

ผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังและโครงด้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อพฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างในระนาบ EFFECTS OF WALL-RC FRAME INTERCONNECTION ON MASONRY INFILLED WALL BEHAVIOR UNDER IN-PLANE LATERAL LOADING

จรรย์ ศรีชัย^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, ประเทศไทย

*Corresponding author address: srechai@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษากฎการการต้านทานแรงด้านข้างของผนังอิฐก่อ เพื่อพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและโครงด้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวและลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยวิธีการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงด้านข้างแบบวัฏจักรจำนวน 4 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการส่งถ่ายแรงของจุดต่อระหว่างผนังอิฐและคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลกระทบอย่างมากต่อการต้านทานแรงและรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในผนัง จุดต่อที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงได้ดีและยอมให้ผนังเกิดการเลื่อนไถลได้ในระดับที่เหมาะสม การใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังที่มีการเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังอิฐและคานของโครงด้านแรงดัด สามารถส่งถ่ายแรงจากผนังไปยังคานในระดับที่เหมาะสม เมื่อแรงที่ส่งถ่ายผ่านจุดต่อถึงขีดจำกัดในการต้านทานแรงผนังจะสามารถเลื่อนไถลได้ ส่งผลให้ผนังเกิดความเสียหายน้อยกว่ากรณีที่มีการยึดผนังกับคานอย่างแน่นหนา

คำสำคัญ: ผนังอิฐก่อ, การเสริมกำลัง, โครงด้านแรงดัด, แรงแบบวัฏจักร

Abstract

This article aims to evaluate the behavior of masonry walls under lateral in-plane loading. The goal was to develop an efficient construction detail for the wall-frame connection to increase lateral load resisting performance and reduce structural damages of the seismic-resistant structures. Four specimens of masonry wall-frame structural components were tested under in-plane horizontal cyclic loads. Based on the results, the load transfer capability of the beam-to-wall connection had a significant effect on the load resisting performance and damage level of the wall. The efficient connection must provide sufficient load transfer capability and allows a suitable slip between the wall and beams. Using the steel shear dowels and reinforced concrete tie beam at the beam-to-wall connection showed a suitable load transfer capability. Once the transferred load exceeds a certain threshold, a slip can occur between the wall and beams. Consequently, the wall's damage was considerably reduced, compared with the specimen that the wall was fixed to the beams.

Keywords: Masonry Wall, Strengthening, Moment Frame, Cyclic Loads

1. บทนำ

โครงด้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ เป็นระบบโครงสร้างที่พบได้บ่อยในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยเฉพาะในอาคารที่มีขนาดเล็กและขนาดกลาง ที่ผ่านมาระบบอาคารประเภทนี้จะพิจารณาให้ผนังอิฐเป็นเพียงส่วนประกอบของอาคารและไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการต้านทานแรงของโครงสร้าง เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างมีความซับซ้อน ยุ่งยากไม่สะดวกต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตามผลการศึกษาและการสำรวจความเสียหายของอาคารหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีต พบว่าผนังอิฐสามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงด้านข้าง สติเฟนส และความสามารถในการสลายพลังงานให้กับโครงสร้างได้อย่างมาก [1], [2] ในทางกลับกันหากทำการก่อสร้างไม่เหมาะสมหรือโครงสร้างไม่ได้รับการออกแบบ

อย่างถูกต้อง ผนังอิฐสามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้างได้ อาทิ เป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในเสาและจุดต่อเสา คาน [3], [4] ซึ่งพบได้บ่อยในโครงด้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทที่มีความเหนียวจำกัด (non-ductile frames) [5]-[7] การวิบัติดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงปริมาณมากส่งถ่ายจากผนังอิฐไปยังเสากลางหลังจากที่ผนังเกิดความเสียหายและก่อให้เกิดพฤติกรรมแบบเสาสั้น (captive column) การวิบัติในลักษณะนี้สามารถพบได้ถึงแม้จะเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงระดับกลาง [7] ด้วยเหตุดังกล่าวสำหรับอาคารที่จะก่อสร้างใหม่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว ในปัจจุบันมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง [8] ได้กำหนดให้พิจารณาผลกระทบของผนังอิฐก่อในการออกแบบโครงสร้าง โดยจะต้องออกแบบให้เสามีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่

เพียงพอเมื่อพิจารณาผลของแรงปฏิสัมพันธ์จากผนัง

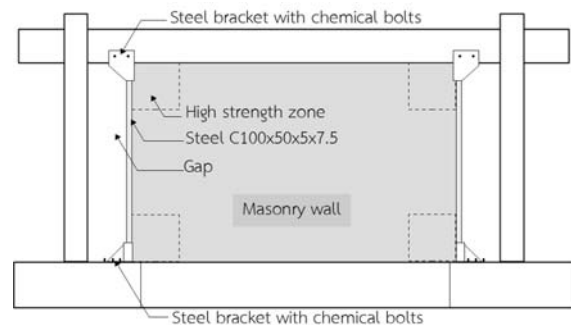
สำหรับอาคารที่มีอยู่เดิมเนื่องจากไม่สามารถกำหนดขนาดและรายละเอียดของโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ดังนั้นมีงานวิจัยจำนวนมาก [9]-[15] พัฒนาและเสนอวิธีการเพิ่มความเหนียวให้กับผนังอิฐและเสาของโครงสร้างดัดเพื่อป้องกันการวิบัติที่ไม่พึงประสงค์ โดยใช้วิธีการเสริมกำลังด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ อาทิ การเสริมเหล็กคดแฉกรงในชั้นปูนฉาบของผนังและเสา การใช้วัสดุประเภท CFRP เสริมที่ผิวนอกของโครงสร้าง และการใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนเสริมความแข็งแรงบริเวณจุดต่อระหว่างโครงสร้างดัดและผนังเพื่อลดแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างผนังและเสา เมื่อใช้วิธีการดังกล่าวพบว่าตัวอย่างทดสอบมีสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างที่ดีขึ้น มีระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ก่อนที่จะเกิดการวิบัติของผนังและโครงสร้างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อตัวอย่างทดสอบมีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างถึงระดับหนึ่ง จุดต่อระหว่างโครงสร้างดัดและผนังจะเกิดความเสียหายเนื่องจากเหล็กเดือย หรือแผ่น CFRP หลุดจากจุดยึดรั้ง ส่งผลให้กำลังต้านทานของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างฉับพลันและก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้นในเสา จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า การถ่ายแรงจากผนังไปสู่โครงสร้างดัดอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างและลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในเสา

ในบทความนี้จะทำการศึกษาลักษณะของจุดต่อระหว่างผนังอิฐและโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อสมรรถนะในการต้านทานแรงด้านข้างในระนาบของโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษากลไกการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังอิฐและคานของโครงสร้างดัดด้วยวิธีการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างของผนังอิฐภายใต้แรงด้านข้างแบบวิถัจจร เพื่อพัฒนาและเสนอวิธีการเสริมกำลังจุดต่อที่เหมาะสม

2. กรอบแนวคิดในการปรับปรุงสมรรถนะโครงสร้าง

เพื่อป้องกันการวิบัติของเสาเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากแรงปฏิสัมพันธ์ของผนังอิฐ Srechai และ Lukkunaprasit [3] ได้เสนอวิธีการปรับปรุงกลไกการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังและโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีการแยกผนังอิฐออกจากเสาและปรับปรุงวิธีการถ่ายแรงจากผนังไปสู่โครงสร้างดัดโดยใช้หูช้างเหล็กดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าวิธีการนี้ส่งผลให้สมรรถนะในการต้านทานแรงของโครงสร้างดีขึ้นอย่างมากและไม่มีความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนเกิดขึ้นในเสาและจุดต่อเสาคาน ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ (drift) 2.00% ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบอาคารโดยทั่วไปพบเพียงการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด (flexural cracks) และการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดร่วมกับแรงเฉือน (flexural-shear cracks) ซึ่งเป็นเพียงรอยร้าวขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติเนื่องจากมีความยุ่งยากในการก่อสร้าง

การศึกษานี้จะพัฒนาการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังอิฐและโครงสร้างดัดทางเลือก โดยใช้กรอบแนวคิดในการลดแรงเฉือนในเสาเนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์จากผนังโดยการแยกผนังอิฐออกจากเสาที่เสนอโดย Srechai และ Lukkunaprasit [3] และมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังและคานของโครงสร้างดัดด้วยการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคานที่มีประสิทธิภาพ โดยจะทำการศึกษาลักษณะในการส่งถ่ายแรงของจุดต่อระหว่างผนังและคานจำนวน 4 รูปแบบคือ (1) จุดต่อที่ไม่มีการเสริมกำลังซึ่งส่งถ่ายแรงผ่านแรงยึดเหนี่ยวและแรงเสียดทานระหว่างผนังอิฐและคาน (2) จุดต่อที่ใช้เดือยเหล็กด้านแรงเฉือน (shear dowel bars) ร่วมกับคานทับหลังคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete tie beams) (3) จุดต่อที่ใช้เดือยเหล็กด้านแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมเหล็ก (concrete tie beams) และ (4) จุดต่อที่ใช้หูช้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการส่งถ่ายแรงจากผนังไปสู่คาน



รูปที่ 1 วิธีการปรับปรุงโครงสร้างดัดที่มีผนังอิฐ [3]

3. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

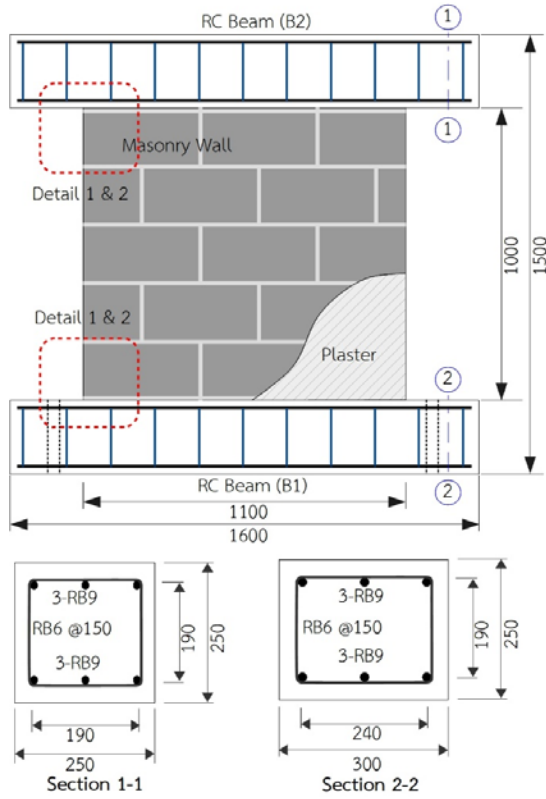
เนื่องจากการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่กลไกการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังอิฐและคานของโครงสร้างดัด เพื่อลดผลกระทบต่อการส่งถ่ายแรงจากองค์อาคารอื่น ดังนั้นจึงทำการทดสอบเฉพาะชิ้นส่วนโครงสร้างที่ประกอบด้วยผนังอิฐและคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัดที่ในแนวตั้งร่วมกับแรงด้านข้างในระนาบแบบวิถัจจร เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประเมินสมรรถนะในการต้านทานแรงของจุดต่อแต่ละแบบ

3.1. ตัวอย่างทดสอบ

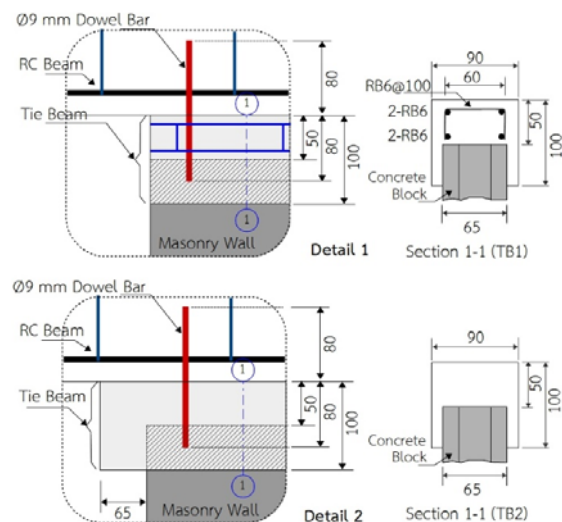
ตัวอย่างทดสอบจะใช้ผนังขนาด 1000 × 1100 mm มีคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ขอบบนและล่างของผนัง โดยก่อผนังด้วยอิฐบล็อกขนาด 190 × 400 × 65 mm และมีการฉาบผิวหน้าผนังทั้งสองด้านด้วยมอร์ตาร์หนา 17.5 mm หลังจากฉาบผิวหน้าแล้วผนังจะมีความหนาแน่นรวมประมาณ 100 mm รูปที่ 2 แสดงขนาดและรายละเอียดของตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังจุดต่อ (S1)

ตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังจุดต่อด้วยเดือยเหล็กด้านแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังคอนกรีตเสริมเหล็ก (S2) และตัวอย่างที่ใช้จุดต่อแบบเดือยเหล็กด้านแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังคอนกรีตที่ไม่มีการ

เสริมเหล็ก (S3) จะกำหนดให้มีขนาดและรายละเอียดเช่นเดียวกับตัวอย่าง S1 โดยมีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังอิฐและคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับตัวอย่าง S2 จะใช้วิธีการเสริมกำลังจุดต่อดังแสดงใน Detail 1 และตัวอย่าง S3 จะใช้วิธีการเสริมกำลังจุดต่อดังแสดงใน Detail 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบ S1

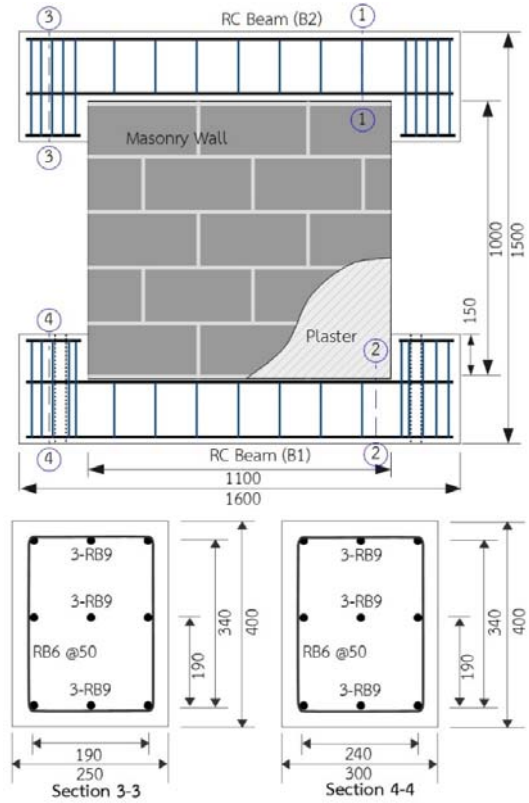


รูปที่ 3 จุดต่อของตัวอย่างทดสอบ S2 และ S3

ขนาดและรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้หูช้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการส่งถ่ายแรง (S4) แสดงในรูปที่ 4 โดยส่วนของหูช้างจะกำหนดให้มีขนาดความกว้างเท่ากับคานและหล่อเป็นชิ้นเดียวกับ

คานด้านบนและล่าง

กำลังอัดของคอนกรีต มอร์ตาร์สำหรับก่อและฉาบ อิฐก่อ และกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบทั้งหมด ได้จากผลการทดสอบกำลังวัสดุตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ณ วันที่ทำการทดสอบ ตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 ตัวอย่างทดสอบ S4

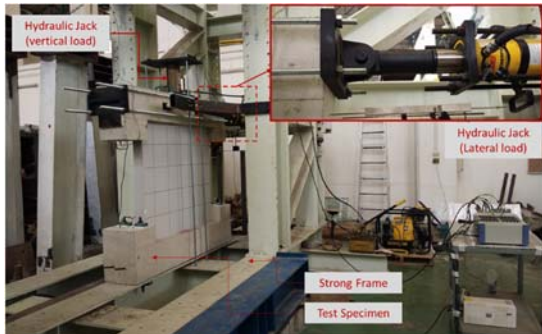
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

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

3.2. วิธีการทดสอบ

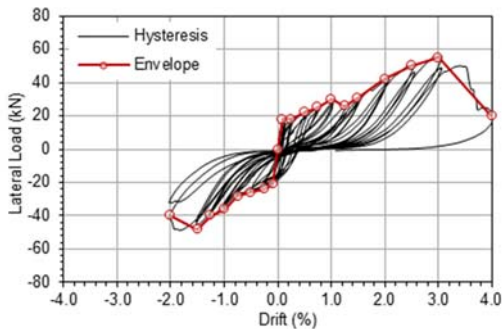
การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดข้างของตัวอย่างจะใช้วิธีการให้แรงกระทำแบบควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) โดยใช้โครงเฟรมเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง (strong frame) สำหรับติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ใช้โครงเหล็ก (steel bracing) ค้ำยันตัวอย่างทดสอบเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวนอกระนาบ ใช้ชุดกระบอกไฮดรอล

ลิด (hydraulic jacks) ในการให้แรงดันข้างและแรงในแนวตั้ง การติดตั้งตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 5 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงในแนวตั้งมีค่าคงที่เท่ากับร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดตั้งฉากของผนังอิฐ ($0.1f'_m A_g$) เมื่อ A_g คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของผนัง และกำหนดให้แรงกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างของผนัง แรงด้านข้างกำหนดให้เป็นแบบวัฏจักร (cyclic loads) กล่าวคือการให้แรงแบบพลิกไปด้านหนึ่งและดึงกลับในทิศทางตรงข้ามเป็นวงรอบ โดยการค่อยๆ เพิ่มระยะผลึกและดึงขึ้นในแต่ละรอบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติหรือเสียหายรุนแรง โดยทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูล เช่น แรงกระทำ ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของโครงสร้าง และระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างผนังและคาน โดยใช้อุปกรณ์วัดระยะ (linear displacement transducer) อุปกรณ์วัดแรง (load cell) และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data acquisition)



รูปที่ 5 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

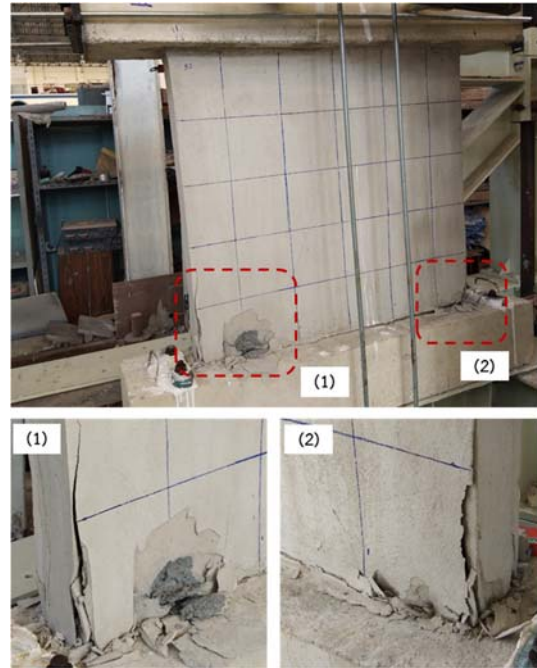
4. ผลการทดสอบ



รูปที่ 6 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของ S1

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของตัวอย่าง S1 ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.125% พบรอยแตกร้าวในจุดต่อระหว่างผนังและคานบริเวณมุมด้านล่าง เนื่องจากความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับความเค้นอัดหลัก (principal compressive stress) ซึ่งมีทิศทางตามแนวทแยงมุมของผนัง โดยมีแรงกระทำด้านข้างในทิศทางบวกและลบ 18 kN และ -21 kN ตามลำดับ เมื่อระยะเคลื่อนตัวเพิ่มเป็น 0.25% รอยแตกดังกล่าวมีความยาวเพิ่มขึ้นตลอดความกว้างผนังและเกิดการเลื่อนไถล (slip) ของผนังที่จุดต่อระหว่างผนังและคานด้านล่าง

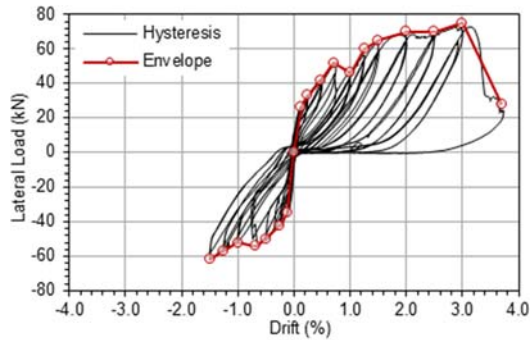
ตัวอย่าง S1 มีกำลังต้านทานแรงสูงสุด 55 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว 3.00% สำหรับทิศทางบวก และเกิดความเสียหายบริเวณมุมเนื่องจากการบดอัดที่ระยะเคลื่อนตัว 4.00% และกำลังต้านทานลดลงเหลือเพียงร้อยละ 36 ของกำลังสูงสุด สำหรับทิศทางลบกำลังสูงสุดเท่ากับ -48 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว -1.50% การทดสอบหยุดที่ระยะเคลื่อนตัวสองทิศทางแตกต่างกันเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์และการติดตั้งตัวอย่าง ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบ S1 เมื่อจบการทดสอบแสดงในรูปที่ 7



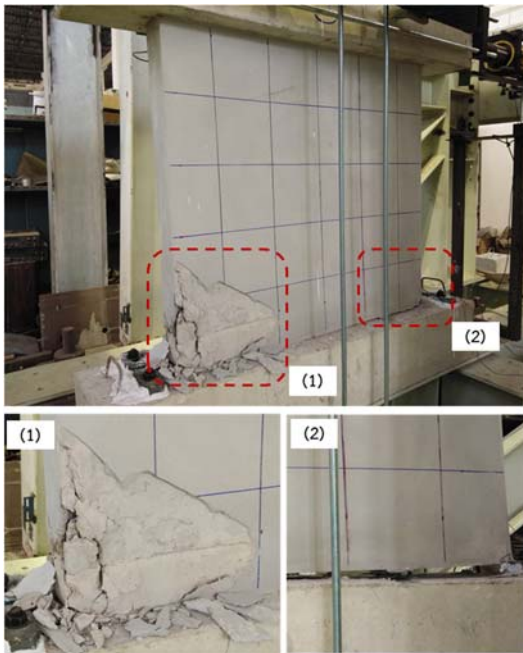
รูปที่ 7 ความเสียหายของ S1 ที่ 4.00%

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ของตัวอย่าง S2 ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.125% เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กบริเวณจุดต่อระหว่างผนังและคานบริเวณมุมด้านล่าง ณ ตำแหน่งนี้ตัวอย่างมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างในทิศทางบวกและลบเท่ากับ 26 kN และ -35 kN ตามลำดับ เมื่อระยะเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นรอยแตกดังกล่าวจะขยายความยาวเข้ามาสู่ส่วนกลางของผนัง และเกิดการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคานที่ระยะเคลื่อนตัว 0.75% ส่งผลให้กำลังต้านทานและสติเฟนลดลงเล็กน้อย จากนั้นกำลังต้านทานค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าสูงสุด 75 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว 3.00% ผนังและคานทับหลังเกิดความเสียหายบริเวณมุมรับแรงอัดที่ระยะเคลื่อนตัว 3.70% จากนั้นกำลังต้านทานลดลงเหลือเพียงร้อยละ 37 ของกำลังสูงสุด ในทิศทางลบกำลังต้านทานสูงสุดเท่ากับ -62 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว -1.50% ความเสียหายของตัวอย่าง S2 เมื่อจบการทดสอบแสดงใน รูปที่ 9 กรณีของตัวอย่างทดสอบ S3 ในช่วงที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ไม่เกิน 1.00% ตัวอย่างมีพฤติกรรมในการต้านทานแรงใกล้เคียงกับตัวอย่าง S2 (รูปที่ 10) อย่างไรก็ตามตัวอย่าง S3 จะเกิด

ความเสียหายขึ้นในผนังและคานทับหลังที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำกว่าตัวอย่าง S2 เนื่องจากคานทับหลังไม่มีการเสริมเหล็ก เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวจะสูญเสียกำลังต้านทานแรงอย่างฉับพลัน ตัวอย่าง S3 มีกำลังต้านทานสูงสุด 70 kN ที่ระยะเคลื่อนตัว 1.10% สำหรับทิศทางบวกหลังจากนั้นกำลังต้านทานลดลงเหลือเพียงร้อยละ 40 ของกำลังสูงสุด ความเสียหายของตัวอย่าง S3 เมื่อจบการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11



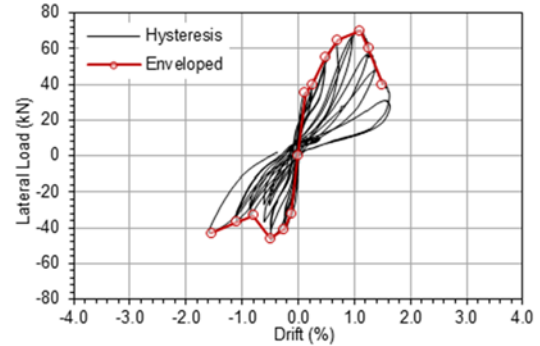
รูปที่ 8 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของ S2



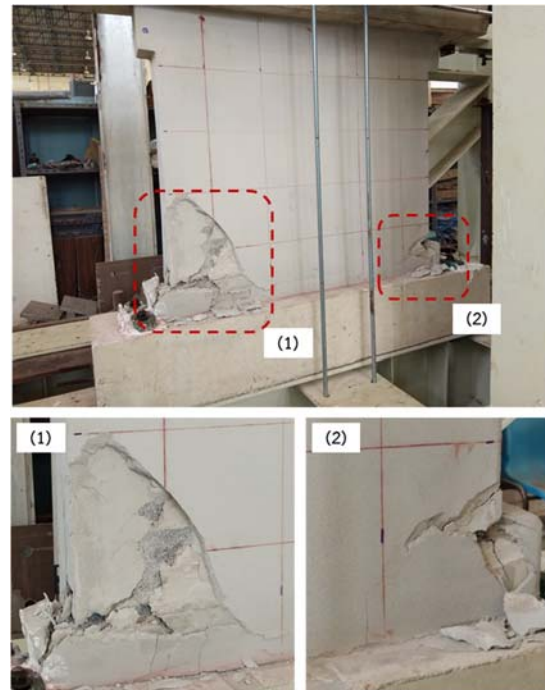
รูปที่ 9 ความเสียหายของ S2 ที่ 3.70%

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างที่ใช้หูช้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการส่งถ่ายแรง (S4) เนื่องจากผนังถูกยึดไว้โดยหูช้างและไม่สามารถเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ 0.125% จึงเกิดรอยแตกร้าวในผนังบริเวณมุมล่างซ้ายและขวาเนื่องจากหน่วยแรงดึงตั้งอธิบายก่อนหน้า ส่งผลให้สติเฟนของตัวอย่างลดลง แต่กำลังต้านทานแรงของตัวอย่างยังสามารถเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ระยะเคลื่อนตัว 0.75% เท่ากับ 51 kN และ -41 kN สำหรับทิศทางบวกและลบ ตามลำดับ ที่ระยะเคลื่อนตัว

1.00% ผนังบริเวณมุมด้านล่างเกิดความเสียหายเนื่องจากการบดอัดและส่งผลให้กำลังต้านทานของตัวอย่างลดลงอย่างมาก การทดสอบตัวอย่างนี้หยุดลงที่ระยะเคลื่อนตัว 1.25% เนื่องจากผนังเกิดความเสียหายมากดังแสดงในรูปที่ 13



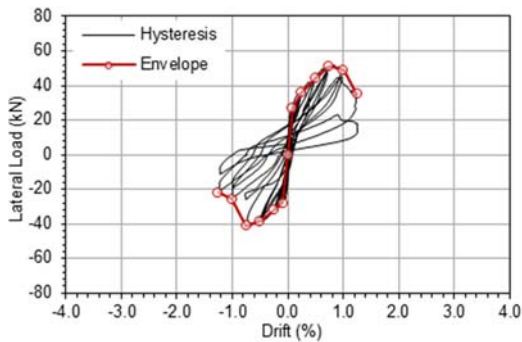
รูปที่ 10 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของ S3



รูปที่ 11 ความเสียหายของ S3 ที่ 1.50%

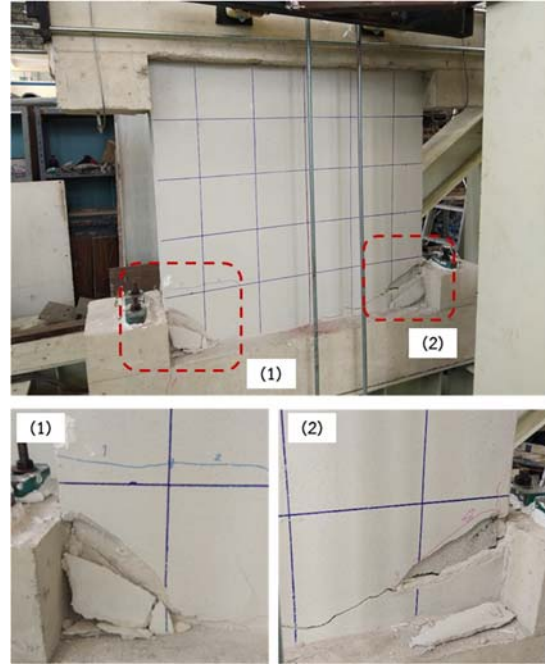
จากผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดพบว่าจุดต่อระหว่างผนังและคานส่งผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะในการต้านทานแรงของโครงสร้าง รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ (enveloped curves) ของตัวอย่างทั้งหมด พบว่ากำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังจุดต่อ (S1) และตัวอย่างที่ใช้หูช้างในการส่งถ่ายแรง (S4) มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองทิศทางเนื่องจากกำลังต้านทานสูงสุดของตัวอย่างถูกควบคุมโดยการวิบัติเนื่องจากการบดอัดของผนังบริเวณมุม อย่างไรก็ตามตัวอย่าง S4 มีกำลังต้านทานสูงกว่า S1 มากในช่วงที่การเคลื่อนตัวด้านข้างไม่เกิน 1.00% เนื่องจากผนังของ S4 ไม่เกิดการเลื่อนไถลในแนวราบเนื่องจากการยึดไว้ของหูช้าง ส่งผลให้ผนัง

พัฒนาสติเฟ้นและกำลังต้านทานได้ดีแต่มักจะเกิดความเสียหายที่ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำ สำหรับตัวอย่าง S2 และ S3 พบว่ากำลังต้านทานสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันในทิศทางบวก และมีค่าสูงกว่าตัวอย่าง S1 ประมาณร้อยละ 37 เนื่องจากผนังมีการโอบรัดที่ขอบด้านบนและล่างด้วยคานทับหลังส่งผลให้ต้านทานความเค้นอัดได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่าง S2 มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้าง ณ ตำแหน่งที่มีกำลังต้านทานสูงสุดมากกว่า S3 ประมาณ 2.7 เท่าในทิศทางบวก เนื่องจากมีการเสริมเหล็กในคานทับหลังส่งผลให้ความเหนียว (ductility) เพิ่มขึ้นและสามารถต้านทานความเค้นดึงภายหลังการแตกตัวของคอนกรีตได้ดีขึ้น ถึงแม้รูปแบบการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบทั้งสองมีความแตกต่างกัน กล่าวคือตัวอย่าง S3 ผนังจะมีการยกตัวบริเวณมุมด้านล่าง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะหมุนเอียง (tilt) มากกว่าตัวอย่าง S2 อย่างไรก็ตามพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลกระทบบ้างเล็กน้อย เนื่องจากในการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพันธ์โดยรวมของโครงสร้าง ซึ่งเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินสมรรถนะในการต้านทานแรงต้านข้างของโครงสร้าง

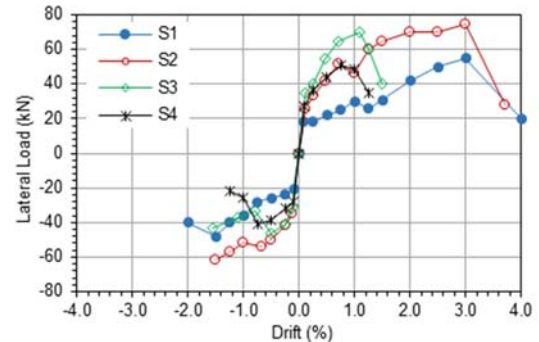


รูปที่ 12 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของ S4

จากผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังจุดต่อที่ใช้ในตัวอย่าง S2 มีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งสมรรถนะในการส่งถ่ายแรงและความเหนียว โดยเฉพาะช่วงที่ระยะเคลื่อนตัวไม่เกิน 2.00% สำหรับตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังจุดต่อพบว่าผนังต้านทานแรงต้านข้างได้ดีในช่วงที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ของโครงสร้างไม่เกิน 1.50% หากใช้จุดต่อรูปแบบนี้ในอาคารจริง ภายใต้แรงแผ่นดินไหวอาคารจะเกิดการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นมาก ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายมาก การใช้ช่วงในการส่งถ่ายแรงระหว่างผนังและคานผนังจะเกิดการแตกเร็วและสูญเสียกำลังต้านทานแรงที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ต่ำ หากใช้จุดต่อรูปแบบนี้ในอาคารจริง ภายใต้แรงแผ่นดินไหวเมื่อผนังเกิดความเสียหายจะส่งถ่ายแรงปริมาณมากไปยังองค์อาคารอื่นซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 13 ความเสียหายของ S4 ที่ 1.25%



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาผลกระทบของจุดต่อระหว่างผนังอิฐและโครงสร้างต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อสมรรถนะในการต้านทานแรงต้านข้างของผนังอิฐ โดยใช้วิธีการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างผนังที่มีจุดต่อแบบต่าง ๆ ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ในแนวตั้งร่วมกับแรงต้านข้างในระนาบแบบวงจกร เพื่อพัฒนาวิธีการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคานที่มีประสิทธิภาพ จากผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

สมรรถนะในการส่งถ่ายแรงของจุดต่อระหว่างผนังและคานส่งผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมในการต้านทานแรงต้านข้างและรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ผนังที่มีการยึดรั้งกับคานอย่างแข็งแรง จะสามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงได้ดีแต่มักจะเกิดความเสียหายที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพันธ์ของโครงสร้างต่ำ กรณีที่ผนังไม่มีการยึดรั้งกับคาน ในช่วงที่โครงสร้างมีระยะเคลื่อนตัว

ด้านข้างสัมพันธ์ต่ำผนังจะต้านทานแรงด้านข้างได้น้อยเนื่องจากการเลื่อนไถลระหว่างผนังและคานส่งผลให้ไม่สามารถส่งถ่ายแรงจากคานไปยังผนัง

การใช้เดือยเหล็กรับแรงเฉือนร่วมกับคานทับหลังคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างผนังและคานของโครงสร้างสามารถส่งถ่ายแรงจากคานไปยังผนังได้ดี เมื่อแรงที่ส่งถ่ายผ่านจุดต่อถึงขีดจำกัดผนังจะสามารถเลื่อนไถลได้ซึ่งช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในโครงสร้างและผนังได้

อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาโดยการทดสอบโครงสร้างด้านแรงดัดที่มีผนังอิฐที่ทำการเสริมกำลังจุดต่อระหว่างผนังและคานโดยวิธีการนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอย่างละเอียดเพิ่มเติม

6. กิตติกรรมประกาศ

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

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hassan, A. F. and Sozen, M. (1997) Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes. *ACI Structural Journal*, 94(1), 31-39.
- [2] Panagiotakos, T., and Fardis, M. (1996). Seismic response of infilled RC frames structures. *Proceeding of the 11th world conference on earthquake engineering*. Acapulco, Mexico.
- [3] Srechai, J., and 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.
- [4] Wararuksajja, W., Srechai, J. and Leelataviwat, S. (2020). Seismic design of RC moment-resisting frames with concrete block infill walls considering local infill-frame interactions. *Bull Earthquake Eng*, 18, 6445-6474. DOI: 10.1007/s10518-020-00942-9
- [5] Kyriakides, M., and Billington, S. (2008). Seismic retrofit of masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames using sprayable ECC. *Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- [6] Billington, S. L., Marios, A. K., Blackard, B., Willam, K., Stavridis, A., and Shing, P. B. (2009). Evaluation of a

sprayable ductile cement-based composite for the seismic retrofit of unreinforced masonry Infills. *Proceeding of Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*. San Francisco, United States.

- [7] Lukkunaprasit, P., Ruangrassamee, A., Boonyatee, T., Chintanapakdee, C., Jankaew, K., Thanasisathit, N., and 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
- [8] มยพ. 1301/1302. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง
- [9] Acun, B., and Sucuoglu, H. (2006). Strengthening of masonry infill walls in reinforced concrete frames with wire mesh reinforcement. *Proceeding of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, USA.
- [10] Erdem, I., Akyuz, U., Ersoy, U., and 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.
- [11] Altin, S., Anil, O., Kara, E., and 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.
- [12] Yuksel, E., Ozkaynak, H., Buyukozturk, O., Yalcin, C., Dindar, A., Surmeli, M., and 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.
- [13] Erol, G., Karadogan, H., and Cili, F. (2012). Seismic strengthening of infilled reinforced concrete frames by CFRP. *Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal.
- [15] Leeansaksiri, A., Panyakapo, P., and Ruangrassamee, A. (2018). Seismic capacity of masonry infilled RC frame strengthening with expanded metal ferrocement,

Engineering Structures, 159, 110-127. DOI: 10.1016/j.eng
struct.2017.12.034.