

การเสริมกำลังอาคารโรงพยาบาลโดยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
เพื่อต้านทานแผ่นดินไหว
**STRENGTHENING OF HOSPITAL BUILDING WITH REINFORCED
CONCRETE JACKETING COLUMN FOR EARTHQUAKE RESISTANT**

นุกูล บุญอินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Nukool.bo@hotmail.com

ไพบุญย์ ปัญญาอะโป

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการเสริมกำลังโครงสร้างอาคาร โรงพยาบาลเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการศึกษา อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้นซึ่งเป็นอาคารผู้ป่วยพิเศษสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ถูกเลือกใช้เป็นอาคารต้นแบบ ในการประเมินกำลังของโครงสร้างอาคาร โดยทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D และวิเคราะห์โดยวิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้น เพื่อประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้างจากแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย ผลจากการวิเคราะห์การผลัดอาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง พบว่าโครงสร้างเสาในชั้นล่างที่อยู่โดยรอบอาคารและผนังก่ออิฐมีความเสียหายมากเกินกว่าระดับสมรรถนะการป้องกันพังทลาย และผลจากการวิเคราะห์การผลัดอาคาร หลังการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณเสารอบนอกและภายในอาคารตั้งแต่ระดับชั้นตอม่อจนถึงชั้นบนสุด พบว่าสามารถเพิ่มกำลังของโครงสร้างอาคาร โดยไม่พบความเสียหายของเสาและผนังรับแรงเฉือน ทำให้โครงสร้างเสาและผนังรับแรงเฉือนของอาคารมีความปลอดภัยอยู่ในระดับช่วงสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที

คำสำคัญ: การเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหว การหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดไฟเบอร์
วิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้น

ABSTRACT

This paper presents the seismic strengthening of the hospital building structure by using the reinforced concrete jacketing columns. In this study, a 4-storey reinforced concrete building, in accordance with the Ministry of Public Health specifications, was selected as the structural model. To assess the seismic performance of the structure, the force-deformation relationship of the concrete and reinforcing steel were modeled in the form of the fiber cross-section of the structure. The nonlinear static analysis was conducted for the existing and the retrofit

structures to assess the seismic performance due to the potential earthquakes in the northern region of Thailand by using the PERFORM-3D computer program. For the existing structure, it was found that the columns and brick infill walls at the ground floor were severely damage beyond the Collapse Prevention (CP) performance. For the structure with the retrofitted columns, it was found that the strength of the structure was improved up to the level of Immediate Occupancy (IO) performance.

Keywords: Seismic Strengthening, Reinforced Concrete Jacketing, Fiber Cross -section, Nonlinear Static Analysis.

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปที่ไม่ได้มีการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว มีความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหว เนื่องจากโครงสร้างอาคารอาจไม่ได้รับการออกแบบให้มีค่ากำลัง (strength) และสติฟเนส (stiffness) ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างเพียงพอ รวมทั้งองค์อาคารของเสาและคานไม่ได้รับการออกแบบรายละเอียดการเสริมเหล็กให้มีความเหนียว (ductility) ในการต้านทานแรงกระทำแบบไป-กลับได้ โดยโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะดังกล่าวนี้มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยในปัจจุบัน หากโครงสร้างอาคารเหล่านี้ได้มีการออกแบบเสริมกำลังป้องกันไว้ก่อน ก็จะลดความสูญเสียจากแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในด้านของชีวิตและทรัพย์สินเป็นอันมาก โดยเฉพาะ อาคารโรงพยาบาลเป็นอาคารที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องรองรับการบริการผู้ป่วยอยู่ตลอดเวลา หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงแผ่นดินไหวในเกณฑ์สูง โครงสร้างอาคารจะต้องมีความปลอดภัยในระดับที่ยังสามารถเข้าใช้งานได้

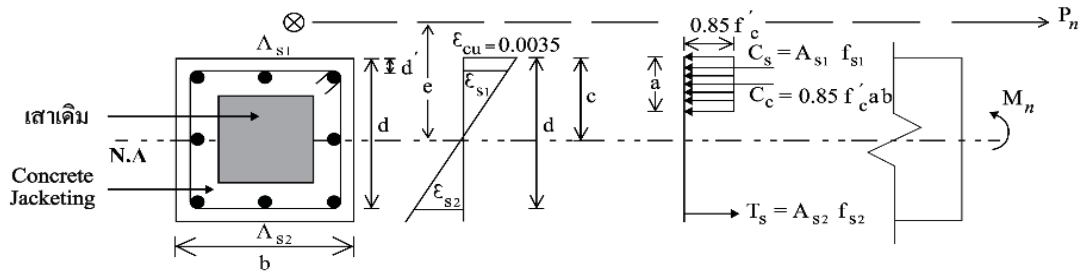
การศึกษานี้ เป็นการศึกษาสมรรถนะของโครงสร้างอาคารโรงพยาบาลตัวอย่างที่เสริมกำลังโครงสร้างด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing) เนื่องจากเป็นเทคนิควิธีการที่ง่ายในการก่อสร้างและประหยัด สามารถเพิ่มกำลังและสติฟเนสของเสาให้สูงขึ้นได้ จึงได้เลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้นซึ่งเป็นอาคารผู้ป่วยพิเศษ สังกัดกระทรวงสาธารณสุข ใช้เป็นอาคารต้นแบบสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการประเมินกำลังโครงสร้างอาคาร ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D และวิเคราะห์โดยวิธีการผลกแบบสถิตไม่เชิงเส้น เพื่อประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างจากแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ก) เพื่อศึกษาพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย และประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นและสมรรถนะของโครงสร้างอาคาร

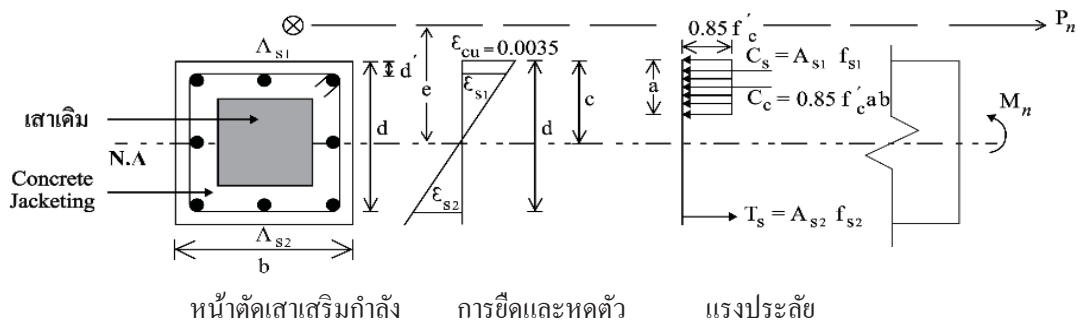
ข) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ โครงสร้างอาคารหลังจากที่เสริมกำลังโครงสร้าง ด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคาร

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



3.1 การออกแบบของค้ำอาคารเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการคำนวณแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง ใช้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 กำหนดความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด อ.วังชิ้น จ.แพร่ ใช้คาบการสั่น ในช่วงสั้น (S_s) = 1.086g และคาบการสั่น 1 วินาที (S_1) = 0.275g และกำหนดสภาพชั้นดินที่ตั้งอาคารเป็นชั้นดินปกติ เมื่อคำนวณค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ จะได้ค่า S_{DS} = 1.159g, S_{D1} = 0.485g ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคารประเภท IV ($I=1.5$) ข้อมูลเหล่านี้ทำให้จำแนกประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวเป็นประเภท ง เมื่อพิจารณาระบบโครงสร้างอาคาร จึงใช้โครงสร้างค้ำคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง โดยมีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง $R = 5$ และเพิ่มค่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ออกแบบของค้ำอาคารอีก 40% ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 40 เมตร ทำการคำนวณหาค่าแรงเฉือนพื้นฐานของอาคารด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม ETABS และนำค่าแรงภายในขององค้ำอาคาร มาใช้ในการออกแบบเสริมกำลังเสาอาคาร โดยแสดงภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงแรงของหน้าตัดเสาเสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

หน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมมีแรงกระทำ P_n ที่ระยะการเอียงศูนย์กลาง e จากแนวแกนสะเทินของเสา ซึ่งการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง คำนวณได้จาก

$$M_n = P_n e = 0.85 f'_c ab \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_{s1} f_{s1} (d - d') + M_{exc} \quad (1)$$

เมื่อ P_n คือ แรงแนวแกนสูงสุดครุ (Nominal Axial Force) กระทำต่อเสาเสริมกำลัง, e คือ ระยะเอียงศูนย์กลางของแรงกระทำ, M_n คือกำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง, M_{exc} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเดิม, f'_c คือ กำลังอัดคอนกรีต, d คือ ความลึกของหน้าตัดประสิทธิภาพผลของเสาเสริมกำลัง, a คือ ความลึกของการกระจายความเค้น b คือความกว้างของผิวหน้ารับแรงอัด d' คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่รับแรงอัด

ถึงศูนย์กลางของเหล็กรับแรงอัด คือระยะจากผิวนอกสุดที่รับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง, A_{s1} คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด, f_{s1} คือหน่วยแรงเหล็กเสริมรับแรงอัด, A_{s2} คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง, f_{s2} คือหน่วยแรงเหล็กเสริมรับแรงดึง, c_c คือ แรงอัดในคอนกรีต, c_s คือแรงอัดในเหล็กเสริม, T_s คือ แรงดึงในเหล็กเสริม

3.2 การทบทวนผลงานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา Lee and Woo (2002) ได้ทำการทดสอบการใส่ผนังก่ออิฐแบบเต็มส่วน โดยใช้โต๊ะเขย่าให้เกิดการสั่น ด้วยอัตราเร่งจากการจำลองคลื่นแผ่นดินไหว พบว่าการมีผนังก่ออิฐทำให้เพิ่มสติเฟนของโครงสร้าง และกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐานเพิ่มขึ้น ต่อมา Magenes and Pampanin (2004) วิเคราะห์โครงสร้างจำลองสูง 6 ชั้นแบ่งเป็น 3 ช่วง ด้วยวิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้นและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาผลของผนังก่ออิฐแบบบางส่วนและแบบเต็มส่วน ผลการวิเคราะห์แสดงว่า ผนังก่ออิฐมีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น และมีผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนที่จุดต่อคาน-เสา ไพนุลย์และ อนุชาติ (2013) ศึกษาการเสริมกำลังผนังอิฐก่อใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก สำหรับอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น พบว่าผนังที่มีช่องเปิด ให้ค่ากำลังที่ลดลง จากกรณีผนังทึบ เนื่องจากพื้นที่สัดส่วนของผนังลดลงด้วยพื้นที่ช่องเปิด ผลของการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าผนังก่ออิฐเดิม คำรบและไพนุลย์ (2556) ศึกษาการประเมินค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยวิธีการผลัดแบบวัฏจักร สำหรับอาคารเรียนสูง 4 ชั้น พบว่า วิธีการผลัดแบบวัฏจักรให้ผลค่าการเคลื่อนที่สูงสุด ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และค่าดัชนี ความเสียหาย ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ไพนุลย์ และฉวีพงษ์ (2557) ศึกษาการเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น เพื่อต้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธีองค์อาคารยึดรั้งไว้การโค้งเคาะ ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ด้วยโปรแกรม PERFORM-3D และ วิเคราะห์ด้วยวิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้น 3 มิติและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น พบว่า หลังการเสริมกำลัง โครงสร้างอาคารด้วยวิธียึดรั้งไว้การโค้งเคาะบริเวณขอบอาคาร ไม่พบความเสียหายของเสาอาคารและค่า การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นอาคารมีค่าไม่เกินข้อกำหนด พรเทพและคณะ (2017) ศึกษาผลการวิเคราะห์ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว โดยเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งเสาและคาน พบว่าค่า demand-capacity ratio จากการวิเคราะห์ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าค่าที่ควรจะเป็นด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจากการใช้คลื่นแผ่นดินไหว

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ขั้นตอนการวิจัย

ก) ทำการคัดเลือกแบบอาคาร โรงเรียนสูง 4 ชั้น (อาคารผู้ป่วยพิเศษ) ตามแบบมาตรฐานของ กระทรวงสาธารณสุข ซึ่งตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทยที่อาจได้รับผลกระทบที่กำหนดให้เป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวระดับสูง ซึ่งโครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ข) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของอาคารเดิมด้วยวิธี Pushover Analysis เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นและทำการออกแบบเสริมกำลังอาคารเดิมโดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของ อ.วังชิ้น จ.แพร่

เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงสุดตามมาตรฐานการออกแบบ โดยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Jacketing) ในส่วนของเสาที่เกิดความเสียหาย

ค) ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของคานและเสาบริเวณข้อหมุนพลาสติกแบบหน้าตัดไฟเบอร์และวิเคราะห์พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวภายหลังการเสริมกำลังโดยวิธีการผลักอาคาร (Pushover Analysis)

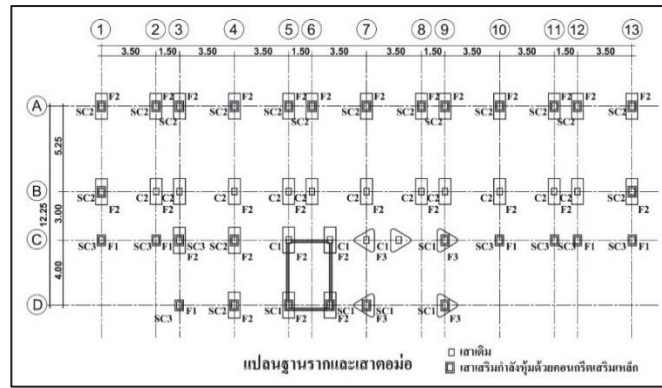
ง) ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างอาคารเดิมกับอาคารที่ได้รับการเสริมกำลัง

4.2 โครงสร้างอาคารตัวอย่างเดิมและการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

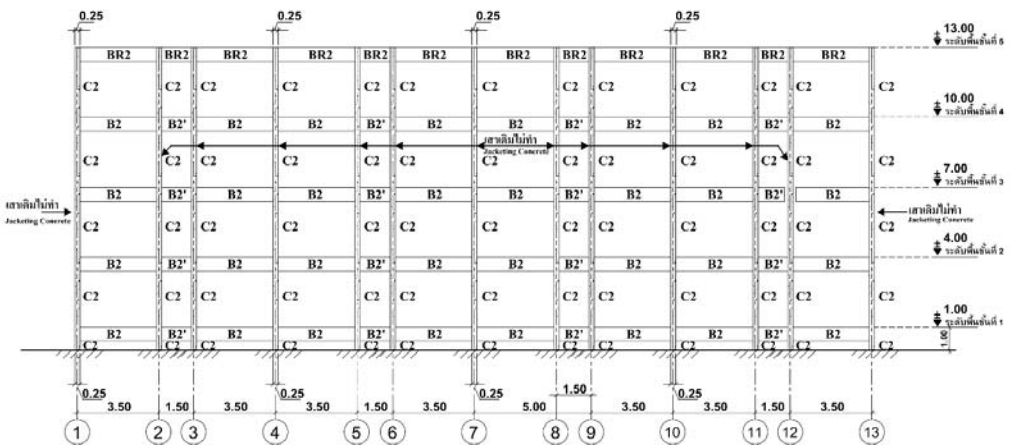
อาคารตัวอย่างหลังนี้ได้ถูกการออกแบบโดยใช้วิธี Working Stress Design ตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ผังอาคารมีลักษณะไม่สมมาตร โดยมีผังอาคารของโครงสร้างแสดงในภาพที่ 2 และมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

ผังอาคารมีขนาด 12.25 x 34.00 เมตร ความสูง 17.50 เมตร ภายในอาคารแต่ละชั้นมีการกั้นผนังอิฐมวลฉนวนเพื่อใช้เป็นห้องรักษาผู้ป่วยพิเศษ พื้นอาคารทั่วไป รวมทั้งพื้นระเบียงกันสาดและพื้นห้องน้ำเป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ รับน้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ตร.ม. โครงสร้างอาคารเป็นระบบคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กเสาอาคาร C1, C2 ขนาด 0.25 x 0.40 เมตร และเสา C3 ขนาด 0.25 X 0.25 เมตร โดยมีการเสริมเหล็กแตกต่างกันสำหรับคานทั่วไปมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 0.15 x 0.50 เมตร, 0.20 x 0.50 เมตร, 0.20 x 0.60 เมตร คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 173 กก./ซม². สำหรับแท่งคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 15 ซม. เหล็กข้ออ้อยใช้เกรด SD30 เหล็กกลมใช้เกรด SR24

โครงสร้างอาคารผู้ป่วยพิเศษ 4 ชั้น มีลักษณะต่างๆ ที่มีความเสี่ยงสูงจากแผ่นดินไหว อาทิเช่น (1) เสาต่อม่อความสูง 1 เมตร จากระดับดินเดิม ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบแรงเฉือนที่ระดับเสาต่อม่อ (2) เสาที่มีขนาดเล็ก (C3) บางต้น เมื่อเทียบกับขนาดของคาน มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบเสาอ่อน-คานแข็ง (Weak Column Strong Beam) (3) เสาที่มีปริมาณเหล็กปลอกต่ำ มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายจากแรงเฉือน ซึ่งมีลักษณะการพังทลายแบบเปราะ โดยมีรายละเอียดรูปตัดตามยาวแกน A เป็นตัวอย่างของโครงสร้างอาคารเดิมรวมทั้งแบบแปลนแสดงตำแหน่งของเสาเดิมและเสาเสริมกำลังหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กดังภาพที่ 2 และแบบแปลนแสดงเหล็กเสริมเสาอาคารก่อนและหลังเสริมกำลัง ดังภาพที่ 3



(ก) ผังอาคาร



(ข) รูปตัดตามยาวแกน A ของโครงสร้างอาคาร

ภาพที่ 2 (ก) ผังอาคาร, (ข) รูปตัดตามยาวแกน A ของโครงสร้างอาคาร

ชั้น/เสา	C1	C2	C3	ชั้น/เสา	C1	C2	C3
บนพื้นหลังคา รับหลังคาคลุมห้อง ลิฟท์	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ปØ6 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ปØ6 มม. @0.20 C/C	—	บนพื้นหลังคา รับหลังคาคลุมห้อง ลิฟท์	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	—
บนพื้นชั้น 4 รับหลังคา	↑	↑	↑	บนพื้นชั้น 4 รับหลังคา	↑	↑	↑
บนพื้นชั้น 3 รับพื้นชั้น 4	เหล็กชั้น 8-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ปØ6 มม. @0.20 C/C	บนพื้นชั้น 3 รับพื้นชั้น 4	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20
บนพื้นชั้น 2 รับพื้นชั้น 3	เหล็กชั้น 8-Ø25 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ปØ6 มม. @0.20 C/C	บนพื้นชั้น 2 รับพื้นชั้น 3	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20
บนพื้นชั้น 1 รับพื้นชั้น 2	เหล็กชั้น 10-Ø25 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø25 มม. + 4-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	บนพื้นชั้น 1 รับพื้นชั้น 2	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20
ค่อม	เหล็กชั้น 10-Ø25 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø25 มม. + 4-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø19 มม. ปØ9 มม. @0.20 C/C	ค่อม	เหล็กชั้น 16-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 16-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 16-DB25 มม. ปØ9 มม. @0.20

(ก) เสาเดิม

(ข) เสาเสริมกำลัง

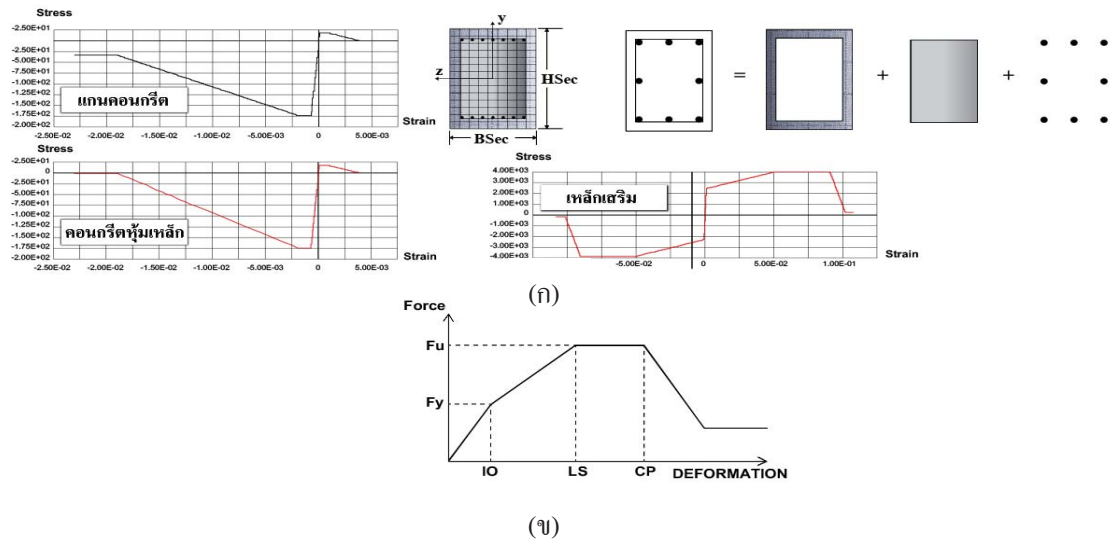
ภาพที่ 3 (ก) เสาเดิม, (ข) เสาเสริมกำลัง

4.3 แบบจำลองโครงสร้าง

ในการจัดทำแบบจำลองโครงสร้างใช้โปรแกรม PERFORM 3D โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) รูปตัดไฟเบอร์ (Fiber Section)

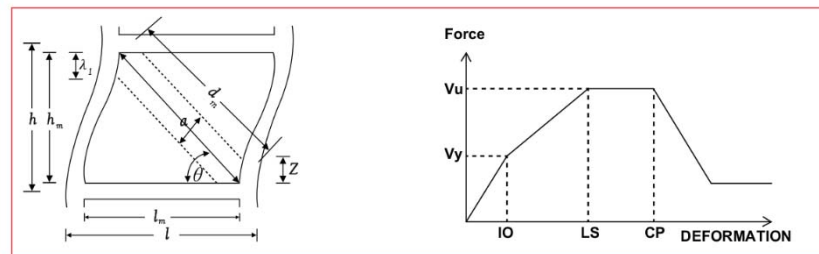
ส่วนประกอบนี้ใช้ในการจำลองพฤติกรรมอนิลาสติก ภายใต้การวิบัติเนื่องจากแรงคด และการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณจุดต่อของเสาและคาน หลักการสำคัญของส่วนประกอบนี้คือการแบ่งหน้าตัดองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่บริเวณปลายของค้ำอาคารออกเป็นส่วนๆ (ไฟเบอร์) โดยรูปตัดไฟเบอร์ จะจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ (1) คอนกรีตหุ้มเหล็ก (Covered concrete) (2) แกนคอนกรีต (Confined concrete) และ (3) เหล็กเสริม ไฟเบอร์แต่ละประเภทจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 4 จากความสัมพันธ์ Force - Deformation ของคอนกรีตและเหล็กเสริม นำมาใช้วัดสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ระดับตามที่แสดงในภาพที่ 4 (ข) ได้แก่ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO), ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS) และระดับป้องกันการพังทลายโดยสิ้นเชิง (CP)



ภาพที่ 4 ภาพแบบจำลองรูปตัดไฟเบอร์(Fiber Section)

ข) แบบจำลองพฤติกรรมผนังอิฐก่อในโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก

การจำลองพฤติกรรมผนังอิฐก่อในโครงคอนกรีตเสริมเหล็กใช้วิธี Equivalent Strut Model ซึ่งเป็นแรงค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่าตามข้อเสนอแนะ FEMA 306 แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างและสมรรถนะของผนังอิฐก่อ

แรงอัดค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut) คำนวณจาก

$$V_c = a f'_m \cos \theta \quad (2a)$$

$$a = 0.175 (\lambda_1 h_m)^{-0.4} d_m \quad (2b)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_m t \sin 2\theta}{4 E_c I_g h_m} \right]^{0.25} \quad (2c)$$

เมื่อ f'_m คือกำลังรับแรงอัดของผนังปรีซึม θ คือ มุมในแนวทแยงของการค้ำยัน t คือ ความหนาของผนังอิฐก่อ I_g คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของเสา h_m คือ ความสูงของผนังอิฐก่อ E_m คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอิฐก่อ E_c คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของโครงสร้าง d_m คือ ความยาวแนวทแยงของแผ่นผนังก่อ

4.4 การวิเคราะห์การผลักอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้นโดยวิธี Pushover Analysis

ขั้นตอนการวิเคราะห์การผลักอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้นโดยวิธี Pushover Analysis สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดย 1) กำหนดค่าการกระจัดที่เป้าหมาย (Target Displacement) โดยวิธี Displacement Coefficient Method (ASCE/SEI 41-06, FEMA 356-2000, มยผ. 1303-57) 2) ทำการผลักอาคารไปยังค่าการกระจัดที่เป้าหมาย 3) ตรวจสอบค่า Demand - Capacity Ratio (DCR) ของโครงสร้างแต่ละชั้น โดยวัดสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ระดับ ได้แก่ระดับเข้าใช้งานได้ทันที (IO), ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS), ป้องกันการพังทลายโดยสิ้นเชิง (CP)

ในการศึกษานี้ได้คำนวณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายจากสมการที่ 3 ของอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลังสำหรับแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงมากพื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย(อ.วังจันทน์ จ.แพร่)

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (3)$$

โดยที่ $C_0=1.3, C_1=1.44, C_2=1.13$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ตามมาตรฐาน มยผ. 1303-57

$S_a=1.159, T_e=0.3900 \text{ sec}$ (ก่อนเสริมกำลัง), $T_e=0.1774 \text{ sec}$ (หลังเสริมกำลัง)

ผลการคำนวณ แสดงในรูปของค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Drift Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนที่เป้าหมายและความสูงทั้งหมดของอาคาร สำหรับอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลังในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Drift Ratio) ของอาคารเดิม

ทิศทางการผลักอาคาร	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (1×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (2×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (3×Target Drift Ratio)
H1 ตามยาว	0.0053	0.0106	0.0159

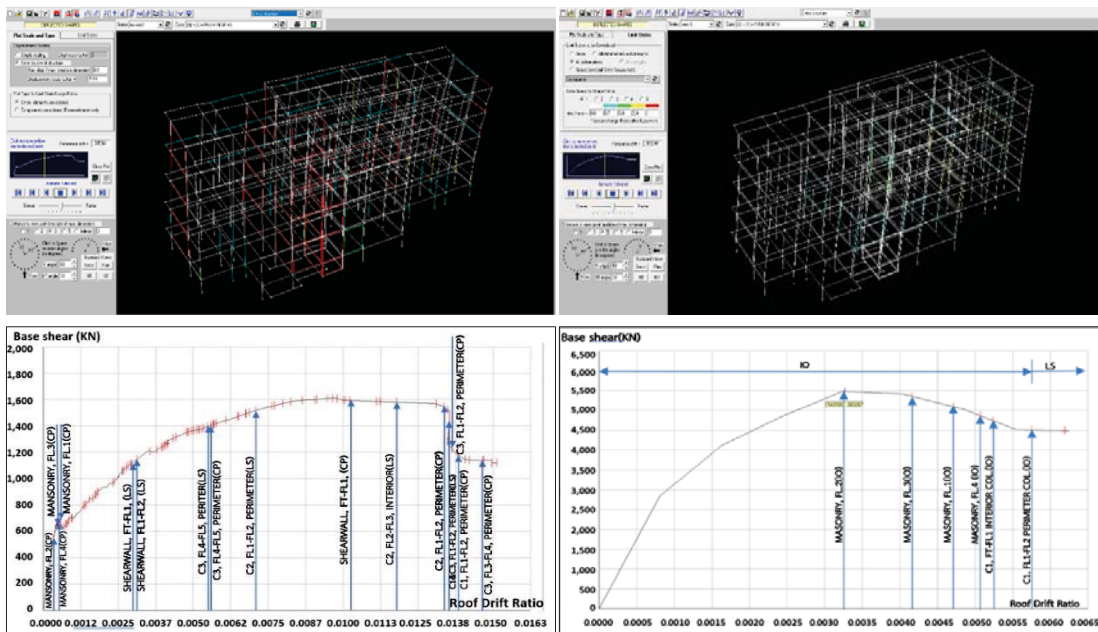
ตารางที่ 2 ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Drift Ratio) ของอาคารเสริมกำลัง

ทิศทางการผลักอาคาร	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (1×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (1.5×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (2×Target Drift Ratio)
H1 ตามยาว	0.0034	0.0051	0.0068

5. ผลการศึกษา (Results)

5.1 ผลการวิเคราะห์การผลักอาคาร

ผลการวิเคราะห์การผลักอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลัง แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) และอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร (Roof Drift Ratio, RDR) เฉพาะสำหรับการผลักในทิศทางตามยาว(H1) ในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเดิมสามารถต้านทานแรงเฉือนที่ฐาน ณ.การเคลื่อนที่เป้าหมายได้เท่ากับ 1,340 กิโลนิวตันและต้านทานแรงเฉือนสูงสุดได้เท่ากับ 1,600 กิโลนิวตัน และภายหลังเสริมกำลังสามารถต้านทานแรงเฉือนที่ฐาน ณ.การเคลื่อนที่เป้าหมายได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 5,500 กิโลนิวตันและเป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด



(ก) อาคารเดิม

(ข) อาคารเสริมกำลัง

ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์การผลักอาคาร

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์การผลักอาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง แสดงในภาพที่ 6(ก) เมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงหนึ่งเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($1 \times \text{Target Drift Ratio}$) ผนังก่ออิฐอาคารทุกระดับชั้นของอาคารมีการพังทลาย (CP) ส่วนที่ยังมีความปลอดภัย ได้แก่ ผนัง Shear Wall FT-FL1 ผนัง Shear Wall FL1-FL2 และเสา C3 ชั้น FL4-FL5 รอบนอกอาคารเมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงสองเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($2 \times \text{Target Drift Ratio}$) ส่วนที่มีการพังทลายได้แก่ เสา C3 ชั้น FL4-FL5 รอบนอกอาคาร และผนัง Shear Wall FT-FL1 ส่วนที่ยังปลอดภัยคือ เสา C2 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคารเมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงสามเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($3 \times \text{Target Drift Ratio}$) องค์อาคารที่ยังมีความปลอดภัย (LS) คือ เสา C2 ชั้น FL2-FL3 ภายในอาคาร สำหรับองค์อาคารที่มีความเสียหายถึงระดับพังทลาย (CP) คือ โครงสร้างเสา C2 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคาร เสา C1 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคาร เสา C3 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคาร และ เสา C3 ชั้น FL3-FL4 รอบนอกอาคาร

จากผลการวิเคราะห์การผลักอาคารเสริมกำลัง ดังที่แสดงในภาพที่ 6(ข) เมื่อค่าการเคลื่อนที่ในช่วง 1 เท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($1 \times \text{Target Drift Ratio}$) ยังไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้น เมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ที่

ในช่วง 1.5 เท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($1.5 \times \text{Target Drift Ratio}$) ผนังก่ออิฐทุกระดับชั้นอาคารมีความเสียหายเล็กน้อย ยังอยู่ในระดับสมรรถนะการเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) และเมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงสองเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($2 \times \text{Target Drift Ratio}$) เสา C1 ชั้น FT-FL1 ภายในอาคาร เสา C1 ชั้น FL1-FL2 ภายนอกอาคาร ยังคงอยู่ในสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO), โครงสร้างเสาและผนัง Shear wall ไม่มีความเสียหายรุนแรงใดๆ

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสมรรถนะของโครงสร้างอาคารโรงพยาบาลสูง 4 ชั้น ที่ถูกออกแบบโดยใช้วิธี Working Stress Design ตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) และก่อสร้างตามแบบมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขในกรณีก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยวิธีวิเคราะห์การผลักอาคาร (Pushover Analysis) สามารถสรุปได้ดังนี้

กรณีอาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง พบว่า เมื่อพิจารณา ณ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง เสารอบนอกอาคารมีความเสียหายเกินกว่าสมรรถนะความปลอดภัยต่อชีวิต (LS. level) โดยมีเสาที่อยู่ในระดับชั้นล่างและผนังก่ออิฐมีความเสียหายมากเกินกว่าสมรรถนะการป้องกันการพังทลาย (CP) โดยพิจารณาจากค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ขององค์อาคารดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น โครงสร้างเสาและผนังอิฐก่อของอาคารเดิมอาจไม่มีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการใช้งานภายใต้แรงแผ่นดินไหว

สำหรับอาคารดังกล่าว ที่มีการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Jacketing) พบว่า เมื่อพิจารณา ณ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง พบว่า องค์อาคารต่างๆยังอยู่ในช่วงสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) โดยมีค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของเสาและผนังอิฐก่ออาคารทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้น โครงสร้างอาคารจึงมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที

7. ข้อเสนอแนะ

วิธีการเสริมกำลังโดยวิธีการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นวิธีการง่าย เนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างเสริมกำลัง สามารถใช้แรงงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานที่มีทักษะความชำนาญพิเศษ รวมทั้งค่าก่อสร้างประหยัดกว่าการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวิธีอื่นๆ จากการตรวจสอบน้ำหนักโครงสร้างส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากส่วนเนื้อคอนกรีตหุ้ม เสาเพื่อเสริมกำลัง จัดว่าอยู่ในระดับน้อยมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารและการคำนวณผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป มีดังนี้

(ก) ควรมีการศึกษาโครงสร้างอาคารรูปแบบอื่น ในเขตพื้นที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย ในระดับความรุนแรงต่างๆ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้น สำหรับในเขตพื้นที่ความรุนแรงแผ่นดินไหวระดับต่างๆอีกด้วย

(ข) เทคนิควิธีการติดตั้งเสาเสริมกำลังโดยวิธีการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ควรติดตั้งตามมาตรฐานการเสริมกำลังเสา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตใหม่กับคอนกรีตเก่าของเสาเดิม ด้วยการสกัดผิวหน้าคอนกรีตเสาเดิมให้มีความขรุขระ พร้อมกับทำการเจาะคอนกรีตผิวหน้าเสาเพื่อเสียบฝังยึดใส่เหล็กเดือย (Dowel Bar) ทุกๆระยะ 20-30 เซนติเมตร ส่วนเหล็กยื่นของเสาที่ติดตั้งเสริมเพิ่มขึ้นใหม่จะต้องเจาะฝังเข้าไปในฐานรากหรือคานส่วนเดิมอีกด้วย

(ค) กรณีไม่มีแบบแปลนรายการเดิมหรือแบบแปลนเดิมอาจสูญหายเนื่องจากอาคารเก่า แนะนำให้ทำการเจาะคอนกรีต เสาคเดิม เพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีตทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด พร้อมกับทำการสแกนเสาคเดิมด้วยเครื่องสแกนเหล็ก เพื่อหาจำนวนเหล็กแกนเสริมเสารวมทั้งเหล็กปลอกเสา เพื่อทำการประเมินกำลังของโครงสร้างอาคารเดิมต่อไปได้

8. เอกสารอ้างอิง

- คำรบ บำรุงราษฎร์และไพบุลย์ ปัญญาคะโป. (2556). การประเมินค่าการเคลื่อนที่ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีการผลัดแบบวัฏจักร. *วารสารศรีปทุมปริทัศน์ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 5, มกราคม-ธันวาคม.
- ไพบุลย์ ปัญญาคะโปและอุริพงษ์ พลพิมลพัฒน์. (2557). การเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยองค์อาคารซี่โครงใ้การโก่งเดาะ. *วารสารนเรศวร ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(2).
- พรเทพ วัฒนากรแก้ว, ทวีช พูลเงิน และสุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์. (2017). *การประเมินและเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว*. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 14.
- ไพบุลย์ ปัญญาคะโป และอนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ. (2013). *การเสริมกำลังผนังก่ออิฐสำหรับอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว*. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9. (น2 455-462). พิษณุโลก: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- โยธาธิการและผังเมือง, กรม. (2557). *มาตรฐานการประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1303)*. กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร.
- โยธาธิการและผังเมือง, กรม. (2561). *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1301/1302-61)*. กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร.
- FEMA 306. (1998). *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Building*. Applied Technology Council (ATC-43 Project).
- American Society of Civil Engineering (ASCE). (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, prepared for the SAC Joint Venture, published by the Federal Emergency Management Agency, FEMA-356, Washington, D.C.
- Lee, H. S., Woo, S. W., (2002), "Effect of Masonry Infills on Seismic Performance of a 3-Storey R/C Frame with Non-Seismic Detailing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31: 353-378.
- PERFORM-3D, "Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D structure: Analysis Reference", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.
- Magenes, G. Pampanin, S., 2004. "Seismic Response of Gravity load Designed Frame Systems with Masonry Infills", 12th WCEE, Vancouver, August, Paper n. 4004.
- American Society of Civil Engineering (ASCE). (2007). *Seismic rehabilitation of existing building*. ASCE Standard No. ASCE/SEI 41-06.