

**พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารพาณิชย์ 3 ชั้นเสริมกำลังด้วย
เฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก**

**SEISMIC BEHAVIOR OF 3-STOUREY COMMERCIAL BUILDING
STRUCTURE STRENGTHENED WITH FERROCEMENT
AND EXPANDED METAL**

โอริสสา ดิถีเพ็ญ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: orissa_24@hotmail.com

ไพบูลย์ ปัญญาอะโป

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: phaiboon.pa@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก อาคารที่ใช้ศึกษาเป็นอาคารพาณิชย์สูง 3 ชั้น แบบแถวจำนวน 4 คูหาตามแบบมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง โครงสร้างอาคารเป็นระบบเสา-คานและพื้นคอนกรีตสำเร็จ โดยศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลังสำหรับพื้นที่ความรุนแรงแผ่นดินไหว 3 ระดับ ได้แก่ระดับรุนแรงมาก ระดับรุนแรงปานกลางค่อนข้างสูง และระดับรุนแรงปานกลาง โดยการวิเคราะห์วิธีการผลักแบบสถิตไม่เชิงเส้น ใช้แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงของคานและเสาแบบไม่เชิงเส้น และใช้แบบจำลองค้ำยันเทียบเท่าสำหรับผนังก่ออิฐ ผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างอาคารเดิมมีการวิบัติแบบชั้นอ่อนเนื่องจากความชะลูดของเสาชั้นล่าง ทำให้เกิดค่าระดับความเสียหายสูงมากที่ปลายเสาบริเวณจุดต่อข้อหมุนพลาสติกโดยเฉพาะบริเวณชั้นล่าง ภายหลังจากการเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ โครงสร้างอาคารเสริมกำลังมีค่าสติเฟนสและกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้นจากเดิม 3.0-4.2 เท่า และไม่พบการเกิดข้อหมุนพลาสติกที่ปลายเสาชั้นล่าง นอกจากนี้ค่าดัชนีความเสียหายโครงสร้างเสริมกำลัง อยู่ในระดับต่ำที่สามารถยอมรับได้

คำสำคัญ: การเสริมกำลัง เฟอร์โรซีเมนต์ ตะแกรงเหล็กฉีก การวิเคราะห์วิธีแรงสถิตไม่เชิงเส้น

ABSTRACT

This paper presents the seismic behavior of building structures reinforced with ferrocement and expanded metal. The structure is a 3-storey commercial building according to the standards of the Department of Public Works and Urban Planning. The reinforced concrete frame is a beam-column system and with precast

concrete floor. The seismic behaviors of the existing structure and the retrofit buildings were investigated for three seismic intensity areas: extreme severe, moderate high severe and moderate severe. The non-linear static analysis (pushover method) was conducted for the modeled structure with nonlinear behavior of beam and column and equivalent strut model for infill panel. The results showed that the existing structure was severely damaged due to the soft story in the lower column with the plastic hinge formation at the end of the columns. After strengthening with ferrocement and expanded metal, the retrofit structures enhanced the stiffness and strength up to 3.0-4.2 times without plastic hinge formation at the lower end of the column. In addition, the damage level of the retrofit structures was low, and that it can be acceptable.

Keywords: Strengthening, Ferrocement, Expanded Metal, Nonlinear Static Analysis

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวล่าสุดที่เกิดขึ้นในประเทศไทยขนาด 5.9 และ 6.4 ริคเตอร์ ศูนย์กลางแผ่นดินไหวในประเทศลาว วันที่ 2 พฤศจิกายน 2562 จุดศูนย์กลาง บริเวณสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวสามารถรับรู้ได้ใน 10 จังหวัดภาคเหนือ รวมทั้งกรุงเทพมหานครในประเทศไทยมีอาคารจำนวนมากก่อสร้างโดยไม่ได้ออกแบบให้รองรับแผ่นดินไหว จึงอาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายหรือพังทลายได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารขนาดเล็กที่ตั้งในเขตจังหวัดภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือในพื้นที่เสี่ยงจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ได้แก่ จังหวัดแพร่, จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดกำแพงเพชร เป็นต้น สำหรับอาคารพาณิชย์ โดยทั่วไป มีลักษณะพฤติกรรมการวิบัติแบบชั้นอ่อนในชั้นล่าง เนื่องจากคานหน้าอาคารชั้นล่างมีลักษณะเปิดโล่ง แต่ชั้นบนของอาคารมีผนังก่ออิฐ ทำให้เสาชั้นล่างมีค่าสติฟเนสอ่อนกว่าชั้นบน จึงเป็นเหตุให้เสาชั้นล่างอาจเกิดการวิบัติได้ ด้วยเหตุดังกล่าวผู้วิจัยจึงทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารด้านแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่เสี่ยงภาคเหนือและตะวันตกดังกล่าว โดยมุ่งเน้นอาคารประเภทพาณิชย์แบบห้องแถว โดยเลือกเทคนิคการเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก เนื่องจากเป็นเทคนิคการเสริมกำลังที่ไม่ซับซ้อนและค่าก่อสร้างไม่สูง เหมาะสำหรับอาคารในพื้นที่เหล่านี้

จากผลงานวิจัยของโครงสร้างเสริมกำลังที่ผ่านมา ไพบูลย์ ปัญญาละโป และทองศักดิ์ พรหมบุญแก้ว (2557) ศึกษาการเสริมกำลังด้านทานแผ่นดินไหวของอาคารพาณิชย์ 3 ชั้น โดยแผ่นเหล็กประกอบรอบเสา ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับรุนแรงมาก จ.แพร่ ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการผลักอาคารพบว่า การเสริมกำลังเสารอบนอกอาคาร และชั้นลอยจำนวน 26 ต้น ทำให้โครงสร้างอาคารไม่เกิดการวิบัติแบบชั้นอ่อน และค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นและ Demand-Capacity Ratio ไม่เกินข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ ระดับสมรรถนะของอาคาร อยู่ในระดับที่ 1 เข้าใช้อาคารได้ทันที S. Longthong และคณะ (2020) ศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังก่ออิฐด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก พบว่า ค่าความต้านทานความเหนียวของโครงข้อแข็งเสริมกำลัง (BF-SR) และแบบที่เสริมแผงก่ออิฐ (IF-SR) สูงขึ้น 64% และ 87% ของโครงสร้างเดิมตามลำดับ ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง โครงสร้างเสริมกำลัง (BF-SR) และแบบที่เสริมแผงก่ออิฐ (IF-SR) สูงขึ้นถึง 77% และ 66% ตามลำดับ ผนังก่ออิฐมีส่วนช่วยให้กำลังสูงเพิ่มขึ้นคือ 4.56 เท่าและ 5.53 เท่าของโครงข้อแข็งเดิม (BF) และ โครงข้อแข็งเสริมกำลัง (BF-SR) ปฏิษณ มณีกาญจน์ และ ไพบูลย์ ปัญญาละโป (2563) ศึกษาพฤติกรรมด้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยกรงเหล็กและตะแกรงเหล็กฉีก

พบว่า โครงสร้างเสริมกำลังให้ค่ากำลังต้านทานสูงกว่าโครงสร้างเดิม 1.53-3 เท่า และไม่พบการเกิดข้อหมุนพลาสติกที่ปลายเสา โครงสร้างเดิมเกิดข้อหมุนพลาสติกที่ปลายเสาและมีค่าระดับความเสียหายสูงมาก โดยเฉพาะเสาชั้นล่างและผนังก่ออิฐแบบไม่เต็มแผง และงานชั้นที่ 2 Kazemi และคณะ (2005) ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกและเฟอร์โรซีเมนต์ โดยทำการทดสอบภายใต้แรงแบบวัฏจักร พบว่าเสาโครงสร้างมีค่าความเหนียวและกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึง 5.5 เท่า Dung และ Plumier (2010) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของแผงตะแกรงเหล็กฉีกภายใต้แรงวัฏจักร พบว่า แผงตะแกรงเหล็กฉีกต้านทานแรงเฉือนต่อการเสียรูปได้อย่างดี และมีค่าความเหนียวอยู่ในระดับที่สูงมาก S. Panyamul และคณะ (2019) ศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างเสาสันคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีกเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว จากผลการทดสอบ พบว่า เสาตัวอย่างมีความเหนียว กำลังต้านทานแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงขึ้นมากเปรียบเทียบกับเสาดั้งเดิม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถด้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารพาณิชย์คอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น ที่ตั้งอยู่บริเวณเขตพื้นที่เสี่ยงในภาคเหนือและตะวันตกของประเทศไทย
- (2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างด้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารพาณิชย์คอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้นที่เสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก

3. การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก

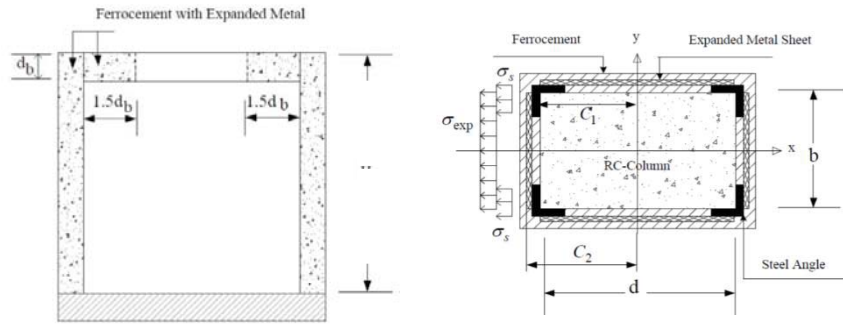
การเสริมกำลังโครงสร้างอาคารที่มีผนังก่ออิฐ ประกอบด้วยการเสริมกำลังเสา คาน ผนังก่ออิฐ ด้วยเทคนิคเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก การคำนวณออกแบบโครงสร้างเสริมกำลัง ใช้แบบจำลองโครงข้อแข็งเปล่าและผนังก่ออิฐตามวิธีการที่เสนอโดย Longthong และคณะ(2020) โดยการใช้เฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีกตลอดความสูงของเสา และเสริมคานช่วงความยาว 1.5 เท่าของความลึกคาน เท่ากับช่วงความยาวเทียบเท่ากับข้อหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นบริเวณปลายคานตามรูปภาพที่ 1a หน้าตัดเสาเสริมกำลัง โครงสร้างคอนกรีตเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก ตามรูปภาพที่ 1b การเสริมกำลังคานและเสาประกอบด้วยเหล็กฉาก (Steel angle) ขนาด 40x40x6 mm ยึดที่มุมเหลี่ยมเสาและคานทั้ง 4 มุม และวางตะแกรงเหล็กฉีกตลอดความยาว การคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง แสดงในภาพที่ 2 คำนวณได้จาก

$$P_u e = 0.85 f'_c ab \left(d_i - d_i'' - \frac{a}{2} \right) + \sum_{i=1}^n T_{si} d_i'' + M_{exc} \quad (1)$$

$$V_n = \frac{2M_n}{h} \quad (2)$$

เมื่อ P_u คือ แรงสูงสุดที่กระทำต่อเสาเสริมกำลัง, e คือระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงกระทำ, $P_u e$ คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง, M_{exc} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเดิม, f'_c คือ กำลังอัดคอนกรีต ksc , T_{si} คือกำลังต้านทานหน่วยแรงดึงของหน้าตัดเสริมกำลังชั้นที่ i , V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง, d_i คือ ความลึกของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง, h คือ ความสูงของเสา, a คือ ความกว้างของการกระจายความเค้น (Stress Box) และ b คือ ความกว้างของหน้าตัดเสา

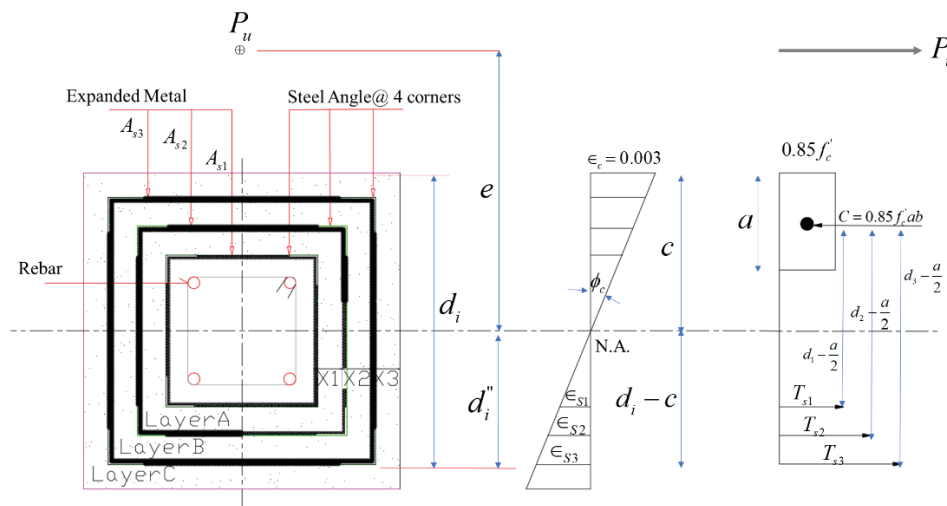
โดยขนาดหน้าตัดเสา-คานที่มีการเสริมกำลัง จำนวนชั้นตะแกรงและเบอร์เหล็กจิก กำหนดได้โดยการออกแบบ ขนาดหน้าตัดเสาที่เหมาะสม โดยการคำนวณหาค่าลึงด้านทานโมเมนต์ M_n และกำลังต้านทานแรงเฉือน V_n ของโครงสร้างเสา คานเสริมกำลัง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวที่มากระทำ โครงสร้างอาคารที่ตั้งอยู่ในแต่ละพื้นที่



รูปภาพที่ 1a โครงข้อแข็งเปล้า

รูปภาพที่ 1b หน้าตัดเสาโครงสร้าง

ภาพที่ 1 โครงข้อแข็งเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ (Longthong และคณะ 2020)



2a) หน้าตัดเสาเสริมกำลัง

2b) การกระจายความเครียดสอดคล้อง

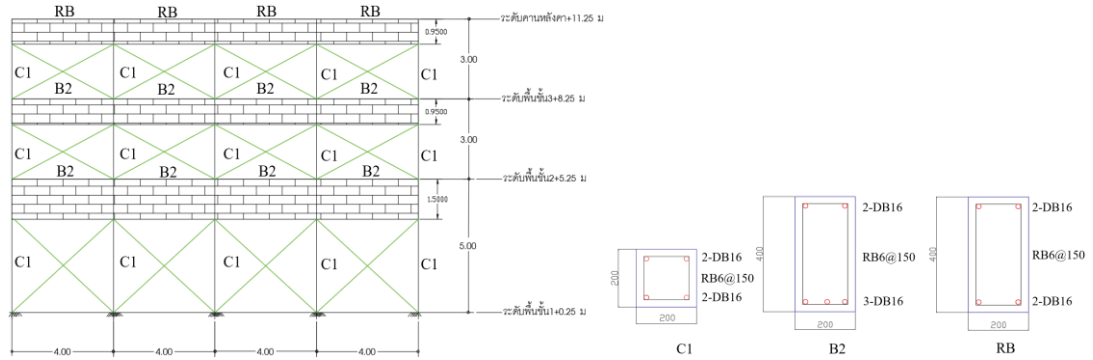
2c) การกระจายของหน่วยแรง

ภาพที่ 2 แสดงรูปหน้าตัดเสาและคานเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กจิก

4. วิธีดำเนินการวิจัย

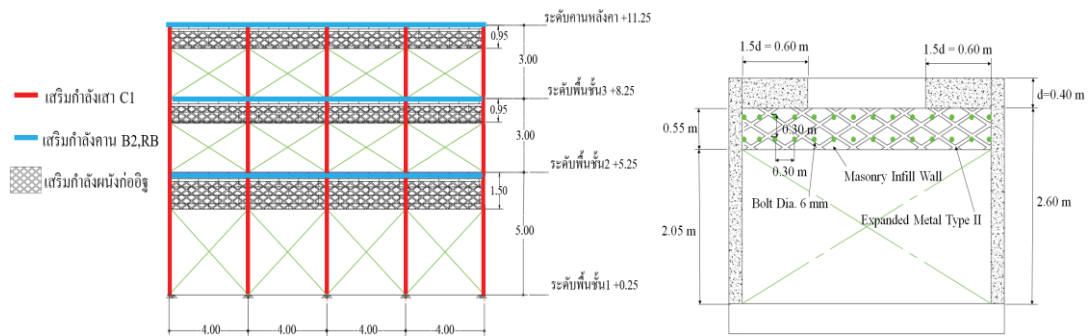
4.1 อาคารต้นแบบ

อาคารต้นแบบกำหนดให้เป็นอาคารพาณิชย์ สูง 3 ชั้น ดังที่แสดงในภาพที่ 3 ทั้งนี้สมมติว่าอาคารต้นแบบจำลองให้ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่สามจังหวัดในเขตภาคเหนือและตะวันตก ดังนี้ Site 1: อ. วังชิ้น จังหวัดแพร่ Site 2: อ. เมือง จังหวัดกาญจนบุรี Site 3: อ. เมือง จังหวัดกำแพงเพชร

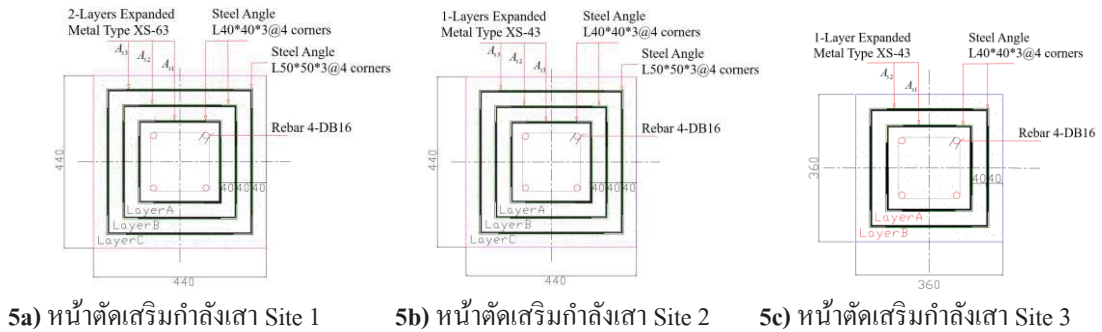


ภาพที่ 3 โครงข้อแข็ง และรายละเอียดเสา-คาน โครงสร้างอาคารต้นแบบ

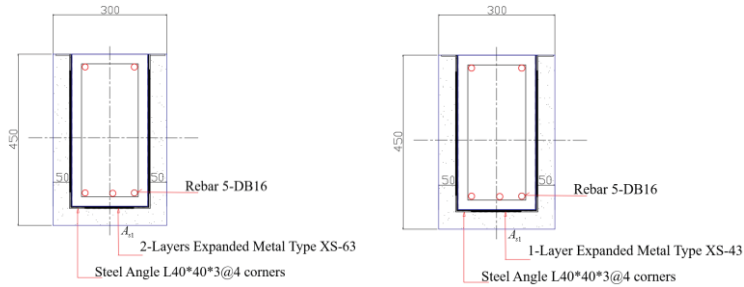
การออกแบบเสริมกำลังแสดงในรูปภาพที่ 4, 5 ดังนี้ การเสริมกำลัง โครงข้อแข็ง โดยติดตั้งตะแกรงเหล็กฉีกขนาด XS-43,63 เชื่อมยึดติดกับเหล็กฉากยึดกับเสาตลอดความสูงเสา สำหรับการเสริมกำลังคาน ใช้ตะแกรงเหล็กฉีกขนาด XS-43,63 เชื่อมยึดติดกับเหล็กฉากในช่วงความยาว 1.5 เท่าของความลึกคาน ที่ปลายคานซึ่งเป็นช่วงที่ข้อหมุนพลาสติกอาจเกิดขึ้น ได้บริเวณนี้ โครงต้นแบบที่มีผนังช่องเปิด ผนังช่วงบนสูง 0.95-1.5 เมตร การเสริมกำลังผนังอิฐ ใช้เฟอร์โรซีเมนต์เสริมด้วยตะแกรงเหล็กฉีกขนาด เบอร์ 22 ทั้งสองด้าน แผ่นตะแกรงเหล็กฉีกมีการยึดด้วยสลักเกลียวขนาด 6 มม ฝังทุกเข้าไปในผนังก่ออิฐ ระยะห่าง 30 เซนติเมตร และทำการฉาบปูนบนแผ่นผนัง



ภาพที่ 4 โครงข้อแข็งเสา-คาน ของอาคารที่เสริมกำลัง Site 1,2,3



5a) หน้าตัดเสริมกำลังเสา Site 1 5b) หน้าตัดเสริมกำลังเสา Site 2 5c) หน้าตัดเสริมกำลังเสา Site 3



5d) หน้าตัดเสริมกำลังคาน Site1 5e) หน้าตัดเสริมกำลังคาน Site2 และ 3

ภาพที่ 5 การเสริมกำลังเสา-คาน Site 1,2,3

4.2 กำหนดเป้าหมายการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคารต้นแบบ

การกำหนดเป้าหมายการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคารและการประเมินระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวจะขึ้นอยู่กับลักษณะอาคารและพื้นที่ตั้งของอาคาร สำหรับกรณีศึกษาอาคารต้นแบบ นี้ได้ กำหนดให้เป็นอาคารที่มีระดับความสำคัญสูงมาก เนื่องจากกำหนดให้ใช้เป็น อาคารพาณิชย์ ดังนั้นการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของ อาคารตัวอย่างนี้จึงต้องกำหนดเป้าหมายให้อยู่ในระดับการเสริมสมรรถนะที่ดีกว่าระดับเป้าหมายเพื่อความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน (Enhanced Rehabilitation Objective) โดยอาคารต้องมีระดับสมรรถนะในระดับเข้าใช้งานได้ทันที (IO) ภายใต้แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในระดับ BSE

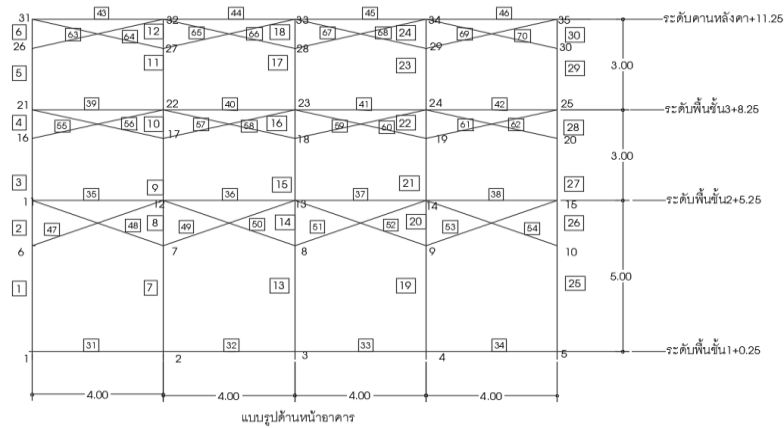
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์นี้ใช้วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) หรือ วิธี Pushover Analysis ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

1) สร้างโมเดลโครงสร้างอาคารต้นแบบ และ โครงสร้างอาคารที่เสริมกำลัง โดยกำหนด ลำดับชั้นส่วนเสา-คาน-ผนัง จุดต่อ Node และคุณสมบัติวัสดุต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปภาพที่ 7 มีหลักการดังนี้

1.1) แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงเสาและคาน (Hysteretic Model) สำหรับอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลังใช้แบบจำลองของ SINA Degrading Tri-Linear Hysteresis (Saiidi 1979) ซึ่งมีการเสื่อมถอยของสติเฟเนสและกำลังต้านทานตามข้อเสนอแนะมาตรฐาน มยผ.1303-57

1.2) แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงของผนังก่ออิฐ ใช้แบบจำลองของ Wayne Stewart Degrading Hysteresis (Stewart 1984) การจำลองผนังก่ออิฐใน โครงสร้างข้อแฉ่งโดยวิธีแรงค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่าป้อนข้อมูลใส่โปรแกรม RUAUMOKO 2D เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมตอบสนอง โครงสร้าง



ภาพที่ 6 ลำดับชั้นส่วนเสา-คาน-ผนัง จุดต่อ Node

2) กำหนดรูปแบบการกระจายแรงกระทำเป็นสัดส่วนกับแรงเฉื่อยและเป็นสัดส่วนกับรูปร่างโมเมนต์พื้นฐานของอาคาร

3) กำหนดค่าการกระจัดเคลื่อนที่ระดับยอดอาคารเป้าหมาย (Target Displacement) ของโครงสร้างอาคาร

4) กำหนดค่าแรงเฉือนที่ฐาน ค่าการเคลื่อนที่ของอาคาร และนำมาพล็อตกราฟแสดงค่าความชันหรือค่าสติเฟนสของโครงสร้างอาคาร กำหนดค่าดัชนีความเสียหายรวม

5) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างเดิมและโครงสร้างหลังเสริมกำลัง

6) ประเมินสมรรถนะของโครงสร้างเดิมและโครงสร้างเสริมกำลังในแต่ละพื้นที่เขตแผ่นดินไหว

เกณฑ์การวัดระดับความเสียหายของโครงสร้างกำหนดจากค่าดัชนีความเสียหายรวม (Damage Index, DI) แบบจำลองพัฒนาโดย Park and Ang (1985) เมื่อชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดข้อหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) เป็นผลรวมของความเสียหายจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่ตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว มีดังนี้ ดัชนีความเสียหาย DI มีค่า ไม่เกิน 0.6 พิจารณาเป็นระดับความเสียหายที่ซ่อมแซมได้ ดัชนีความเสียหาย DI มีค่ามากกว่า 0.6 แต่ไม่เกิน 1.0 พิจารณาเป็นระดับความเสียหายรุนแรงเกินกว่าที่จะซ่อมแซมได้ ดัชนีความเสียหาย DI มีค่ามากกว่า 1.0 พิจารณาเป็นระดับการพังทลายของโครงสร้าง

การกำหนดค่าการเคลื่อนที่ระดับยอดอาคารเป้าหมาย (Target Displacement) ของโครงสร้างอาคารตามมาตรฐาน มยผ. 1303-57 สามารถคำนวณได้ ตามสมการที่ 3

$$\delta_T = \frac{C_o C_1 C_2 S_d T_e^2 g}{4\pi^2} \quad (3)$$

โดยที่ C_o เท่ากับ 1.30, C_1 เท่ากับ 1.0, C_2 เท่ากับ 1.0, S_d คือ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่นพื้นฐานประสิทธิผลในแต่ละพื้นที่, T_e คือ คาบการสั่นพื้นฐานประสิทธิผล และ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

การเคลื่อนที่ระดับยอดอาคารเป้าหมาย (Target displacement) อาคารที่ตั้งอยู่บริเวณพื้นที่อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่, อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี และอำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร โดยเปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังที่มีการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก ดังแสดงตามตารางที่ 1 ทั้งนี้ค่าคาบการสั่น

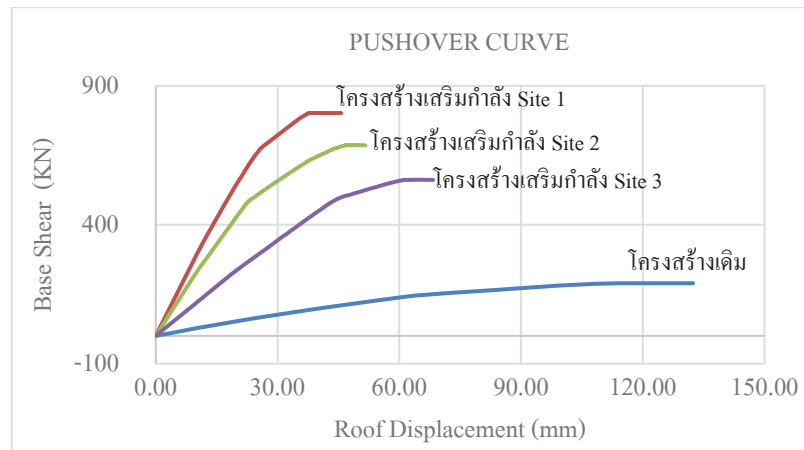
ของโครงสร้างเสริมกำลังมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับสำหรับอาคาร Site 1 (0.36 s), Site 2 (0.41 s), Site 3 (0.61 s) เนื่องจาก การเสริมตะแกรงเหล็กฉีกในเสามีขนาดและจำนวนชั้นลดลงตามลำดับจาก Site 1, Site 2, Site 3 จึงทำให้ค่าสลิปเนสของโครงสร้างมีค่าลดลงตามลำดับ จึงทำให้ค่าการสั่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงการเคลื่อนที่ระดับยอดอาคารเป้าหมาย (Target Displacement)

Location	Structure	Period (s) T_e (s)	Target Displacement	
			δ_t (mm)	$3\delta_t$ (mm)
Site 1: อ. วังชัน จ. แพร่ $S_s=1.086, S_l=0.275$	โครงสร้างอาคารเดิม	1.04	114.10	342.29
	โครงสร้างอาคารเสริมกำลังเสา-คาน	0.36	39.89	119.69
Site 2: อ. เมือง จ. กาญจนบุรี $S_s=0.642, S_l=0.241$	โครงสร้างอาคารเดิม	1.04	100	300
	โครงสร้างอาคารเสริมกำลังเสา-คาน	0.41	39.38	118.14
Site 3: อ. เมือง จ. กำแพงเพชร $S_s=0.434, S_l=0.122$	โครงสร้างอาคารเดิม	1.04	50.62	151.85
	โครงสร้างอาคารเสริมกำลังเสา	0.61	25.04	75.13

5. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์การผลักแรงสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Curve) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนที่ระดับยอดอาคาร บริเวณพื้นที่เกิดแผ่นดินไหวรุนแรงมากที่สุดตามลำดับ ได้แก่ อำเภอวังชัน จังหวัดแพร่, อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี และอำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร โดยเปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก ดังแสดงตามรูปภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การผลักแรงสถิตไม่เชิงเส้น โครงสร้างอาคารเดิมและเสริมกำลัง

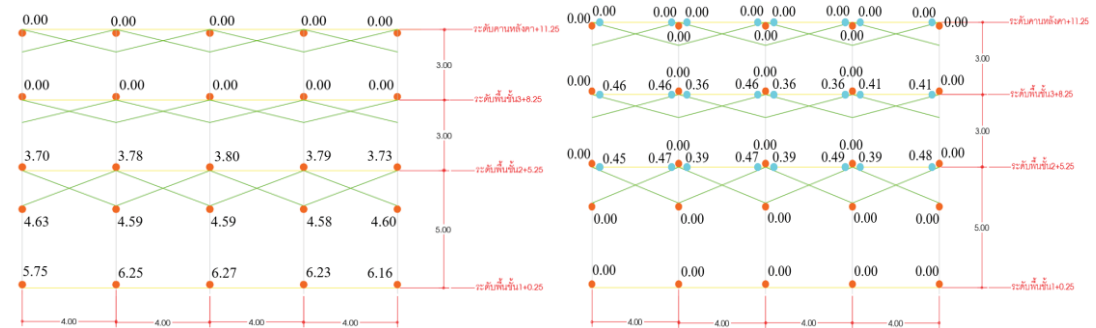
ผลการวิเคราะห์การผลักอาคารภายหลังจากการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างอาคารเดิมด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก ไม่พบการเกิดข้อหมุนพลาสติกที่ปลายเสาชั้นล่าง โครงสร้างอาคารเสริมกำลังมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้นจากเดิม 4.24 เท่า 3.63 เท่า และ 2.97 เท่า สำหรับ Site 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ตามที่แสดงในตารางที่ 2 จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างเสริมกำลังมีค่าสลิปเนสลดลงตามลำดับจาก Site 1, Site 2, Site 3 เนื่องจาก

การเสริมตะแกรงเหล็กฉีกในเสามีขนาดและจำนวนชั้นลดลงตามลำดับจาก Site 1, Site 2, Site 3 จึงทำให้ค่าสตีฟเนสของโครงสร้างมีค่าลดลงตามลำดับด้วย

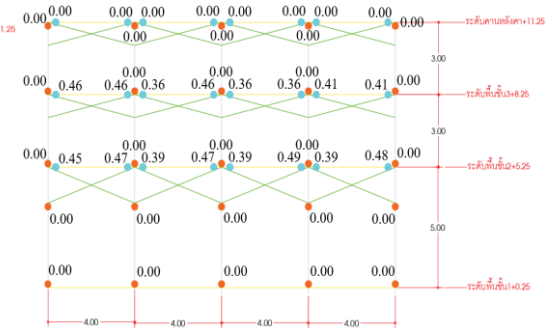
ตารางที่ 2 แสดงค่า Stiffness, Maximum Base Shear and Maximum displacement ของอาคาร

Location	Structure	Stiffness (KN/mm)	Max Shear (KN)	Max Displacement (mm)
Site 1: พื้นที่ อ. วังจันทน์ จ. แพร่	โครงสร้างอาคารเดิม	1.56	189.40	132.40
	โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง	21.48	802.40	45.69
Site 2: พื้นที่ อ. เมือง จ. กาญจนบุรี	โครงสร้างอาคารเดิม	1.56	189.40	132.40
	โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง	14.36	687.20	51.88
Site 3: พื้นที่ อ. เมือง จ. กำแพงเพชร	โครงสร้างอาคารเดิม	1.56	189.40	132.40
	โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง	9.39	562.10	68.33

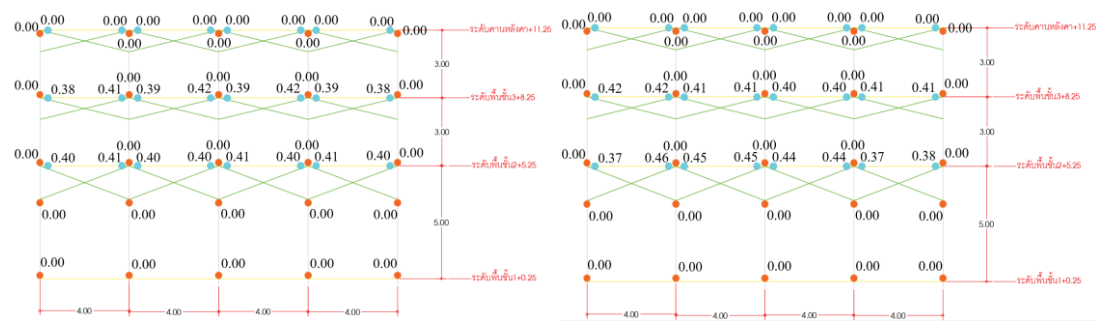
ส่วนค่าระดับความเสียหาย (Damage Index) ของโครงสร้างอาคารต้นแบบก่อนเสริมกำลัง แสดงในรูปที่ 8a โดยมีค่าระดับความเสียหายเสา โดยค่าเฉลี่ย $DI = 2.89 > 1.0$ เสาเสียหายพังทลายทั้งหมด ไม่สามารถซ่อมแซมได้ ในรูปที่ 8b, 8c, 8d แสดงค่าระดับความเสียหายลดลงภายหลังจากมีการเสริมกำลัง โครงสร้างอาคารด้วยเฟอร์โรซีเมนต์และตะแกรงเหล็กฉีก โดยมีค่าเฉลี่ย $DI = 0.14, 0.13$ และ 0.13 สำหรับ Site 1, Site 2 และ Site 3 ตามลำดับ



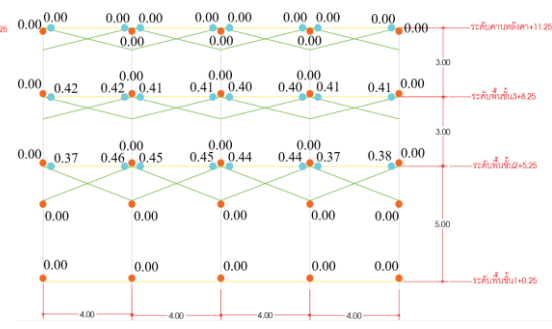
8a) โครงสร้างอาคารต้นแบบ



8b) โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง (Site 1)



8c) โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง (Site 2)



8d) โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง (Site 3)

ภาพที่ 8 ค่าระดับความเสียหายของโครงสร้าง

ตารางที่ 3 สรุปผลการวัดระดับความเสียหายของโครงสร้างอาคารที่มีการเสริมกำลังในแต่ละพื้นที่

พื้นที่ตั้ง	ดัชนีความเสียหาย	ระดับความเสียหาย	สถานะความเสียหาย	การใช้งาน	สภาพอาคาร
Site 1: อำเภอวังชัน จ.แพร่	0.14	ส่วนน้อย	เสียหายเล็กน้อย	ใช้งานได้	แตกร้าวเล็กน้อย
Site 2: อำเภอเมือง จ.กาญจนบุรี	0.13	ส่วนน้อย	เสียหายเล็กน้อย	ใช้งานได้	แตกร้าวเล็กน้อย
Site 3: อำเภอเมือง จ.กำแพงเพชร	0.13	ส่วนน้อย	เสียหายเล็กน้อย	ใช้งานได้	แตกร้าวเล็กน้อย

6. อภิปรายผล

1) จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารต้นแบบ พบว่า มีค่าความแข็งแรงแรงสติฟเนส แรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด เท่ากับ 1.56 KN/mm, 189.4 KN และ 132.40 mm ตามลำดับ

2) จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารเสริมกำลัง พบว่า มีค่าสติฟเนส และแรงเฉือนที่ฐานสูงขึ้นเปรียบเทียบกับโครงสร้างต้นแบบตามลำดับ ได้แก่ อำเภอวังชัน จ.แพร่ เท่ากับ 21.48 KN/mm, 802.40 KN อำเภอเมือง จ.กาญจนบุรี เท่ากับ 14.36 KN/mm, 687.2 KN, อำเภอเมือง จ.กำแพงเพชร เท่ากับ 9.39 KN/mm, 562.10 KN โครงสร้างที่มีการเสริมกำลังให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนด้านข้างที่สูงกว่าโครงสร้างต้นแบบถึง 3-4.2 เท่า

3) จากผลการวัดระดับความเสียหายของโครงสร้างเดิมและอาคารเสริมกำลังในแต่ละพื้นที่ พบว่า โครงสร้างอาคารต้นแบบ มีระดับการพังทลายของโครงสร้างเสา มีค่าดัชนีความเสียหาย DI มากกว่า 1.0 ในทุกพื้นที่ ภายหลังจากมีการเสริมกำลังโครงสร้าง ค่าดัชนีความเสียหายรวม (DI) โครงสร้างลดลง มีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 0.6 ซึ่งพิจารณาเป็นระดับความเสียหายที่ซ่อมแซมได้ สมรรถนะของอาคารอยู่ในระดับเข้าใช้งานได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO)

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

(1) สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรูปแบบลักษณะคล้ายกันและตั้งอยู่บริเวณเขตพื้นที่ภาคเหนือและตะวันตกของประเทศไทยได้

(2) นำผลที่ได้จากการวิจัยใช้เพื่อเป็นแนวทางการประเมินค่าก่อสร้างในการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารเดิมเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว และพัฒนาการเลือกวัสดุเพื่อให้เกิดความประหยัดในการก่อสร้าง

7.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

(1) ศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวิธีการเสริมกำลังเฉพาะที่โดยการพอกด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing) การเสริมกำลังเฉพาะที่โดยการหุ้มด้วยวัสดุเชิงประกอบ เป็นต้น

(2) ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถด้านต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารพหุชั้นคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้รูปด้านอื่นของอาคารต้นแบบที่มีจำนวนชั้นหรือคานเพิ่มขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพบุลย์ ปัญญาอะโป ที่สละเวลาและให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัย เพื่อให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และการสนับสนุนจากทุนวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). *มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1303-57*. กระทรวงมหาดไทย.
- ปฎิชน มณีกาญจน์ และไพบุลย์ ปัญญาอะโป. (2563). พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยกรงเหล็กและตะแกรงเหล็กฉีก. *หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ IAMBEST ครั้งที่ 5*. วันที่ 26 พฤษภาคม 2563, 361-369.
- ไพบุลย์ ปัญญาอะโป และทองศักดิ์ พรหมบุญแก้ว. (2557). การเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารพาณิชย์โดยเหล็กประกอบ. *หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการระดับชาติ นครศวรวิจัย ครั้งที่ 10*. พิษณุโลก.
- Dung, P.N., Plumier, A. (2010). Behavior of expanded metal panels under shear loading. *In: Proceedings of SDSS RIO 2010 Stability and Ductility of Steel Structures, Rio de Janeiro*. pp.1101-1108.
- Kazemi et al. (2005). Seismic shear strengthening of R/C columns with ferrocement jacket. *Cement & Concrete Composites*. 27, 834-842.
- Longthong, S., Panyakapo, P. and Ruangrassamee, A., (2020). Seismic Strengthening of RC Frame and Brick Infill Panel using Ferrocement and Expanded Metal, *Engineering Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 56-57.
- Panyamul, S., Panyakapo, P. and Ruangrassamee, A., (2019) Seismic Shear Strengthening of Reinforced Concrete Short Columns Using Ferrocement with Expanded Metal, *Engineering Journal*, 23(6), pp. 176-189.
- Park, Y. J. and Ang, A. H. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*. ASCE. 111(4): 722-739.
- Saiidi M, Sozen M A. (1979). Simple and complex models for nonlinear seismic response of reinforced Concrete structures. *Report UILU – ENG-79-2031*, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, ILLINOIS.
- Stewart W., Dean J A and Carr A J. (1984). The seismic performance of plywood sheathed shear walls., *Proc. Pacific Timber Eng. Conf.*, Auckland, Vol II, pp 486-495.