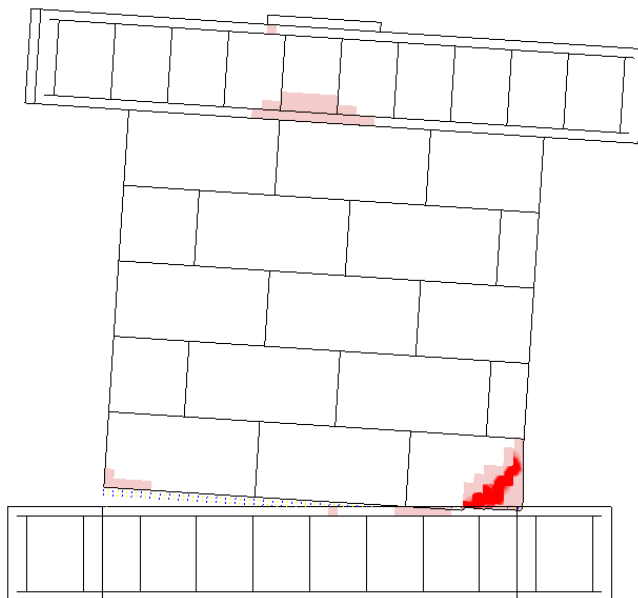


รูปที่ 4.3-7 การกระจายความเค้นอัดหลักในผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%

รูปที่ 4.3-8 และ รูปที่ 4.3-9 แสดงการเปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของตัวอย่างที่มีและไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อ จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองสามารถจำลองรูปแบบการแตกร้าวและการวิบัติของตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยตัวอย่าง SP1 เกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัดที่มุมล่างขวาและการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นดึงที่มุมล่างซ้าย ตัวอย่าง SP2 เกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัดที่มุมล่างขวา ไม่มีการแตกร้าวในผนัง ตัวอย่างทดสอบ SP3 และ SP4 เกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัดที่มุมล่างขวา คานทับหลังและหูช้างเกิดการแตกร้าว อย่างไรก็ตามพบว่าการแตกร้าวในผนังอิฐก่อที่ได้จากแบบจำลองมีขนาดและจำนวนมากกว่าการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในการทดสอบ



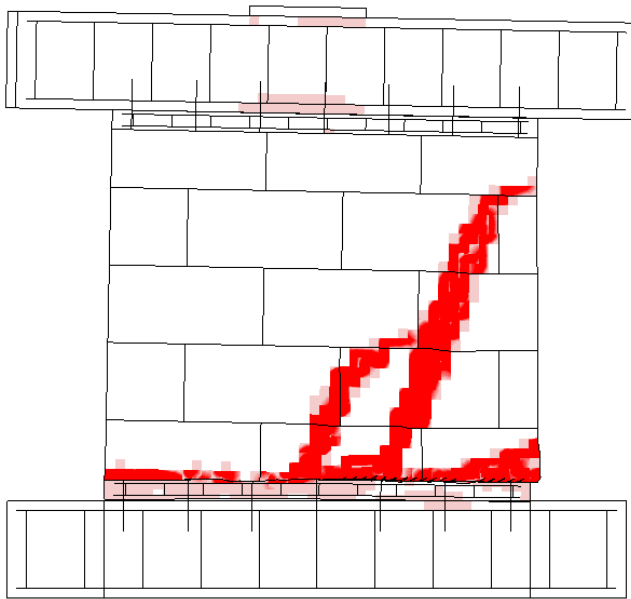
SP1



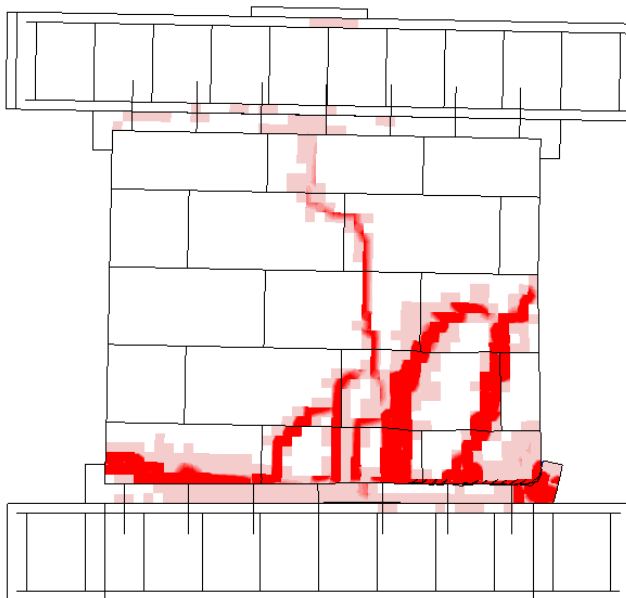
SP2



รูปที่ 4.3-8 เปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบและการวิเคราะห์ SP1 และ SP2



SP3



SP4



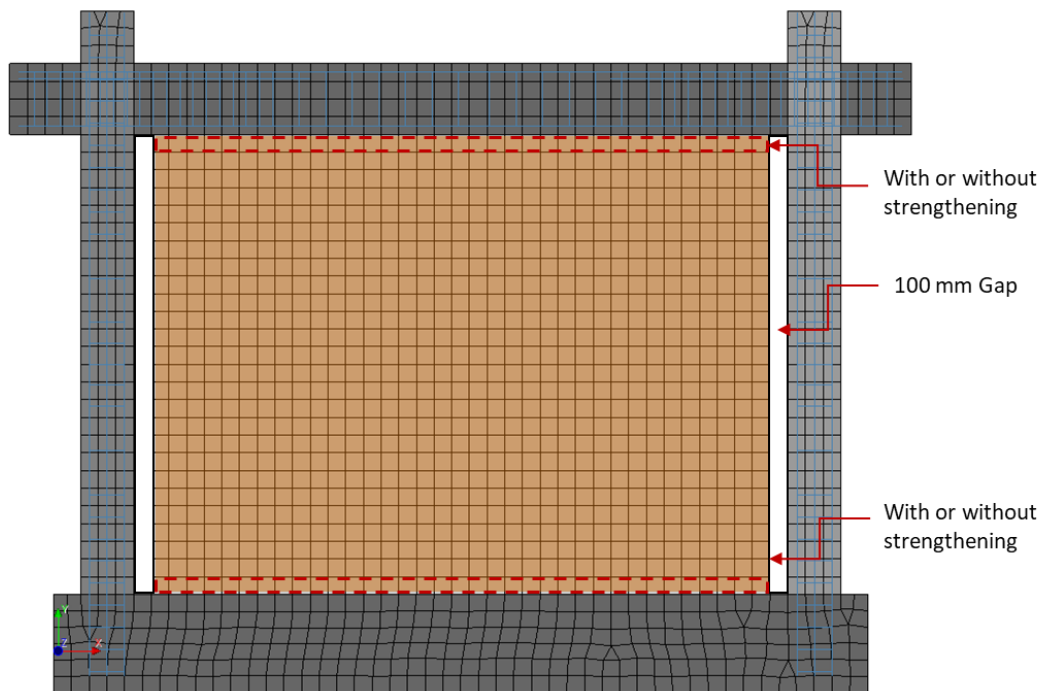
รูปที่ 4.3-9 เปรียบเทียบความเสียหายของตัวอย่างทดสอบจากการทดสอบและการวิเคราะห์ SP3 และ SP4

4.4 พฤติกรรมของโครงสร้างต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ

จากผลการศึกษาพฤติกรรมในการต้านทานแรงดัดข้างของผนังอิฐก่อที่มีและไม่มีการเสริมกำลังระหว่างจุดต่อผนังและคานดังที่อธิบายข้างต้น ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงและรูปแบบความเสียหายของโครงสร้างต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อโดยพิจารณาผลของการเสริมกำลังจุดต่อโดยการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยจะเลือกวิธีการเสริมกำลังที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง FEA มาใช้ จากผลการศึกษาในขั้นก่อนหน้าพบว่าวิธีการเสริมกำลังจุดต่อที่ใช้ใน

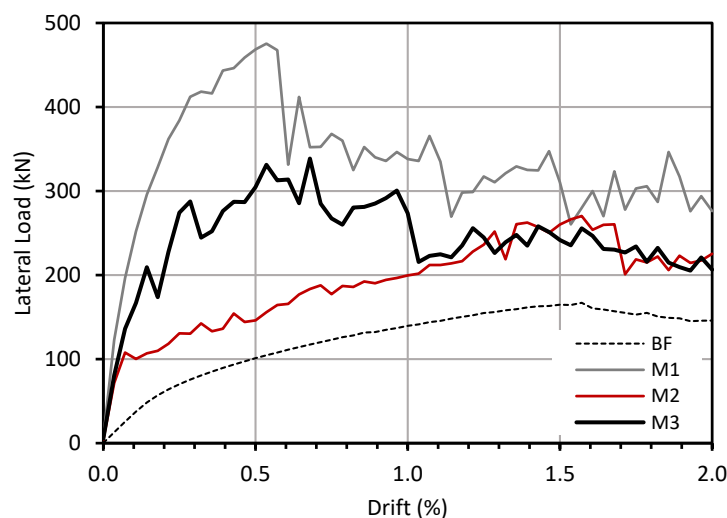
ตัวอย่างทดสอบ SP3 มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากมีสมรรถนะในการต้านทานแรงต้านข้างที่ดี จุดต่อระหว่างผนังและคานสามารถส่งถ่ายแรงและเกิดการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคานไม่มาก ส่งผลให้ผนังสามารถต้านทานแรงได้ดีและเกิดความเสียหายน้อยในช่วงการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ไม่เกิน 1.50% คานทับหลังที่มีการเสริมเหล็กจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่ากรณีที่ไม่เสริมเหล็ก เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาของโครงสร้างด้านแรงดัดเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังและเสา (wall-frame interaction) ในการศึกษาจะใช้วิธีการแยกผนังอิฐก่อออกจากเสาที่อยู่ติดกันที่เสนอโดย Srechai และ Lukkunaprasit (2013) ดังแสดงในรูปที่ 4.4-1 การศึกษาในส่วนนี้จะใช้แบบจำลองที่ได้พัฒนาและสอบเทียบในขั้นตอนก่อนหน้า โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างด้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อจำนวน 3 ตัวอย่าง

- 1) ตัวอย่างที่ไม่มีการแยกผนังออกจากเสาและไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน (M1) จะใช้ตัวอย่างที่ทำการทดสอบโดย Wararuksajja และคณะ (2018) ดังอธิบายรายละเอียดข้างต้น โดยจะใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิงในการเปรียบเทียบพฤติกรรม
- 2) ตัวอย่างที่มีการแยกผนังออกจากเสาแต่ไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน (M2) ซึ่งมีขนาด คุณสมบัติของวัสดุและรายละเอียดการเสริมเหล็กในโครงสร้างด้านแรงดัดเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบ M1 (รูปที่ 4.4-1)
- 3) ตัวอย่างที่มีการแยกผนังออกจากเสาและมีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน (M3) ซึ่งมีขนาด คุณสมบัติของวัสดุและรายละเอียดการเสริมเหล็กในโครงสร้างด้านแรงดัดเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบ M2 การเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคานใช้วิธีการเดียวกับตัวอย่างทดสอบ SP3 (รูปที่ 4.4-1)



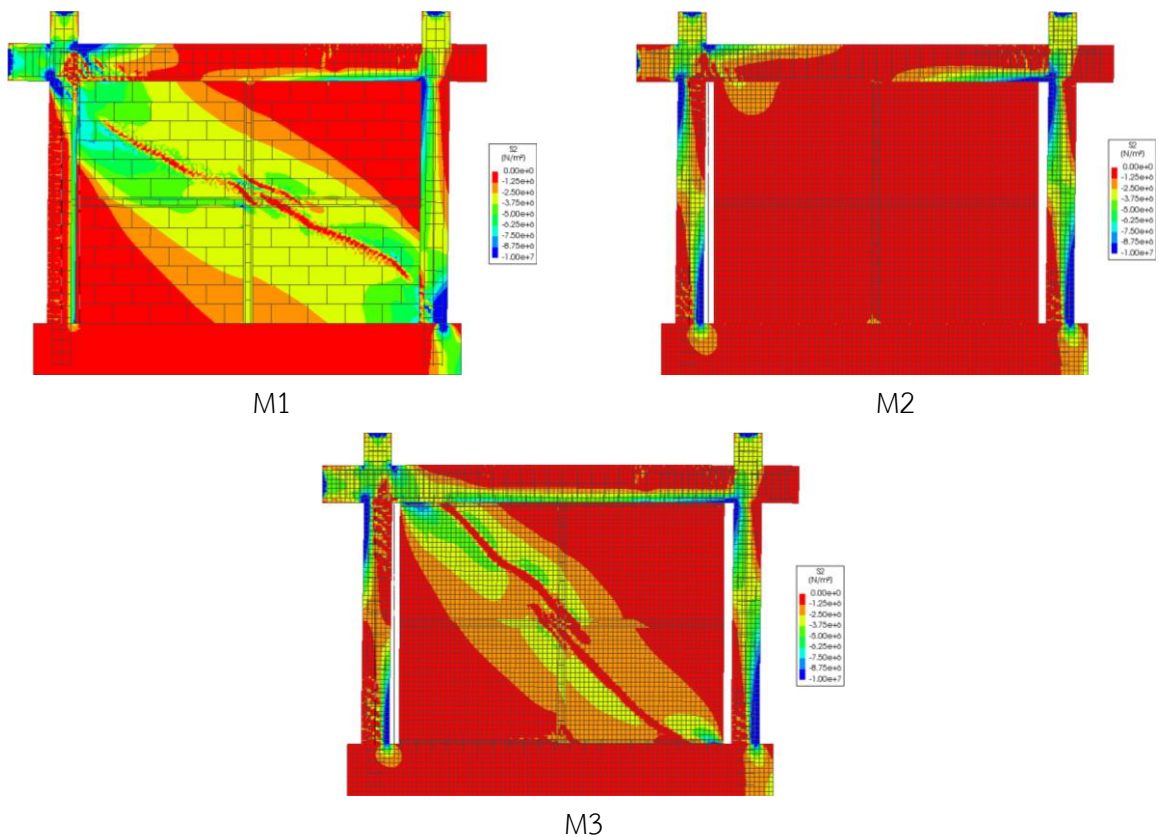
รูปที่ 4.4-1 โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่มีและไม่มีเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน

จากผลการวิเคราะห์พบว่าพฤติกรรมในการต้านทานแรงต้านข้างของ M1 M2 และ M3 มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน รูปที่ 4.4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงด้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ ตัวอย่าง M1 มีค่ากำลังต้านทานแรงสูงที่สุด โครงสร้างสามารถพัฒนากำลังต้านทานได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งผนังอิฐก่อเกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัด (crushing) บริเวณมุมรับแรงอัดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 0.54% มีกำลังต้านทาน 476 kN เมื่อผนังเกิดความเสียหายกำลังต้านทานลดลงเหลือประมาณร้อยละ 70 และค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามค่าสติเฟนสของตัวอย่างทั้งสามแบบมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.05% เมื่อเลยจุดดังกล่าวจะเกิดการเลื่อนไถล (slip) ระหว่างผนังอิฐก่อและคานในตัวอย่าง M2 ที่จุดดังกล่าวโครงสร้างมีแรงต้านทานประมาณ 100 kN ทำให้สติเฟนสของโครงสร้างลดลงอย่างมากเมื่อระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นโครงสร้างสามารถพัฒนากำลังต้านทานเพิ่มขึ้นจนถึง 270 kN ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 1.57% และกำลังต้านทานค่อย ๆ ลดลง สำหรับตัวอย่าง M3 พบว่าผนังอิฐก่อเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ประมาณ 0.15% ส่งผลให้สติเฟนสลดลง ที่จุดดังกล่าวมีกำลังต้านทานประมาณ 210 kN หลังจากนั้นกำลังต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ที่ 0.70% เกิดความเสียหายเนื่องจากความเค้นอัดที่มุมผนังร่วมกับการเลื่อนไถลของผนัง กำลังต้านทานที่จุดนี้มีค่าสูงสุดประมาณ 340 kN จากนั้นกำลังต้านทานค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากความเสียหายของผนัง จากผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่มีสมรรถนะในการต้านทานแรงต้านข้างที่ดี มีกำลังต้านทานสูงสุดประมาณร้อยละ 71 ของตัวอย่าง M1 และมีค่าสูงกว่าโครงด้านแรงดัดที่ไม่มีผนังอิฐก่อ (bare frame) ประมาณ 2 เท่า อีกทั้งหลังจากโครงสร้างมีกำลังต้านทานสูงสุด กำลังต้านทานจะค่อย ๆ ลดลง ไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดของผนังอิฐก่อ ในกรณีที่ไม่มีเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคาน (M2) พบว่าโครงสร้างมีกำลังต้านทานสูงสุดเพียงร้อยละ 56 ของตัวอย่าง M1 ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหวกำลังต้านทานที่ลดลงนี้จะส่งผลให้โครงสร้างเกิดระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มากและส่งผลให้เสาและคานเกิดความเสียหายมากด้วย ซึ่งจะทำให้สมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารลดลง

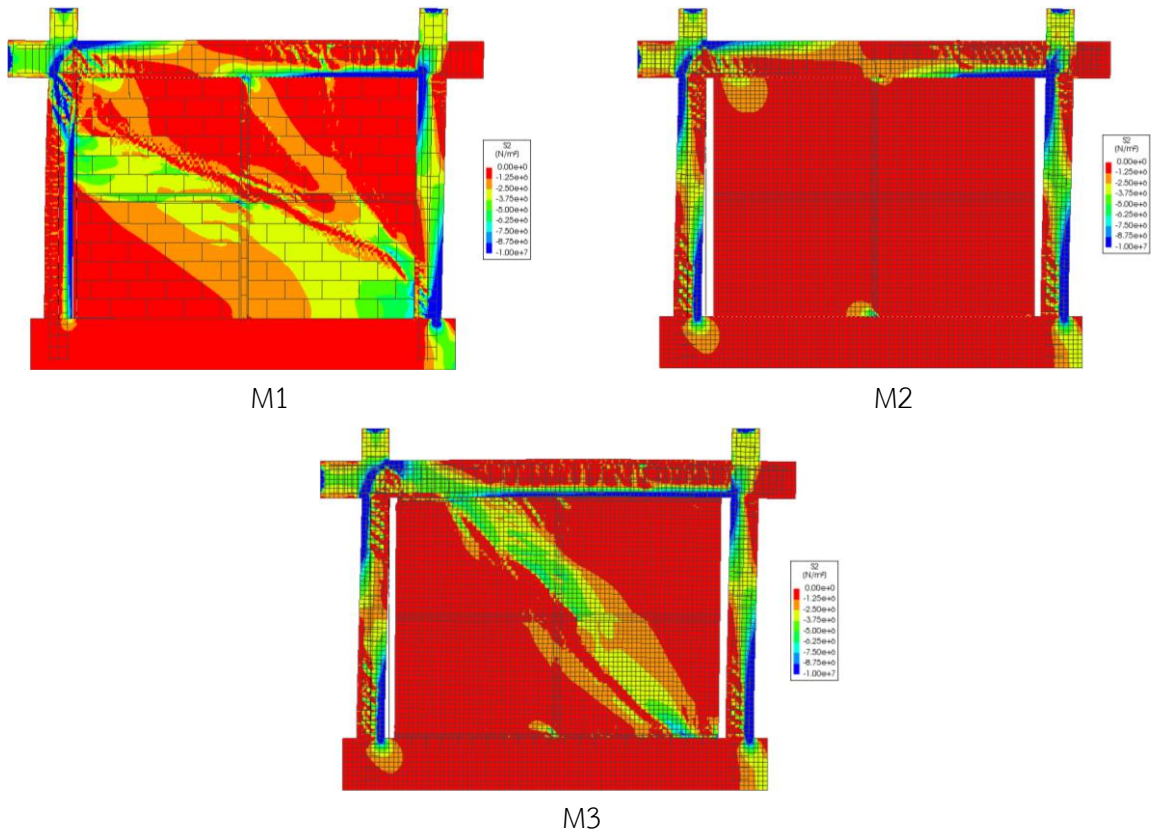


รูปที่ 4.4-2 แรงกระทำและระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงด้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อ

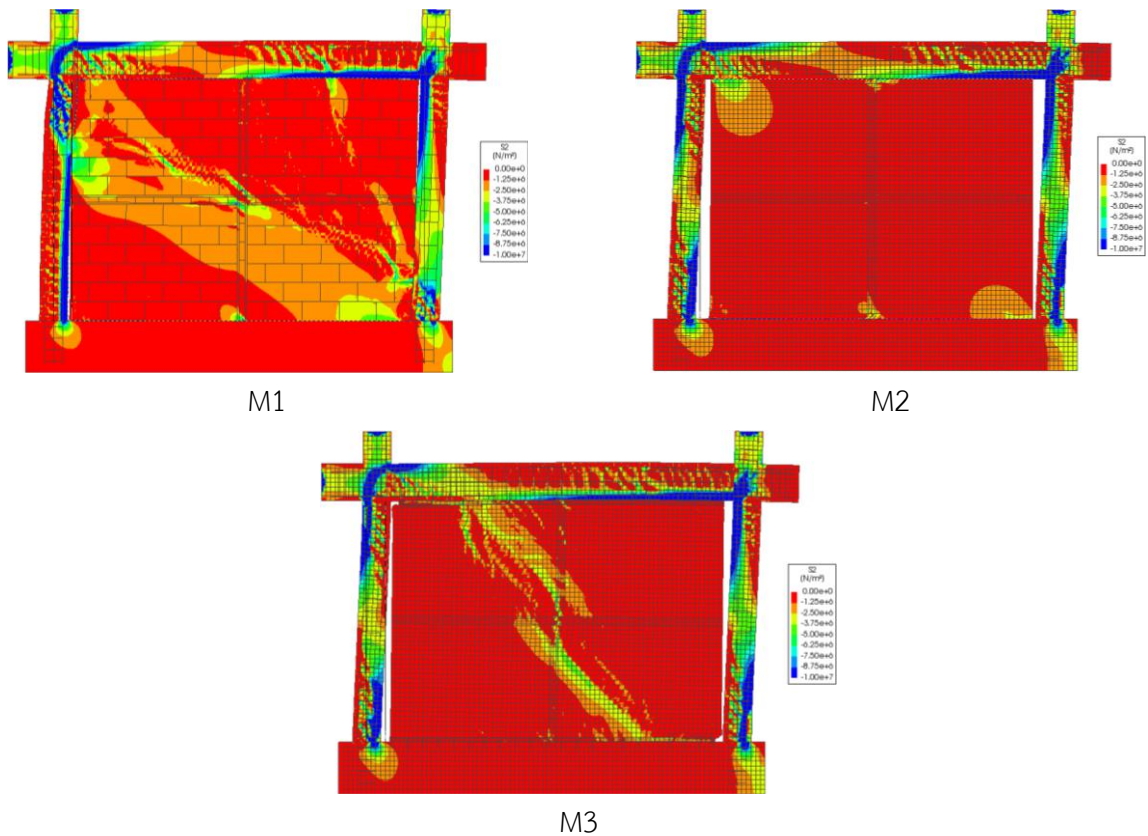
รูปที่ 4.4-3 ถึง รูปที่ 4.4-5 แสดงการกระจายของความเค้นอัดหลัก (minimum principal stress) ที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อและชิ้นส่วนเสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 0.50% 1.00% และ 2.00% ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้นความเค้นในผนังตัวอย่าง M1 และ M3 จะมีค่ามากขึ้นตามแนวทแยง โดยมีค่าสูงสุดที่บริเวณมุมบนซ้ายและมุมล่างขวาของผนัง และเกิดการแตกร้าวที่ 0.25% และ 0.15% ตามลำดับ ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับ 0.54% ซึ่งเป็นจุดที่ตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงสูงสุด ผนังบริเวณมุมบนซ้ายของตัวอย่าง M1 เกิดความเสียหายเนื่องจากความเค้นอัด (crushing) จากนั้นความเค้นอัดในบริเวณดังกล่าวจะลดลง ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับ 1.00% บริเวณที่เกิดความเค้นอัดสูงสุดจะเลื่อนต่ำลงมาและยึดรั้งการเสียรูปของเสา (captive column) และส่งผลให้แรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นในเสามีค่าสูง ในขณะที่ตัวอย่าง M3 ผนังจะเกิดการเลื่อนไถลและเสียหายเนื่องจากการบดอัดที่ 0.70% เมื่อผนังเสียหายบริเวณที่มีความเค้นอัดสูงสุดจะเลื่อนเข้าหาแนวกึ่งกลางของผนัง และไม่สัมผัสกับเสา จึงช่วยลดแรงเฉือนในเสาได้ ในกรณีของตัวอย่าง M2 พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในผนังอิฐก่อมีค่าน้อย เนื่องจากเมื่อโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวด้านข้างถึง 0.05% จะเกิดการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคาน ส่งผลให้โครงต้านแรงดัดส่งถ่ายแรงไปยังผนังได้น้อย มีพฤติกรรมต้านทานแรงคล้ายคลึงกับผนังแบบแยกส่วน (isolated wall) การกระจายของความเค้นในผนังและเสามีลักษณะสอดคล้องกับลักษณะการแตกร้าวที่เกิดขึ้นดังแสดงใน รูปที่ 4.4-6 ถึง รูปที่ 4.4-8 ซึ่งไม่พบการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนในเสาของตัวอย่าง M2 และ M3 ในขณะที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนอย่างรุนแรงในเสาของตัวอย่าง M1



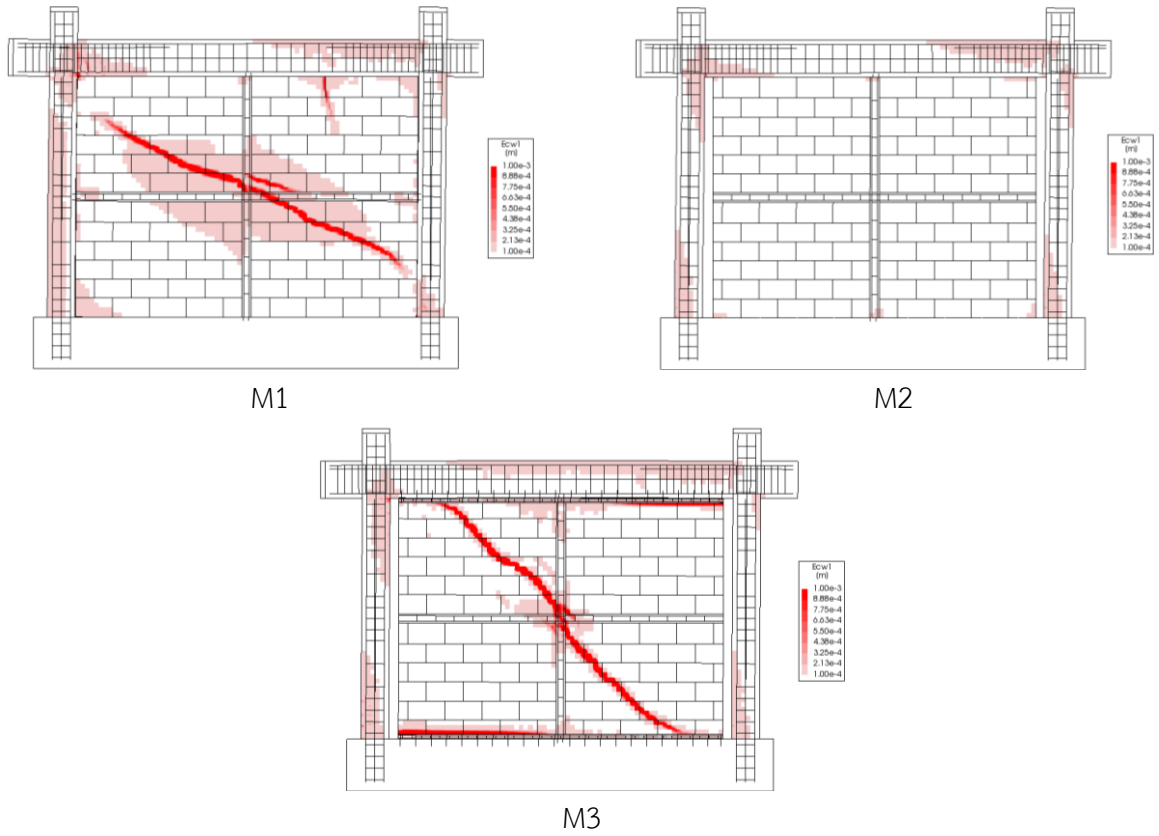
รูปที่ 4.4-3 ความเค้นอัดหลักในโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50%



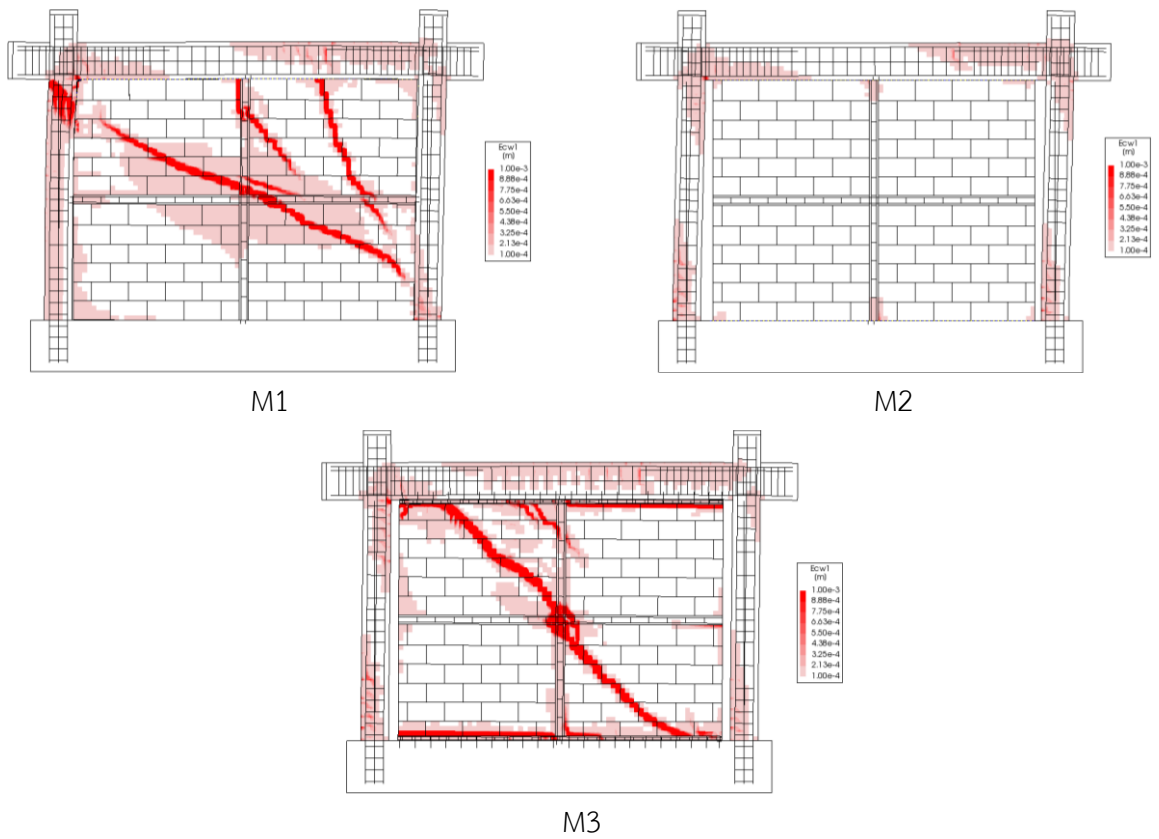
รูปที่ 4.4-4 ความเค้นอัดหลักในโครงสร้างต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%



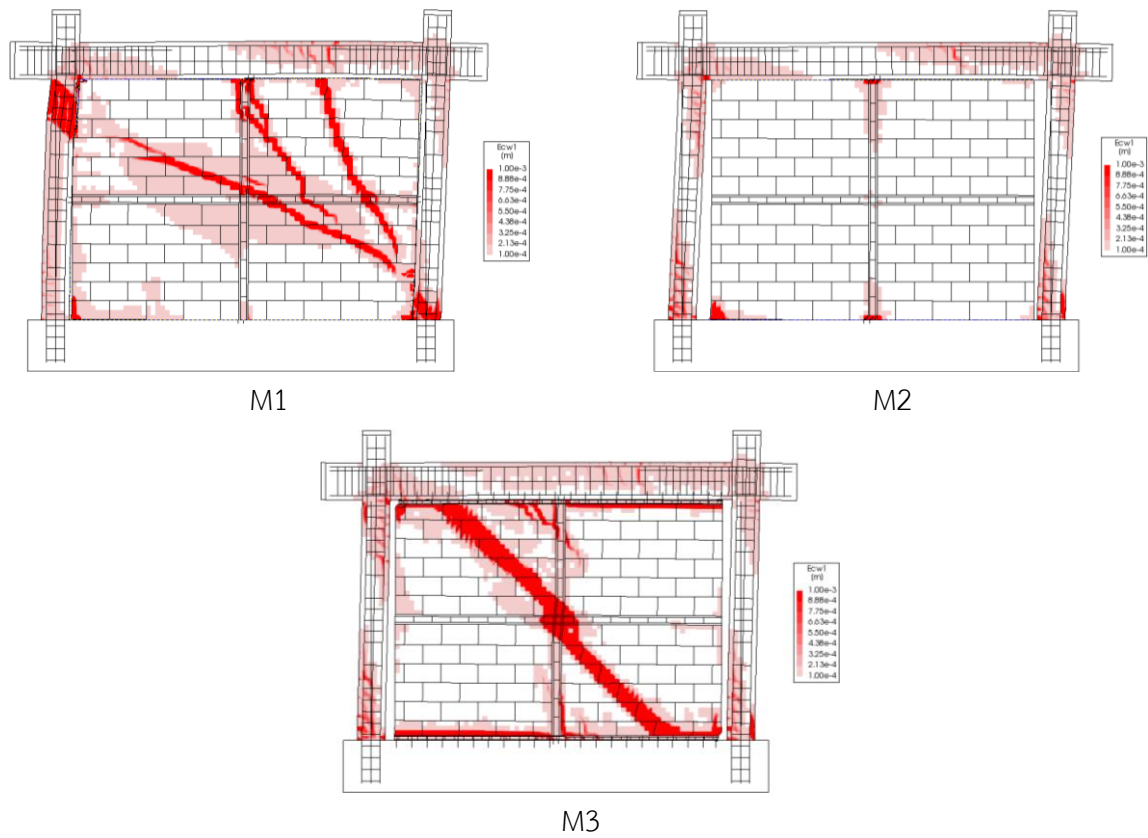
รูปที่ 4.4-5 ความเค้นอัดหลักในโครงสร้างต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 2.00%



รูปที่ 4.4-6 ความเสียหายของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 0.50%



รูปที่ 4.4-7 ความเสียหายของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 1.00%



รูปที่ 4.4-8 ความเสียหายของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อที่ระยะเคลื่อนตัว 2.00%

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมในการต้านทานแรงด้านข้าง รูปแบบความเสียหาย ของผนังอิฐก่อและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ล้อมรอบ โดยมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่สามารถเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวและลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยทำการศึกษาดังกล่าวด้วยวิธีทดสอบในห้องปฏิบัติการและวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มจากการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำการออกแบบตัวอย่างทดสอบและศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงแผ่นดินไหวของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อระหว่างผนังและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกต่างกันโดยการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดเล็กของผนังอิฐก่อที่มีจุดต่อแบบต่างๆ ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ในแนวตั้ง (constant vertical load) ร่วมกับแรงด้านข้างในระนาบแบบวงจักร (in-plane lateral cyclic loading test) ในห้องปฏิบัติการ นำผลที่ได้จากการทดสอบข้างต้นมาพัฒนาและสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมและสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังนี้

- 1) ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายแรงของจุดต่อระหว่างผนังอิฐก่อและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมการต้านทานแรงด้านข้างและรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนัง กรณีที่ผนังอิฐก่อมีการยึดรั้งเข้ากับเสาอย่างแข็งแรง ผนังจะต้านทานแรงด้านข้างในช่วงที่ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงสร้างมีค่าน้อยได้ดี แต่ผนังอิฐก่อจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแตกร้าวและการบดอัดเร็ว ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงลดลงอย่างกะทันหันเมื่อผนังเกิดความเสียหาย ในกรณีที่ผนังอิฐก่อไม่มีการยึดรั้งเข้ากับเสา ผนังจะต้านทานแรงด้านข้างได้น้อยเนื่องจากการเลื่อนไถลระหว่างผนังและเสา ส่งผลให้ไม่สามารถส่งถ่ายแรงจากโครงสร้างดัดไปยังผนังอิฐก่อได้ แต่ผนังอิฐก่อจะเกิดความเสียหายน้อย จุดต่อที่มีประสิทธิภาพสูงสุดควรมีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังและเสาได้โดยรวมถึงยอมให้ผนังเกิดการเลื่อนไถลได้ในระดับที่เหมาะสม
- 2) กรณีที่ใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับเสาที่หลังที่ไม่มีการเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐก่อและเสาของโครงสร้างดัด พบว่าจุดต่อสามารถส่งถ่ายแรงจากเสาไปยังผนังอิฐก่อได้ดี แต่เมื่อแรงที่ส่งถ่ายผ่านจุดต่อถึงขีดจำกัดในการต้านทานแรงเสาที่หลังจะเกิดการวิบัติแบบเปราะ ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างโดยรวมของโครงสร้างลดลงที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์มีค่าน้อย
- 3) การใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับเสาที่หลังที่มีการเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐก่อและเสาของโครงสร้างดัด สามารถส่งถ่ายแรงจากเสาไปยังผนังอิฐก่อในระดับที่เหมาะสม เมื่อแรงที่ส่งถ่ายผ่านจุดต่อถึงขีดจำกัดในการต้านทานแรง ผนังจะสามารถเลื่อนไถลได้ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นอีกทั้งช่วยลดการเอียงตัวออกนอกระนาบของผนัง

- 4) จากการศึกษาสมรรถนะในการต้านทานแรงต้านข้างของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผนังอิฐก่อส่งผลให้ค่าสติฟเนสและกำลังต้านทานแรงต้านข้างสูงสุดของโครงสร้างสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง อย่างไรก็ตามเมื่อผนังเกิดความเสียหาย กำลังต้านทานโดยรวมของโครงสร้างลดลงอย่างทันทีทันใด และแรงปฏิกิริสัมพันธ์จากผนังอิฐจะก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนขึ้นในเสา
- 5) การปรับปรุงจุดต่อระหว่างโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังอิฐก่อ โดยการแยกผนังไม่ให้ติดกับเสาและใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังที่มีการเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐก่อและคาน สามารถเพิ่มสติฟเนสและกำลังต้านทานแรงต้านข้างโดยรวมของโครงสร้างได้เมื่อเทียบกับโครงต้านแรงดัดที่ไม่มีผนัง ที่สำคัญวิธีการนี้สามารถป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือนของเสาเนื่องจากแรงปฏิกิริสัมพันธ์จากผนังอิฐก่อ และลดความเสียหายของผนังอิฐก่อได้อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้วยวิธีการทดสอบตัวอย่างผนังอิฐก่อขนาดเล็ก โดยไม่มีการทดสอบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ และได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อทั้งแบบที่มีและไม่มีการปรับปรุงจุดต่อ ซึ่งผลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากพฤติกรรมจริงของโครงสร้างอยู่บ้าง ดังนั้นสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต จึงควรทำการศึกษาพฤติกรรมและสมรรถนะในการต้านทานแรงต้านข้างของโครงต้านแรงดัดที่มีผนังอิฐก่อทั้งแบบที่มีและไม่มีการปรับปรุงจุดต่อโดยวิธีการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการปรับปรุงรายละเอียด รูปแบบ และวิธีการเสริมกำลังจุดต่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง (Reference)

- Acun, B., & Sucuoglu, H. (2006). Strengthening of masonry infill walls in reinforced concrete frames with wire mesh reinforcement. *Proceedings on 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, (pp. 6022-6031). San Francisco, USA.
- Al-Chaar, G., Issa, M., & Sweeney, S. (2002). Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames. *Journal of Structural Engineering*, 128(8), 1055-1063.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:8(1055)
- Altin, S., Anil, O., Kara, E., & Kaya, M. (2008). An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 39(4), 680-693. doi:10.1016/j.compositesb.2007.06.001.
- American Concrete Institute (ACI). (2014). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI318/318R, Farmington Hills, Michigan, USA.
- Angel, R., Abrams, D., Shapiro, D., Uzarski, J., & Webster, M. (1994). *Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills*. Rep. UILU-ENG-94-2005, University of Illinois, Urbana-Champaign, Department of Civil Engineering.
- Basili, M., Marcari, G., & Vestroni, F. (2016). Nonlinear analysis of masonry panel strengthened with textile reinforced mortar. *Engineering Structures*, 113, 245-258.
doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.021
- Bertero, V., & Brokken, S. (1983). Infills in seismic resistant building. *Journal of Structural*, 109(6), 1337-1361. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:6(1337)
- Billington, S. L., Marios, A. K., Blackard, B., Willam, K., Stavridis, A., & Shing, P. B. (2009). Evaluation of a sprayable ductile cement-based composite for the seismic retrofit of unreinforced masonry infills. *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*. San Francisco, United States.
- Calvi, G. M., & Bolognini, D. (2001). Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(2), 153-185.
doi:10.1080/13632460109350390
- CEB-FIP. (2010). *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,.
- Corte, G., Fiorino, L., & Mazzolani, F. (2008). Lateral-loading tests on a real building including masonry infill panels with and without FRP strengthening. *Journal of Material in Civil Engineering*, 20(6), 419-431. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:6(419)

- DIANA FEA BV. (2019). *DIANA Finite element analysis user manual*. Delftechpark 19a, 2628 XJ, Delft, The Netherlands.
- Erdem, I., Akyuz, U., Ersoy, U., & Ozcebe, G. (2006). An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames. *Engineering Structures*, 28(13), 1843-1851. doi:10.1016/j.engstruct.2006.03.010.
- Erol, G., Karadogan, H., & Cili, F. (2012). Seismic strengthening of infilled reinforced concrete frames by CFRP. *Proceedings on 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal.
- Hassan, A. F., & Sozen, M. A. (1997). Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes. *ACI Structural Journal*, 94((1)), 31-39.
- Kakaletsis, D., & Karayannis, C. (2008). Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(2), 197-221. doi:10.1080/13632460701299138
- Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2006). Code approaches to seismic design of masonry-infilled reinforced concrete frames: a state-of-art review. *Earthquake Spectra*, 20(4), 961-983.
- Koutromanos, I., Stavridis, A., Shing, P. B., & Willam, K. (2011). Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. *Computers & Structures*, 89(11-12), 1026-1037. doi:10.1016/j.compstruc.2011.01.006
- Kyriakides, M., & Billington, S. (2008). Seismic retrofit of masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames using sprayable ECC. *Proceedings on 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Lotfi, H. R., & Shing, P. B. (1994). Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures. *Journal of Structural Engineering*, 120(1), 63-80. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:1(63)
- Lourenco, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Ph.D. Dissertation, Universidade do Porto, Portugal.
- Lourenco, P. B., & Rots, J. G. (1997). Multisurface interface model for the analysis of masonry structures. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 660-668. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(660)
- Lukkunaprasit, P., Ruangrassamee, A., Boonyatee, T., Chintanapakdee, C., Jankaew, K., Thanasisathit, N., & Chandrangsu, T. (2016). Performance of structures in the Mw 6.1 Mae

- Lao earthquake in Thailand on May 5, 2014 and implications for future construction. *Journal of Earthquake Engineering*, 20(2), 219-242. doi:10.1080/13632469.2015.1051636
- Medeiros, P., Vasconelos, G., Lourenco, P. B., & Gouveia, J. (2013). Numerical modeling of non-confined and confined masonry walls. *Construction and Building Materials*, 41, 968-976. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.013
- Mehrabi, A. B., & Shing, P. B. (1997). Finite element modeling of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 604–613. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(604)
- Mehrabi, A. B., Shing, B. P., Schuller, M., & Noland, J. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 228-237. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(228)
- Mohyeddin, A., Goldsworthy, H. M., & Gad, E. F. (2013). FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading. *Engineering Structures*, 51, 73-87. doi:10.1016/j.engstruct.2013.01.012
- Mostafaei, H., & Kabeyasawa, T. (2004). 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 Institut*, 73, 133-156.
- Nasiri, E., & Liu, Y. (2017). Development of a detailed 3D FE model for analysis of the in-plane behaviour of masonry infilled concrete frames. *Engineering Structures*, 143, 603-616. doi:10.1016/j.engstruct.2017.04.049
- Nasiri, E., & Liu, Y. (2019). The out-of-plane behaviour of concrete masonry infills bounded by reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 184, 406-420. doi:10.1016/j.engstruct.2019.01.098
- Oliveira, D. V., & Lourenco, P. B. (2004). Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements. *Computers & structures*, 82(17-19), 1451–1461. doi:10.1016/j.compstruc.2004.03.041
- Ozturkoglu, O., Ucar, T., & Yesilce, Y. (2017). Effect of masonry infill walls with openings on nonlinear response of reinforced concrete frames. *Earthquakes and Structures*, 12(3), 333-347. doi:10.12989/eas.2017.12.3.333
- Panagiotakos, T., & Fardis, M. (1996). Seismic response of infilled RC frames structures. *Proceedings on 11th world conference on earthquake engineering*. Acapulco, Mexico.

- Pujol, S., & Fick, D. (2010). The test of a full-scale three-story rc structure with masonry infill walls. *Engineering Structures*, 32(10), 3112-3121. doi:10.1016/j.engstruct.2010.05.030
- Sattar, S. (2013). *Influence of masonry infill walls and other buildings characteristics on seismic collapse of concrete frame buildings*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, USA.
- Srechai, J., & Lukkunaprasit, P. (2013). An innovative scheme for retrofitting masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 6(4), 277-289.
- Stavridis, A. (2009). *Analytical and experimental study of seismic performance of reinforced concrete frames infilled with masonry walls*. Ph.D. Dissertation, University of California, San Diego.
- Stavridis, A., & Shing, P. B. (2010). Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 136(3), 285–296. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.116
- Torrisi, G. S., Crisafulli, F. J., & Pavese, A. (2012). An innovative model for the in-Plane nonlinear analysis of confined masonry and infilled frame structures. *Proceedings on 15th World Conference on Earthquake Engineering (No. 0574)*. Lisbon, Portugal.
- Wararuksajja, W., Srechai, J., & Leeletaviwat, S. (2018). Cyclic testing of intermediate RC moment frames with concrete block walls. *Proceedings on the 7th Asia Conference on Earthquake Engineering (No. ACEE0170)*. Bangkok, Thailand.
- Yuen, Y. P., & Kuang, J. S. (2015). Nonlinear seismic responses and lateral force transfer mechanisms of RC frames with different infill configurations. *Engineering Structures*, 91, 125-140. doi:10.1016/j.engstruct.2015.02.031
- Yuksel, E., Ozkaynak, H., Buyukozturk, O., Yalcin, C., Dindar, A., Surmeli, M., & Tastan, D. (2010). Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames. *Construction and Building Materials*, 24(4), 596-609. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.09.005.
- Zovkic, J., Sigmund, V., & Guljas, I. (2013). Cyclic testing of a single bay reinforced concrete frames with various types of masonry infill. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 42(8), 1131-1149. doi:10.1002/eqe.2263
- เกริกฤทธิ พรหมดวง. (2553). *การทดสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงสลับทิศ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- เจนศักดิ์ คชนิล. (2552). *การทดสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงสลับทิศ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์. (2557). *พัฒนาการของวิศวกรรมแผ่นดินไหวในประเทศไทยจากอดีตสู่อนาคต*. เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาเรื่อง "บทเรียนแผ่นดินไหวแม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว, กรุงเทพฯ. วรากร กาญจนภิ. (2559). *สมบัติเชิงกลของผนังอิฐก่อและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์, และ เป็นหนึ่ง วานิชชัย. (2557). *บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคารขนาดเล็กและขนาดกลางในเหตุการณ์แผ่นดินไหวแม่ลาว จังหวัดเชียงราย*. เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาเรื่อง "บทเรียนแผ่นดินไหวแม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว", กรุงเทพฯ.
- สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์, วิโรจน์ บุญญภิญโญ, ไพบุลย์ ปัญญาคะโป, และ กิตติภูมิ รอดสิน. (2561). *พฤติกรรมและการเสริมกำลังอาคารที่ใช้ผนังอิฐก่อและอาคารที่ไม่มีการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว*. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.