

การศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อ ต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

เจนศักดิ์ คชนิล

สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ
อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว และการเลือกวิธีการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นอาคารเรียนตามแบบมาตรฐานของกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหวในภาคเหนือของประเทศไทย อาคารตัวอย่างที่ศึกษาใช้การสุมตัวอย่างแบบเจาะจง โดยเลือกใช้อาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น 12 ห้องเรียน ผลการศึกษาพบว่า จากการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับอาคารตัวอย่างด้วยวิธีสถิตแบบไม่เชิงเส้น หรือที่เรียกว่าวิธีการผลักด้วยแรงดันข้าง (Pushover Analysis) แสดงให้เห็นว่าการวิบัติของอาคารส่วนใหญ่อยู่ที่ตำแหน่งจุดต่อพลาสติกของเสาชั้นสอง ดังนั้นวิธีการเสริมกำลังที่สามารถดำเนินการได้อย่างเหมาะสมประกอบด้วย 6 วิธีดังนี้ คือ การหุ้มเสาด้วยคอนกรีต การหุ้มเสาด้วยเหล็กแผ่น การหุ้มเสาด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน การยึดด้วยวงค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ การยึดด้วยแกนเหล็ก(Bracing) และการใช้ผนังรับแรงเฉือน เมื่อพิจารณาคัดเลือกวิธีการเสริมกำลังให้กับอาคารที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เทคนิควิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) พบว่าวิธีการเสริมกำลังด้วยการใช้ผนังรับแรงเฉือนเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆที่มีจำนวนชั้นและลักษณะคล้ายกับอาคารตัวอย่างได้

คำสำคัญ: อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว การเสริมกำลัง

The Technique for Retrofitting of Reinforced Concrete Building to Resistance Earthquake Force in the North of Thailand

Jensak Koschanin

Department of Construction Management Engineer, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University,
27 Injaimee Road, Tumbon Tha-It, Muang District, Uttaradit Province, 53000.

Abstract

This research purposes are to study the retrofitting technique for reinforced concrete buildings which is resisting earthquake and to choose the appropriate technique for retrofitting reinforced concrete building to resist earthquake. The reinforced concrete building in this case is building by the standard model of ministry of education in the northern Thailand. The samples using purposive sampling that is concrete school building 3 floor 12 classrooms. The study found that nonlinear static Analysis (NSA) also known as pushing with force method. (Pushover Analysis) showed that the failure of most buildings at the Plastic Hinge of the second floor. So how to retrofitting can be implemented properly contains 6 method as follows. Concrete Jacketing, Steel Jacketing, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Buckling Restrain Brace (BRB), Steel. Braced, and shear walls. When considering how to retrofitting the building with most appropriate technique using Analytic Hierarchy Process (AHP) method. Found that how to retrofitting with shear walls are the most suitable method. And can be applied to the strengthening of reinforced concrete building and other buildings that have number of floors and resembles with the sample.

Keywords: Reinforced Concrete Building, Seismic Evaluation, Retrofitting

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการเกิดแผ่นดินไหวขึ้นบ่อยครั้งในประเทศไทย และประเทศอื่นๆ ทั่วโลก การเกิดแผ่นดินไหวในแต่ละครั้งทำให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว โดยที่ภัยพิบัติดังกล่าวนี้ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า เพราะฉะนั้นการป้องกันหรือการเตรียมความพร้อมรับมือต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่สามารถทำได้ [1] นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการเตรียมความพร้อมรับมือต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวด้วยการเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงด้านข้าง(แรงแผ่นดินไหว)ให้กับอาคารสามารถช่วยลดการสูญเสียหรือลดผลกระทบจากภัยพิบัติแผ่นดินไหวได้ [2] จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลายครั้งที่ผ่านมาในอดีตพบว่า ความสูญเสียส่วนมากเกิดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้และเกิดการวิบัติและพังทลายลงมาทันทีทำให้ผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารเหล่านั้นได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตเป็นจำนวนมากโดยไม่สามารถหนีรอดออกมาได้ [3] ดังนั้นจึงมีการวิจัยและศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับความสามารถของอาคารในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวเป็นจำนวนมากเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างของอาคาร(สำหรับอาคารใหม่) และการเสริมความแข็งแรงให้กับอาคาร(สำหรับอาคารเดิมที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว) เพื่อเป็นการป้องกันความสูญเสียดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นได้ [4-5]

ปัจจุบันงานก่อสร้างอาคารในท้องถิ่นต่างๆ มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งอาคารที่เป็นที่พักอาศัย อาคารพาณิชย์ อาคารสำนักงาน อาคารสถานที่ราชการ โรงพยาบาลและอาคารอื่นๆ โดยอาคารเหล่านี้ภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จและมีการใช้งานอาคารมาแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารต่างๆ ในประเทศไทยมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นอาคารที่สร้างมาจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสิ้น ซึ่งอาคารเหล่านี้ก่อสร้างขึ้นในช่วงก่อนที่จะมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบอาคารที่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงเป็นการเสี่ยงในการเกิดการพังทลายของอาคารได้หากมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้น [6] ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิควิธีการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับ

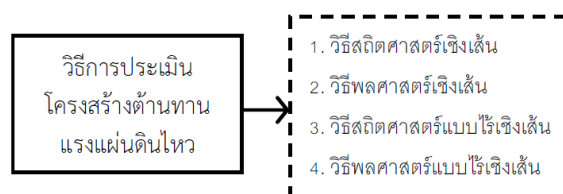
ต้านทานแรงแผ่นดินไหว รวมทั้งการคัดเลือกวิธีการเสริมกำลังให้กับอาคารได้อย่างเหมาะสม เพื่อที่จะสามารถป้องกันการสูญเสียในด้านทรัพย์สินและเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ใช้อาคารอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว และการเลือกวิธีการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสม

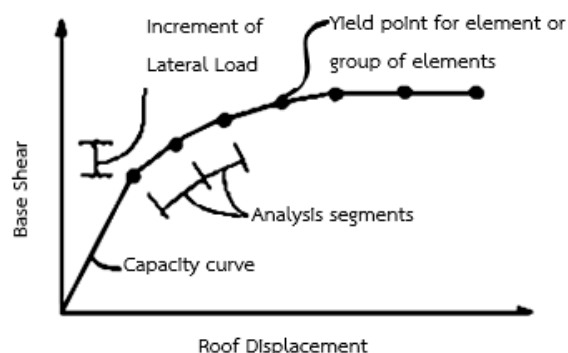
1.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ได้ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear) และแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1



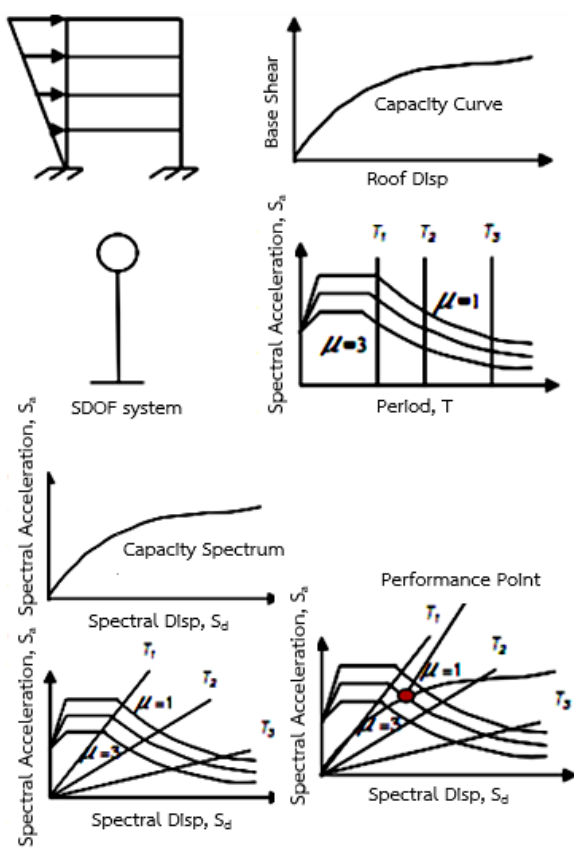
รูปที่ 1 วิธีการประเมินโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว [7]

การวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องที่สุด คือการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์แบบไร้เชิงเส้น เช่น การวิเคราะห์โดยวิธี Time History แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ที่ให้ผลความถูกต้องพอสมควรแต่สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าจึงมีความสำคัญและจำเป็น ซึ่งในที่นี้ได้แก่การวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์แบบไร้เชิงเส้น วิธีที่นิยมนำมาวิเคราะห์ได้แก่วิธี Nonlinear Static Pushover เป็นการวิเคราะห์ที่แสดงผลออกมาในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (Capacity Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เส้นโค้งสมรรถนะของอาคาร [8]

วิธีการประเมินโครงสร้างเพื่อหาความสามารถด้านทานแรง แผ่นดินไหวสามารถทำได้โดยการหาตำแหน่งของแรงกระทำ ด้านข้างสูงสุดและการเคลื่อนตัวด้านข้างของยอดอาคารสูงสุด ที่โครงสร้างสามารถรับได้ก่อนเกิดการพังทลายภายใต้แรง แผ่นดินไหว (Performance Point) จากการพิจารณา Capacity Demand Diagram โดยเป็นการเปรียบเทียบ Capacity Curve และ Demand Spectrum ซึ่งแปลงให้อยู่ใน รูปของสเปกตรัมของอัตราเร่ง (Spectral Acceleration, S_a) และสเปกตรัมของการขจัด (Spectral Displacement, S_d) ใน รูปแบบความสัมพันธ์ของ Acceleration Displacement Response Spectral (ADRS) ภายใต้ค่าความเหนียว (Ductility, μ) ต่างๆกัน [9-10] ดังแสดงในรูปที่ 3 จุดตัด ระหว่าง Capacity Spectrum ของอาคารกับค่าความเหนียว แสดงถึงค่าประสิทธิภาพของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว (Performance Point), [11]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของ Acceleration Displacement Response Spectral (ADRS), [8]

จากการศึกษาแนวทางการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 6 วิธี ดังนี้

1. การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing)
2. การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)
3. การพอกโครงสร้างเสาและคานที่มีอยู่เดิมด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)
4. การเสริมกำลังด้วยวิธีการใช้ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ (Buckling Restrain Brace, BRB)
5. การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้แกนแนงเหล็ก (Steel Braced)
6. การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้กำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต (Concrete Shear Wall)

การศึกษาการเสริมกำลังอาคารด้วยวิธีการต่าง ๆ นั้น พบว่า อาคารหลังหนึ่งๆ สามารถเสริมกำลังได้หลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังที่ดีต้องสามารถลดการเสียรูประหว่างชั้นได้ [12] ดังนั้นสิ่งสำคัญคือ การคัดเลือกวิธีการเสริมกำลังที่เหมาะสมกับอาคารมากที่สุด การเสริมกำลังอาคารไม่อาจพิจารณาเพียงเทคนิคทางตรงเพียงอย่างเดียว แต่ความเป็นจริงยังมีความสำคัญหลากหลายที่เกี่ยวข้องเช่น ราคาค่าต้นทุน ระยะเวลา ประสิทธิภาพของโครงสร้างเดิม ผลกระทบต่อด้านสถาปัตยกรรม ผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์และอื่นๆ สิ่งเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน [13] ในที่นี้ได้ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเงื่อนไข (Multi-Criteria Decision Making; MCDM) โดยการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process; AHP) ในการเลือกวิธีการเสริมกำลังอาคารที่เหมาะสมที่สุดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว วิธี AHP-MCDM เริ่มต้นจากการรวบรวมปัจจัยเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องต่อการพิจารณาทางเลือก ทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัยเงื่อนไขและทางเลือก โดยสอบถามวิศวกร ผู้เชี่ยวชาญ ผู้ออกแบบ สถาปนิก และตัวแทนเจ้าของงาน การวิเคราะห์ที่ได้แสดงถึงค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละปัจจัย และลำดับของทางเลือก

2. ขอบเขตของงานวิจัย

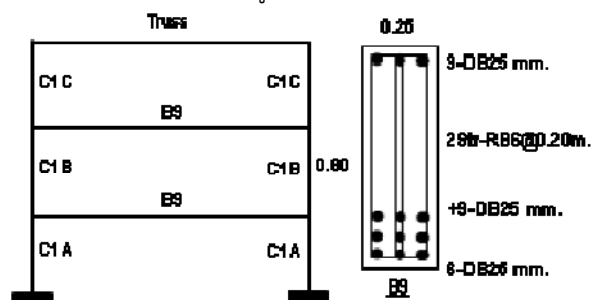
อาคารในการวิจัยนี้ได้แก่ อาคารเรียนตามแบบมาตรฐานสำนักงานกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานแบบ สน.ศท. 3/12 (ปรับปรุง 2545) ซึ่งใช้ในพื้นที่ 10 จังหวัดภาคเหนือของ

ประเทศไทย โดยผู้วิจัยกำหนดเป็นกลุ่มตัวอย่างด้วยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ตัวแปรต้น คือ เทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวตัวแปรตาม คือ เทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสมพื้นที่ในการดำเนินการวิจัย คือ อาคารเรียนในพื้นที่เสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือของประเทศไทย ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ.2558 – เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2559

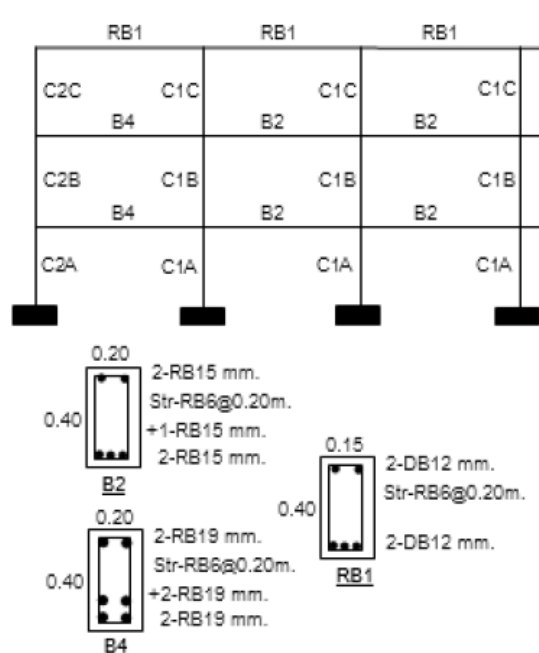
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 ดำเนินการค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจากแหล่งต่างๆ เช่น หอสมุดมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ หอสมุดคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม การค้นคว้าข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต

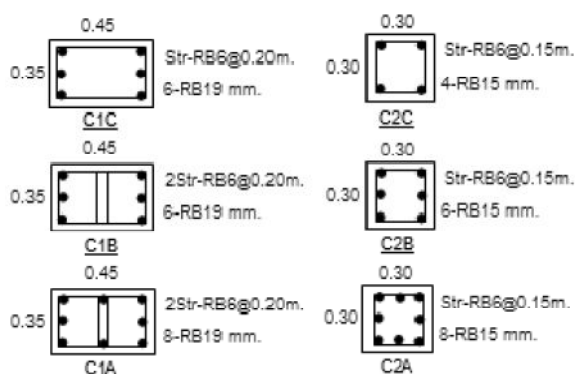
3.2 พิจารณาคัดเลือกอาคารต้นแบบ ผู้วิจัยใช้การสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) สืบรวจข้อมูลจริงจากสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน เขต 1 ภาคเหนือ จำนวน 10 จังหวัด ในที่นี้ใช้อาคารแบบ สน.ศท. 3/12 (ปรับปรุง 2545) โดยเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชั้น ความสูงทุกชั้น 3.5 เมตร กว้าง 13.5 เมตร ยาว 33 เมตร ห้องเรียนกว้าง 8 เมตร ยาว 8 เมตร รายละเอียดแบบก่อสร้างของอาคารต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4 รูปตัดตามขวางของอาคาร



รูปที่ 5 รูปตัดตามยาวของอาคาร



รูปที่ 6 รูปหน้าตัดเสาของอาคาร

3.3 วิเคราะห์และประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารโดยวิธี Nonlinear Static Pushover

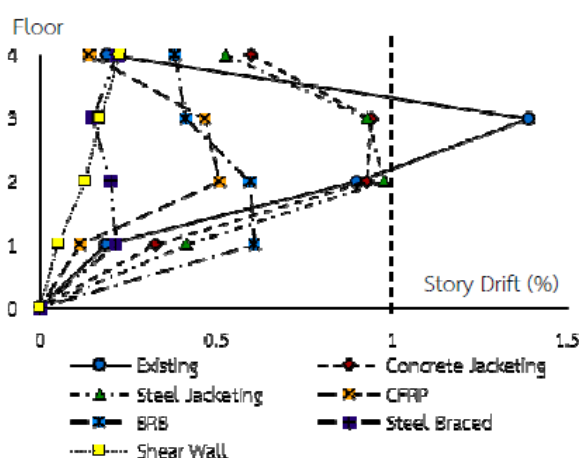
3.4 ศึกษาวิธีการเสริมกำลังให้กับอาคารที่สามารถดำเนินการได้ในประเทศไทย โดยมุ่งเน้นที่การเสริมกำลังที่มีการศึกษามาแล้วในอดีต และมีความสามารถเพิ่มความต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารได้จริง

3.5 คัดเลือกวิธีการเสริมกำลังให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process; AHP) ในการเลือกวิธีการเสริมกำลังอาคารที่เหมาะสมที่สุดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

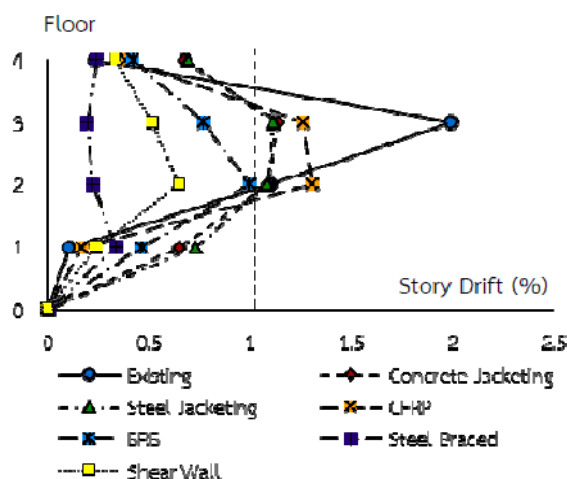
4. ผลการวิจัย

4.1 การศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูล พบว่าผู้วิจัยได้คัดเลือกวิธีการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับอาคารต้นแบบที่ศึกษาตามมาตรฐาน มยผ.1303-57 [2] จำนวน 6 วิธี คือ 1) การพอกด้วยคอนกรีต, 2) การพอกด้วยแผ่นเหล็ก, 3) การพอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP), 4) การใช้ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ (BRB), 5) การใช้ค้ำยันแกนแรงเหล็ก, และ 6) การใช้กำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือน เป้าหมายในการเสริมกำลังในครั้งนี้คือการเสริมความแข็งแรงอาคารตามข้อกำหนดของ มยผ.1303-57 ซึ่งในที่นี้กำหนดให้อาคารที่เสริมกำลังแล้วมีระดับความเสียหายไม่เกิน Immediate Occupancy (IO) โดยพิจารณาได้จากค่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้น (Story Drift) ต้องไม่เกินร้อยละ 1 ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตทิศทางตามขวางและทิศทางตามยาว ตามวิธีการดังกล่าวได้ดังแสดงในรูปที่ 7-8



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น (ทิศทางตามขวาง)



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น (ทิศทางตามยาว)

จากรูปที่ 7 พบว่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีการต่าง ๆ นั้นมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีระดับความเสียหายไม่เกินระดับ IO ตามเป้าหมายที่กำหนด จากรูปที่ 8 พบว่าค่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีพอกด้วยคอนกรีต วิธีพอกด้วยแผ่นเหล็ก และวิธีพอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่ามากกว่าร้อยละ 1 สำหรับวิธีการค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ การค้ำยันด้วยแกนแรงเหล็ก และวิธีกำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือนมีค่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารน้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีระดับความเสียหายไม่เกินระดับ IO ตามเป้าหมายที่กำหนด

4.2 การเลือกวิธีการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ผลสามารถพิจารณาได้โดยการประยุกต์ใช้วิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สามารถใช้ในการวิเคราะห์ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้อย่างเหมาะสมมีเหตุผลที่สอดคล้องกัน ปัจจัยที่พิจารณาเกี่ยวกับการเสริมกำลังอาคาร [14] สามารถแสดงได้ดังนี้

- C1 ค่าติดตั้ง
- C2 ค่าบำรุงรักษา
- C3 ระยะเวลาที่ใช้หรือขีดขวางการใช้ประโยชน์
- C4 ความเหมาะสมใช้งานได้
- C5 ช่างชำนาญงานหรือระดับเทคโนโลยีที่ต้องใช้

- C6 มีผลกระทบต่อฐานราก
C7 ประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง
C8 ผลกระทบ ความเสี่ยงต่อความเสียหาย

เมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆแล้วสามารถวิเคราะห์ขนาดค่าน้ำหนักความสำคัญหรือความชอบโดยการเปรียบเทียบปัจจัยที่ละคู่ (Pairwise Comparison) โดยแบ่งระดับความสำคัญหรือความชอบ (AHP Measurement Scale) ออกเป็น 9 ระดับ [15] ได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดระดับความสำคัญของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ระดับความสำคัญ	ค่าแสดงเป็นตัวเลข
เท่ากัน	1
เท่ากันถึงปานกลาง	2
ปานกลาง	3
ปานกลางถึงค่อนข้างมาก	4
ค่อนข้างมาก	5
ค่อนข้างมากถึงมากกว่า	6
มากกว่า	7
มากกว่าถึงมากที่สุด	8
มากที่สุด	9

การวิจัยนี้ใช้ผู้ประเมินการตัดสินใจคัดเลือกวิธีการเสริมกำลังให้กับอาคารจำนวน 4 ท่าน ซึ่งเป็นผู้ที่มีประสบการณ์และมีความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับงานก่อสร้าง โดยคัดเลือกมาจากตัวแทนกลุ่มอาชีพดังนี้คือ

- 1) วิศวกรออกแบบ หมายถึง วิศวกรผู้มีความเชี่ยวชาญในการออกแบบอาคาร และมีความรู้เกี่ยวกับมาตรฐานการออกแบบอาคารด้านแรงแผ่นดินไหวเป็นอย่างดี ประสบการณ์ด้านการออกแบบอาคารไม่น้อยกว่า 10 ปี
- 2) สถาปนิกออกแบบ หมายถึง สถาปนิกผู้มีความเชี่ยวชาญในการออกแบบอาคาร ประสบการณ์ด้านการออกแบบอาคารไม่น้อยกว่า 10 ปี
- 3) ตัวแทนผู้รับเหมา หมายถึง วิศวกรตัวแทนจากบริษัทรับเหมาก่อสร้างที่มีความเชี่ยวชาญในการคุมงานก่อสร้าง ประสบการณ์ด้านการออกแบบอาคารไม่น้อยกว่า 10 ปี
- 4) ตัวแทนเจ้าของโครงการ หมายถึง วิศวกรระดับบริหาร ตัวแทนเจ้าของโครงการ มีประสบการณ์ในการพัฒนางานทางด้านอสังหาริมทรัพย์มาแล้วไม่น้อยกว่า 10 ปี

จากการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังอาคารจำนวน 8 ปัจจัยซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์เปรียบเทียบ

ขนาด 8x8 ดังนั้นต้องใช้ค่า $CR \leq 10\%$ ความสอดคล้องของข้อมูลจึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [16] ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเสริมกำลังอาคารสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยจากการถ่วงน้ำหนัก

ลำดับ	วิศวกรออกแบบ	สถาปนิกออกแบบ	ตัวแทนผู้รับเหมา	ตัวแทนเจ้าของโครงการ
1	C7, 37.30%	C4, 32.58%	C7, 31.33%	C7, 32.93%
2	C6, 22.10%	C7, 23.42%	C1, 23.34%	C4, 22.56%
3	C5, 13.17%	C8, 16.35%	C4, 16.15%	C1, 17.50%
4	C4, 9.98%	C5, 10.05%	C6, 10.61%	C3, 9.80%
5	C3, 6.18%	C3, 6.83%	C5, 7.27%	C5, 5.81%
6	C1, 4.76%	C1, 4.42%	C3, 5.09%	C6, 4.76%
7	C8, 3.81%	C6, 3.70%	C8, 3.70%	C8, 4.32%
8	C2, 2.69%	C2, 2.65%	C2, 2.51%	C2, 2.33%
CR	7.83	3.33	3.58	8.47

จากตาราง 2 พบว่าเมื่อพิจารณาลำดับความสำคัญของผู้ประเมินทั้งหมดจะมีการเรียงลำดับไว้แตกต่างกันพอสมควร ปัจจัยที่มีลำดับสำคัญสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด คือ C7 ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังของอาคาร ซึ่งพบว่าผู้ประเมินมีความคิดเห็นที่ตรงกันโดยเรียงลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

จากแนวทางการเสริมกำลังอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวทั้งหมด 6 วิธีซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

- A = การพอกด้วยคอนกรีต
B = การพอกด้วยแผ่นเหล็ก
C = การพอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน
D = การค้ำยันด้วยวัสดุไร้การโก่งเดาะ
E = การค้ำยันด้วยแกนเหล็ก
F = การใช้กำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือน

เมื่อดำเนินการวิเคราะห์ทางเลือกสำหรับการเสริมกำลังอาคารที่ดีที่สุดด้วยวิธี AHP ตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ ทำให้สามารถพิจารณาลำดับความสำคัญของวิธีการเสริมกำลังดังกล่าวด้วยการเปรียบเทียบรายคู่ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์เปรียบเทียบขนาด 6x6 โดยมีค่าสัดส่วนความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ($CR \leq 10\%$) ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3 ปัจจัยด้านค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการติดตั้ง (C1)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	38.38	36.94	36.11	22.18
B	27.16	23.99	28.44	15.15
C	13.54	16.63	15.54	5.79
D	6.66	6.44	5.98	11.75
E	10.09	5.00	4.63	9.24
F	4.17	10.99	9.30	35.89
CR (%)	7.74	5.86	9.76	6.11

ตารางที่ 4 ปัจจัยด้านค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษา

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	7.70	8.21	32.65	6.24
B	32.39	33.96	21.88	15.24
C	10.34	12.51	8.94	10.14
D	18.26	22.12	16.79	33.52
E	26.53	17.17	13.71	29.37
F	4.78	6.03	6.03	5.49
CR (%)	9.70	8.67	7.91	9.26

ตารางที่ 5 ปัจจัยด้านระยะเวลาที่ใช้หรือขีดขวางการใช้ประโยชน์ (C3)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	24.60	18.25	24.06	22.77
B	17.05	11.48	11.29	11.95
C	11.75	10.14	6.93	7.66
D	5.33	4.63	5.07	5.72
E	5.33	4.89	3.96	4.20
F	35.94	50.60	48.69	47.70
CR (%)	6.93	9.14	7.12	9.80

ตารางที่ 6 ปัจจัยด้านความเหมาะสมใช้งานได้ (C4)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	34.45	36.60	34.78	32.52
B	17.99	16.74	18.69	17.42
C	23.79	21.84	25.06	26.65
D	9.64	10.96	9.51	10.96
E	7.71	8.84	7.70	8.59
F	6.42	5.02	4.26	3.86
CR (%)	8.69	9.89	9.61	9.42

ตารางที่ 7 ปัจจัยด้านช่างชำนาญงานหรือระดับเทคโนโลยีที่ต้องใช้ (C5)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	6.47	5.38	5.15	5.16
B	8.90	11.28	13.56	9.98
C	21.71	30.76	32.15	20.09
D	35.65	29.80	27.56	31.92
E	14.97	14.99	12.59	9.72
F	12.31	7.78	8.99	23.14
CR (%)	5.41	6.17	5.92	5.39

ตารางที่ 8 ปัจจัยด้านมีผลกระทบต่อฐานราก (C6)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	22.68	18.78	18.85	16.47
B	10.76	11.58	11.70	11.67
C	4.10	4.38	3.70	4.93
D	8.27	9.75	9.41	9.65
E	6.48	7.80	7.45	7.56
F	47.71	47.71	48.89	49.73
CR (%)	7.78	7.84	7.69	5.51

ตารางที่ 9 ปัจจัยด้านประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง (C7)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	5.38	4.31	4.96	4.59
B	4.16	6.15	4.02	3.52
C	9.66	9.48	9.30	8.58
D	21.12	20.45	20.03	16.50
E	17.12	17.01	16.56	19.99
F	42.55	42.60	45.13	46.81
CR (%)	5.73	8.45	8.51	7.53

ตารางที่ 10 ปัจจัยด้านผลกระทบและความเสี่ยงต่อความเสียหาย (C8)

ลำดับ	วิศวกร ออกแบบ (%)	สถาปนิก ออกแบบ (%)	ตัวแทน ผู้รับเหมา (%)	ตัวแทน เจ้าของ โครงการ (%)
A	33.81	34.92	34.35	38.11
B	26.68	25.40	27.04	26.29
C	16.62	16.61	15.71	15.65
D	7.25	6.86	6.80	5.99
E	5.63	5.34	5.28	4.64
F	10.01	10.87	10.81	9.31
CR (%)	6.33	7.88	9.13	9.64

จากตาราง 3-10 พบว่าแต่ละปัจจัยที่พิจารณามีค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีการเสริมกำลังอาคารที่มีค่าสูงสุดดังนี้ คือ วิธี A สำหรับปัจจัยด้านค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการติดตั้ง (C1), วิธี B สำหรับปัจจัยด้านค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำรุงรักษา (C2), วิธี F สำหรับปัจจัยด้านระยะเวลาที่ใช้หรือขีดขวางการใช้ประโยชน์ (C3), วิธี A สำหรับปัจจัยด้านความเหมาะสมใช้งานได้ (C4), วิธี D สำหรับปัจจัยด้านช่างชำนาญงานหรือระดับเทคโนโลยีที่ต้องใช้ (C5), วิธี F สำหรับปัจจัยด้านมีผลรบกวนต่อฐานราก (C6), วิธี F สำหรับปัจจัยด้านประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง (C7), และวิธี A สำหรับปัจจัยด้านผลกระทบและความเสี่ยงต่อความเสียหาย (C8) ตามลำดับ

การวิเคราะห์เปรียบเทียบลำดับความสำคัญของวิธีการเสริมกำลังอาคารภายใต้ปัจจัยที่กำหนดแล้ว สามารถนำค่าลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยคูณกับค่าลำดับความสำคัญของแต่ละวิธีการเสริมกำลังอาคารทำให้ทราบค่าลำดับความสำคัญในภาพรวมซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าวิธีการเสริมกำลังอาคารด้วยวิธีใดเหมาะสมที่สุด ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 11-14

ตารางที่ 11 ลำดับความสำคัญโดยวิศวกรออกแบบ

ปัจจัย	ลำดับความสำคัญของวิธีเสริมกำลังรวม						Priority
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	
C1	1.83	1.29	0.65	0.32	0.48	0.20	4.76
C2	0.21	0.87	0.28	0.49	0.71	0.13	2.69
C3	1.52	1.05	0.73	0.33	0.33	2.22	6.18
C4	3.44	1.79	2.37	0.96	0.77	0.64	9.98
C5	0.68	1.31	2.65	4.20	1.28	3.05	13.17
C6	5.01	2.38	0.91	1.83	1.43	10.54	22.10
C7	2.01	1.55	3.60	7.88	6.39	15.87	37.30
C8	1.29	1.02	0.63	0.28	0.21	0.38	3.81
Priority	15.98	11.28	11.81	16.29	11.61	*33.03	100.00

ตารางที่ 12 ลำดับความสำคัญโดยสถาปนิกออกแบบ

ปัจจัย	ลำดับความสำคัญของวิธีเสริมกำลังรวม						Priority
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	
C1	1.76	1.14	0.79	0.31	0.24	0.52	4.76
C2	0.22	0.92	0.34	0.60	0.46	0.16	2.69
C3	1.13	0.71	0.63	0.29	0.30	3.13	6.18
C4	3.65	1.67	2.18	1.09	0.88	0.50	9.98
C5	0.71	1.49	4.05	3.93	1.98	1.03	13.17
C6	4.15	2.56	0.97	2.15	1.72	10.54	22.10
C7	1.61	2.29	3.54	7.63	6.35	15.89	37.30
C8	1.33	0.97	0.63	0.26	0.20	0.41	3.81
Priority	14.56	11.74	13.13	16.25	12.13	*32.19	100.00

ตารางที่ 13 ลำดับความสำคัญโดยตัวแทนผู้รับเหมา

ปัจจัย	ลำดับความสำคัญของวิธีเสริมกำลังรวม						Priority
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	
C1	1.72	1.36	0.74	0.28	0.22	0.44	4.76
C2	0.88	0.59	0.24	0.45	0.37	0.16	2.69
C3	1.49	0.70	0.43	0.31	0.24	3.01	6.18
C4	3.47	1.86	2.50	0.95	0.77	0.43	9.98
C5	0.68	1.79	4.24	3.63	1.66	1.18	13.17
C6	4.17	2.59	0.82	2.08	1.55	10.80	22.10
C7	1.85	1.50	3.47	7.47	6.18	16.83	37.30
C8	1.31	1.03	0.60	0.26	0.20	0.41	3.81
Priority	15.56	11.41	13.03	15.44	11.29	*33.27	100.00

ตารางที่ 14 ลำดับความสำคัญโดยตัวแทนเจ้าของโครงการ

ปัจจัย	ลำดับความสำคัญของวิธีเสริมกำลังรวม						Priority
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)	
C1	1.06	0.72	0.28	0.56	0.44	1.71	4.76
C2	0.17	0.41	0.27	0.90	0.79	0.15	2.69
C3	1.41	0.74	0.47	0.35	0.26	2.95	6.18
C4	3.24	1.74	2.66	1.09	0.86	0.39	9.98
C5	0.68	1.31	2.65	4.20	1.28	3.05	13.17
C6	3.64	2.58	1.09	2.13	1.67	10.99	22.10
C7	1.71	1.31	3.20	6.15	7.46	17.46	37.30
C8	1.45	1.00	0.60	0.23	0.18	0.36	3.81
Priority	13.36	9.82	11.22	15.63	12.93	*37.04	100.00

จากตาราง 11-14 พบว่าผลการประเมินโดยผู้ประเมินทั้ง 4 ท่านได้ผลออกมาตรงกันเมื่อพิจารณาค่าลำดับความสำคัญรวมที่มีค่าสูงสุดสำหรับวิธีการเสริมกำลังแบบต่างๆดังนี้ คือ การเสริมกำลังอาคารตัวอย่างในการวิจัยนี้ด้วยการใช้ผนังคอนกรีตรับแรงเฉือน (Shear Wall) เป็นวิธีการเสริมกำลังอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้เหมาะสมที่สุด

5. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาการประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารต้นแบบนี้ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการวิบัติของอาคาร ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอาคารเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดต่อพลาสติก (Plastic Hinge) ของเสา ดังนั้นการเสริมกำลังอาคารจึงมุ่งเน้นไปที่ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติดังกล่าว ถึงแม้วิธีการเสริมกำลังอาคารสามารถทำได้หลายวิธีก็ตามเมื่อพิจารณาจากระดับความสำคัญของปัจจัยในการเสริมกำลังอาคารจึงทำให้สามารถเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดได้ ในที่นี้คือ วิธีการใช้ผนังคอนกรีตรับแรงเฉือน (Shear Wall) ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของกรพล สายเชื้อ และคณะ [13] ซึ่งพบว่าควรเสริมกำลังอาคารด้วยค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ (BRB)

นอกจากนี้การเตรียมพร้อมรับมือเหตุการณ์แผ่นดินไหววิธีหนึ่งคือการปฏิบัติตนที่ถูกต้อง โดยการทำตามคู่มือการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว [17] เพื่อการลดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินที่อาจเกิดขึ้น

6. สรุปผลการวิจัย

6.1 การศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว

จากการค้นคว้าข้อมูลผู้วิจัยเลือกวิธีเสริมกำลังอาคารที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับอาคารต้นแบบที่ศึกษา จำนวน 6 วิธี คือ 1) การพอกด้วยคอนกรีต, 2) การพอกด้วยแผ่นเหล็ก, 3) การพอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน, 4) การใช้ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ, 5) การใช้ค้ำยันแกนแรงเหล็ก, และ 6) การใช้กำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือน กรณีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามขวางของอาคาร พบว่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีการต่าง ๆ นั้นมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีระดับความเสียหายไม่เกินระดับ IO ตามเป้าหมายที่กำหนด สำหรับกรณีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวของอาคาร พบว่าค่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารภายหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีพอกด้วยคอนกรีต วิธีพอกด้วยแผ่นเหล็ก และวิธีพอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่ามากกว่าร้อยละ 1 สำหรับวิธีการค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ การค้ำยันด้วยแกนแรงเหล็ก และวิธีกำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือนมีค่าการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารน้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีระดับความเสียหายไม่เกินระดับ IO ตามเป้าหมายที่กำหนด

6.2 สรุปผลการเลือกวิธีการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสม

การเสริมกำลังอาคารตัวอย่างในการวิจัยนี้ด้วยการใช้ผนังคอนกรีตรับแรงเฉือน (Shear Wall) เป็นวิธีการเสริมกำลังอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้เหมาะสมที่สุด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อมร พิมานมาศ, “ประเทศไทยเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวและสึนามิแค่ไหนและจะรับมืออย่างไร,” พิมพ์ครั้งที่ 1, สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธรมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2555, หน้า iii.
- [2] กรมโยธาธิการและผังเมือง, “มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ.1303-57,” พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2557, หน้า i-ii.
- [3] นเรฐ พันธราธร, “แผ่นดินไหวและหลักคิดในการออกแบบอาคารต้านแรงแผ่นดินไหว,” RSU JET Vol. 16, No. 1, 2013, หน้า 35.
- [4] เจนศักดิ์ คชนิล, 2557, “การออกแบบอาคารเรียนในเขตเสี่ยงภัยต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือของประเทศไทย: กรณีศึกษาแบบอาคารเรียน สปข. 105/29”, วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, เดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2557, หน้า 57-74.
- [5] Amnart Khampanit, Sutat Leelatawivat, Jensak Kochanin, and Pennung Warnitchai, “Energy-based seismic strengthening design of non-ductile reinforced concrete frames using buckling-restrained braces”, Engineering Structures Journal, Vol81, 2004, pp 110-122.
- [6] เจนศักดิ์ คชนิล, “การประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดาในเขตภาคเหนือของประเทศไทย: กรณีศึกษาแบบอาคารเรียนมาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน,”วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์, ปีที่ 9, ฉบับพิเศษ 2, เดือนสิงหาคม-กันยายน 2557, หน้า 431-450.
- [7] พิพัฒน์ อิมออบ, “การประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ

- วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2545, หน้า 5.
- [8] Applied Technology Council (ATC-40), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," Vol. 1-2, California, 1996, pp. 8-6.
- [9] A K Chopra, "Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering," 3rd Ed, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2007, pp. 207-216.
- [10] V. Boonyapinyo, N. Choopool and P. Warnitchai "Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Buildings by Static Pushover and Nonlinear Dynamic Analyses," The 14Th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008, pp. 5-6.
- [11] M K. Rahman et al., "Nonlinear static pushover analysis of an eight story RC frame-shear wall building in Saudi Arabia," Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012, pp. 7.
- [12] J. Pincheira, and J. Jirsa, "Seismic Response of RC Frames Retrofitted with Steel Braces or Walls," J. Struct. Eng., 121(8), 1995, pp. 1225-1235.
- [13] กรพล สายเชื้อ และคณะ, "การตัดสินใจหลายตัวแปรในการคัดเลือกวิธีเสริมกำลังอาคารเรียนด้านทานแรงแผ่นดินไหวในเทศบาลนครเชียงใหม่," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่, 8-10 พ.ค. 2556, หน้า App-12.
- [14] C. Nicola, I. Iunio, M. Gaetano and C. Edoardo, "Multi Criteria Decision Making for Seismic Retrofitting of RC Structure," Journal of Earthquake Engineering, 2008, pp. 12:555-583.
- [15] T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process," The Mc Graw Hill, New York, 1980.
- [16] วิฑูรย์ ตันศิริคงคล, "AHP กระบวนการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก," พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัทกราฟิค แอนด์ ปริ้นติ้ง เซ็นเตอร์ จำกัด, 2542.
- [17] เจนศักดิ์ คชนิล และยมลภัทร ภัทรคุปต์, "การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและการจัดทำคู่มือเตรียมความพร้อมรับมือเหตุการณ์แผ่นดินไหวกรณีศึกษา: อาคารเรียนตามแบบมาตรฐานในเขตภาคเหนือของประเทศ", การประชุมวิชาการและการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, วันที่ 3-4 ธันวาคม 2557.