



การเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยของค้ำอาคารยัดตั้งไร้การโก่งเดาะ ไพบูลย์ ปัญญาคะโป¹ และปฐิพงษ์ พลพิมลพัฒน์^{2*}

Strengthening of Reinforced Concrete School Building with Buckling Restrained Brace

Phaiboon Panyakapo¹ and Puripong Ponpimonpat^{2*}

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

^{1,2}School of Engineering, Sripatum University

* Corresponding author, E-mail address: b_benz_d@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยของค้ำอาคารยัดตั้งไร้การโก่งเดาะ ในการศึกษาเลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นซึ่งเป็นอาคารเรียนในสังกัดกระทรวงศึกษาธิการเพื่อใช้เป็นอาคารต้นแบบในการประเมินกำลังโครงสร้างอาคาร ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงอินอีลาสติกของโครงสร้างแบบหน้าต่างไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D และวิเคราะห์โดยวิธีการล็กแบบสถิตไม่เชิงเส้นแบบ 3 มิติ และด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวบริเวณพื้นที่จังหวัดแพร่ เพื่อประเมินระดับความเสียหายและรูปแบบความเสียหายของโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์พบว่า สำหรับโครงสร้างอาคารเดิม ผนังก่ออิฐโดยรอบอาคารและเสาคอนกรีตบริเวณขอบอาคาร เกิดการแตกร้าว โดยค่าความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เสาบริเวณปลายบนและล่างที่จุดต่อเสาและคาน มีค่าสูงเกินกว่าข้อกำหนด หลังการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารด้วยวิธีของค้ำอาคารยัดตั้งไร้การโก่งเดาะบริเวณขอบอาคาร ผลการศึกษาไม่พบความเสียหายของเสาอาคาร และค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นอาคารมีค่าไม่เกินข้อกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ

คำสำคัญ: ของค้ำอาคารยัดตั้งไร้การโก่งเดาะ เสริมกำลังโครงสร้าง วิธีการล็กแบบสถิตไม่เชิงเส้นแบบ 3 มิติ วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นต้านทานแผ่นดินไหว

Abstract

This research presents the strengthening of reinforced concrete school building with buckling restrained brace. In this study, 3-storey reinforced concrete school building, which is a standard type of the Ministry of Education, was selected as the prototype building. In the seismic evaluation, the structure was modeled as fiber section to represent the inelastic behavior by using PERFORM-3D. Nonlinear static analysis and nonlinear dynamic analysis were performed for Phrae provinces, to investigate the seismic damage of the structure. For the existing building, it was found that, the infill wall and concrete column were cracked around the edge of building. The strains of the concrete and reinforcing steel of column at the beam-column joint were higher than their strain capacities. After the strengthening of reinforced concrete school building with buckling restrained brace around the edge of building, there was no damage at the column, and the inter-story drifts were within the allowable limit according to the design standard.

Keywords: buckling restrained brace, strengthening of structure, nonlinear dynamic analysis, nonlinear static analysis.

บทนำ

โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ที่ไม่ได้มีการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว มีความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหว

เนื่องจากโครงสร้างอาคารอาจไม่ได้มีการออกแบบให้มีค่ากำลังและสติฟเนสในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างได้อย่างเพียงพอ รวมทั้งองค์อาคารของเสาและคาน ไม่ได้มีการออกแบบรายละเอียดการเสริมเหล็กให้มี

ความเหนียวในการต้านทานแรงกระทำแบบไป-กลับได้ ลักษณะของโครงสร้างอาคารดังกล่าวนี้มีอยู่เป็นจำนวนมากในปัจจุบัน หากได้มีการออกแบบเสริมกำลังป้องกันไว้ก่อน ก็จะสามารถลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในด้านของชีวิตและทรัพย์สินเป็นอันมาก

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา บริบูรณ์ สัมพันธ์เจริญ, ไพบุลย์ ปัญญาตะโป (2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโครงสร้างด้วยของค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrained Brace, BRB) เป็นอาคารโรงเรียนซึ่งก่อสร้างตามแบบมาตรฐานกระทรวงศึกษาธิการสูง 4 ชั้น ระบบคาน-เสา ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว จากผลการวิเคราะห์พบว่าหลังจากเสริมกำลังแล้วไม่พบการวิบัติเหล่านี้ ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยของค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะจึงอาจนำไปใช้กับอาคารตัวอย่างได้ Kim, & Choi (2004, pp. 693-706) ได้ศึกษาการตอบสนองแผ่นดินไหวของโครงสร้างเหล็กที่เสริมกำลังด้วยของค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ และได้พัฒนาขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองการเคลื่อนที่เป้าหมายที่กำหนด และการคำนวณหาค่าครากที่เหมาะสมของ BRB โดยการใช้ค่าอัตราส่วนการหน่วงเทียบเท่าสูงสุด (Damping Ratio) และได้มีการวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว (Nonlinear Time History Analysis) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างโดยทั่วไปลดลงเมื่อมีการเพิ่มสติเฟนของการยึดรั้ง นอกจากนี้การเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างที่ออกแบบสอดคล้องกับ ค่าระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) ที่กำหนด อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ และไพบุลย์ ปัญญาตะโป (2013) วิเคราะห์หาค่าลึงผนังอิฐก่อในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ ในการศึกษาเลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นซึ่งเป็นอาคารเรียนในสังกัดกระทรวงศึกษาธิการเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการประเมินกำลังผนังอิฐก่อ จากการจำลองแบบผนังของอาคารได้ ผนัง 3 รูปแบบได้แก่ ผนังทึบ ผนังช่องเปิดแบบประตู และผนังช่องเปิดแบบหน้าต่าง พบว่า ผนังที่มี

ช่องเปิด ให้ค่ากำลังที่ลดลงจากกรณีผนังทึบ เนื่องจากพื้นที่สัดส่วนของผนังลดลงด้วยพื้นที่ช่องเปิด

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการพิจารณาผลกระทบของผนังก่ออิฐที่มีส่วนในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว และยังไม่มีการประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารโรงเรียนที่เสริมกำลังโครงสร้างด้วยของค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ ที่อยู่ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงแผ่นดินไหวในเกณฑ์สูง ดังนั้น การศึกษาการเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาผลกระทบดังกล่าว สำหรับการประยุกต์ใช้การเสริมกำลังแบบนี้ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยจึงเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงได้นำข้อมูลอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโครงสร้างด้วยของค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ และข้อมูลของค่ากำลังของผนังทึบ และผนังที่มีช่องเปิด พร้อมทั้งนำข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 7 ชุด สำหรับพื้นที่จังหวัดแพร่ ทำการประเมินกำลังโครงสร้างอาคาร โดยการจำลองพฤติกรรมการรับแรงอินลาสติกของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D เพิ่มเติมการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของผนังก่ออิฐในโครงอาคาร (Infill wall) ด้วยแบบจำลอง Strut and tie model และวิเคราะห์พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารด้วยวิธีการผลึกอาคารตามโหมด (Modal Pushover Analysis) เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว (Nonlinear Time History Analysis) ต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก และประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอาคารเรียนเดิม
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารหลังจากที่เสริมกำลังโครงสร้าง โดยใช้ของค้ำอาคารรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrained Braces, BRB)



ขอบเขตของงานวิจัย

1. อาคารในการศึกษานี้เป็นโรงเรียนในสังกัดกระทรวงศึกษาธิการสูง 3 ชั้น โครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กระบบคาน-เสา ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

2. ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของคานและเสาบริเวณข้อหมุนพลาสติกแบบหน้าตัดไฟเบอร์ และจำลองพฤติกรรมการรับแรงของผนังก่ออิฐในโครงอาคาร (Infill wall) ด้วยแบบจำลอง Strut and tie model

3. วิเคราะห์พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารด้วยวิธีการผลักอาคารตามโหมด (Modal Pushover Analysis)

4. วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบ 3 มิติ โดยใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 7 ชุด สำหรับพื้นที่จังหวัดแพร่

5. วิเคราะห์หาความเสียหายในระดับชั้นอาคาร

6. เสริมกำลังโครงสร้างด้วยองค์อาคารเรียงยึดไว้การ

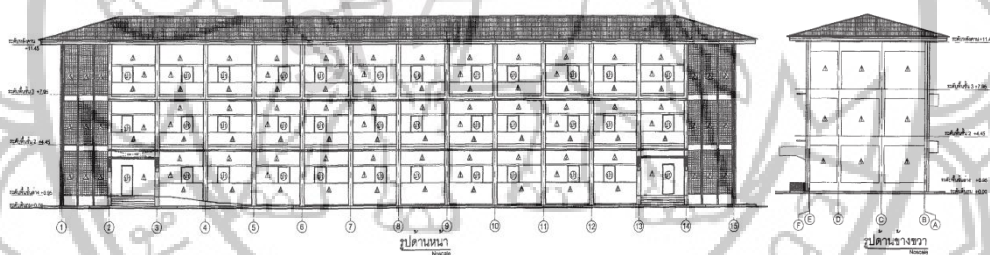
โก่งเดาะ และวิเคราะห์ตรวจสอบค่า Demand-Capacity Ratio ของโครงสร้าง โดยใช้ผลค่าเฉลี่ยของคลื่นแผ่นดินไหวในการตรวจสอบระดับสมรรถนะของโครงสร้าง

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Methods)

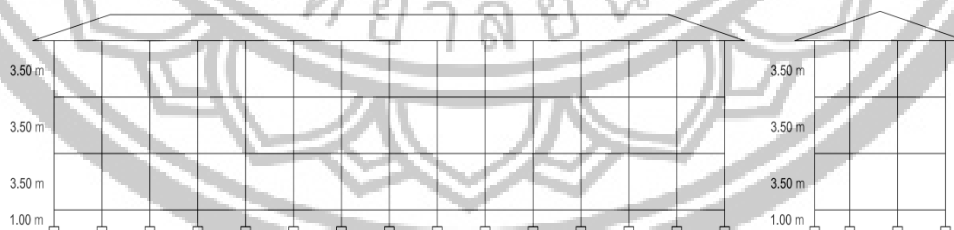
การประเมินกำลังโครงสร้างอาคาร

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PERFORM-3D

วิเคราะห์โครงสร้างก่อนและหลังเสริมกำลัง ดังแสดงรูปที่ 1



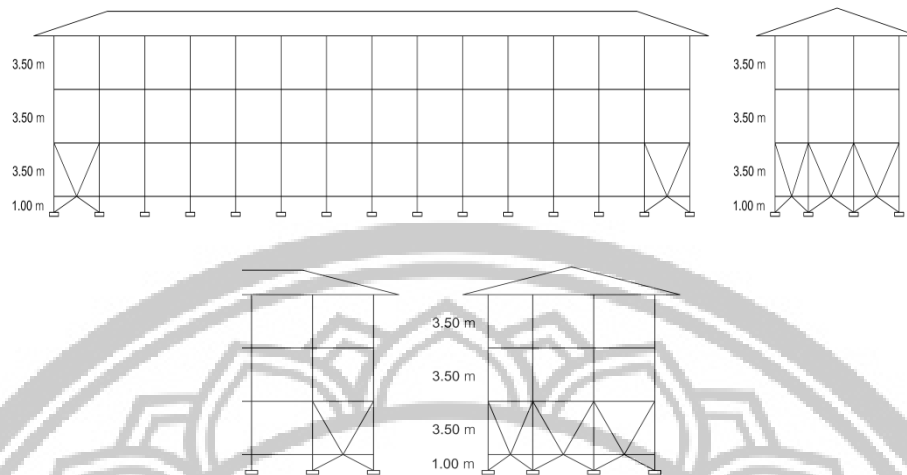
(ก) แบบอาคารโรงเรียน



(ข) แบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ อาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง

รูปที่ 1 (ก) แบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ (ข) แบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ อาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง

(ค) รูปแบบการเสริมกำลังด้วย BRB



(ค) รูปแบบการเสริมกำลังด้วย BRB

รูปที่ 1 (ต่อ)

การวิเคราะห์การผลักรูปอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้น โดยวิธี Modal Pushover Analysis

ขั้นตอนการวิเคราะห์การผลักรูปอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้นโดยวิธี Modal Pushover Analysis สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดย 1) คำนวณหาค่าระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) โดยวิธี Displacement Coefficient Method (ASCE/SEI 41-06, FEMA 356-2000) สำหรับแต่ละโหมด 2) ทำการผลักรูปอาคารไปในแต่ละโหมด ไปยังค่าระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย 3) ตรวจสอบค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของ

โครงสร้างแต่ละชั้น สำหรับการผลักในแต่ละโหมด โดยวัดสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ระดับ ได้แก่ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO), ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS), และระดับป้องกันการพังทลายโดยสิ้นเชิง (CP)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้คำนวณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย 3 ค่า เพื่อใช้สำหรับแต่ละค่าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ผลการคำนวณค่าระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement, δ_t) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายสำหรับแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงมากพื้นที่จังหวัดแพร่

Mode Shape	ทิศทางการผลักรูปอาคาร	ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (100% δ_t , cm)	ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (150% δ_t , cm)	ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (200% δ_t , cm)
1	H2 ตามขวาง	1.20	1.80	2.40
2	H1 ตามยาว	1.19	1.78	2.37

การวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วย คลื่นแผ่นดินไหว (Nonlinear Time History Analysis)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว (Time History Analysis) สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดย 1) ใช้คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับแต่ละค่าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว มาจำนวน 7 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 2 ทำการเปรียบเทียบด้วย

Scale Factor เพื่อให้ค่าเฉลี่ย Response Spectrum เทียบเท่ากับกราฟการออกแบบ Design Spectrum สำหรับพื้นที่จังหวัดแพร่ และวิเคราะห์โครงสร้าง ด้วยโปรแกรม PERFORM-3D 2) ตรวจสอบค่า Demand-Capacity Ratio ของโครงสร้าง โดยใช้ผลค่าเฉลี่ยของคลื่นแผ่นดินไหวในการตรวจสอบ



ตารางที่ 2 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์ของพื้นที่จังหวัดแพร่

CMS (0.75s)-Summary of Properties of Rotated & Scaled Horizontal Records							
Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rrup(km)	Vs30 (m/s)	ScaleFactor
Dinar- Turkey	1995	Dinar	6.4	Normal	3.4	219.8	1.353
Irpinia- Italy-01	1980	Mercato San Severino	6.9	Normal	29.8	350	2.9923
Mammoth Lakes-01	1980	Long Valley Dam	6.06	Normal Oblique	15.5	345.4	2.0341
Imperial Valley-06	1979	Delta	6.53	Strike-Slip	22	274.5	1.3935
Kobe- Japan	1995	Takarazuka	6.9	Strike-Slip	0.3	312	0.6121
Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	6.53	Strike-Slip	7.3	192.1	1.6154
Erzican- Turkey	1992	Erzincan	6.69	Strike-Slip	4.4	274.5	0.9791

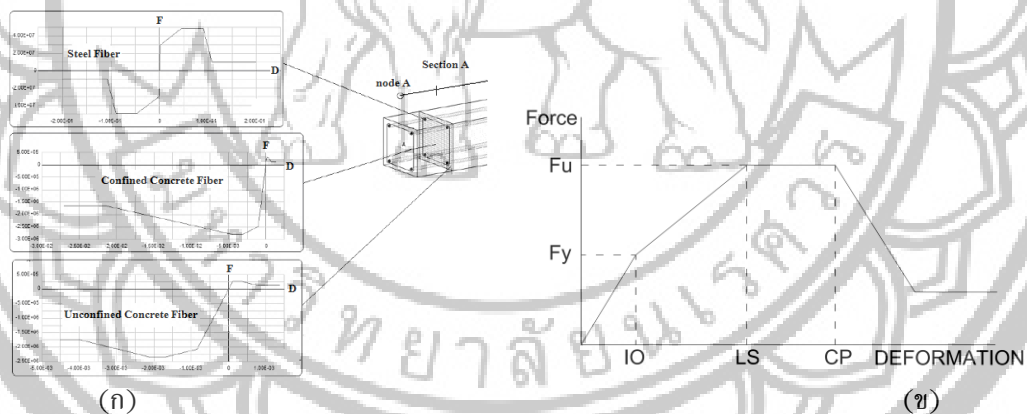
แบบจำลองโครงสร้าง

1 รูปตัดไฟเบอร์ (Fiber Section)

ส่วนประกอบนี้ใช้ในการจำลองพฤติกรรมอินอีลาสติก หลักการสำคัญของส่วนประกอบส่วนนี้คือการแบ่งหน้าตัดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่บริเวณปลายของอาคารออกเป็นส่วนๆ (ไฟเบอร์) ตามที่แสดงในรูปที่ 2 (ก) โดยรูปตัดไฟเบอร์ จะจำแนกได้เป็น 3 ประเภท

คือ 1) คอนกรีตหุ้มเหล็ก 2) แกนคอนกรีต และ 3) เหล็กเสริม

จากความสัมพันธ์ Force-Deformation ของคอนกรีตและเหล็กเสริม นำมาใช้วัดสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ระดับ ตามที่แสดงในรูปที่ 2 (ข) ได้แก่ ระดับใช้อาคารได้ทันที (IO), ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS), และระดับป้องกันการพังทลายโดยสิ้นเชิง (CP)



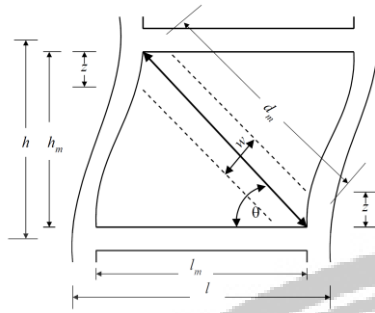
รูปที่ 2 (ก) พฤติกรรมของวัสดุในส่วนประกอบย่อยของหน้าตัดไฟเบอร์ (Fiber Section)

(ข) การวัดสมรรถนะของโครงสร้างจากความสัมพันธ์ Force-Deformation ของคอนกรีตและเหล็กเสริม

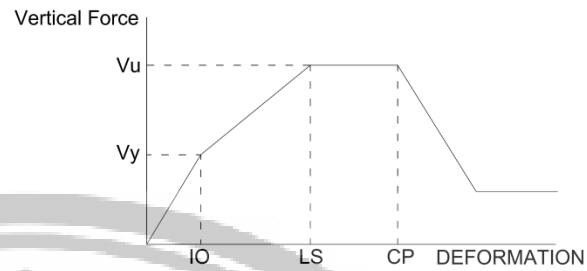
แบบจำลองโมเดลของพฤติกรรมผนังอิฐก่อในโครงเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็ก

การจำลองโมเดลของพฤติกรรมผนังอิฐก่อแบบโครงเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กใช้วิธี Strut and Tile Model ซึ่งรูปแบบพฤติกรรมของกราฟความสัมพันธ์ พฤติกรรม

ของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง มีลักษณะเกิดจากการค้ำยันจากผนังอิฐก่อ ซึ่งพฤติกรรมลักษณะนี้สามารถจำลองโดยใช้การค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut) มีลักษณะได้แสดงดังรูปที่ 3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 (ก) พฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง

(ข) การวัดสมรรถนะของ Equivalent Compression Strut - Deformation ของผนังอิฐก่อ

การคำนวณเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut) ดังสมการที่ 1

$$V_C = z t f'_m \cos \theta \quad (1)$$

เมื่อ z = ความยาวตามแนวตั้งระหว่างเสาและผนัง
 f'_m = กำลังรับแรงอัดของผนังปรีซึม
 θ = มุมในแนวแท่งของการคำนวณ
 t = ความหนาของผนังอิฐก่อ

$$\text{หาค่า } z = \left[\frac{E_m t \sin 2\theta}{4 E_c I_g h_m} \right]^{1/4} \quad (2)$$

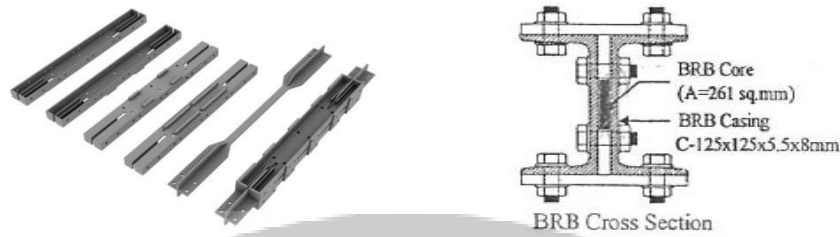
เมื่อ I_g = โมเมนต์ความเฉื่อยของเสา
 h_m = ความสูงของผนังอิฐก่อ
 E_m = โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอิฐก่อ
 E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่นของโครงสร้าง

การออกแบบของค่าการรั้งยึดไว้การโก่งเดาะ (Buckling restrained brace, BRB) นำไปใช้ในการออกแบบหาพื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก

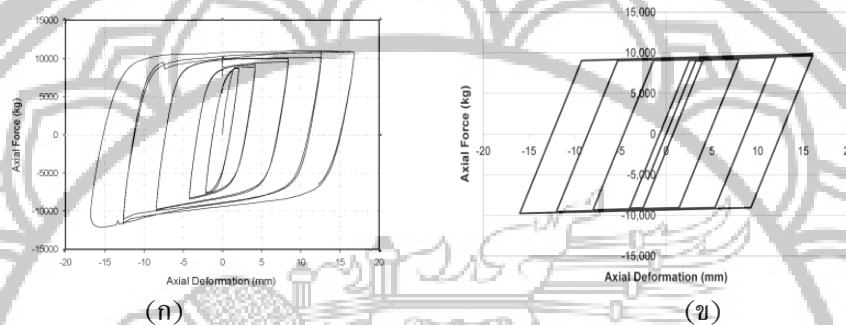
ในการออกแบบ BRB จะต้องกำหนดวางตำแหน่งหลักการออกแบบ BRB คือ การออกแบบให้ปลอกหุ้ม (Casing) มีกำลังสูงกว่ากำลังที่เกิดจากกำลังรับแรงสูงสุดของเหล็กแกน (Steel Core) ตามข้อกำหนดของ American Institute of Steel Construction Incorporation, 2005 กำลังรับแรงสูงสุดของเหล็กแกน, เพื่อหาค่าแรงแนวแกนของเหล็กแกนของ BRB เพื่อ P_{YSC} สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{YSC} = \phi F_{YSC} A_{SC} \quad (3)$$

เมื่อ ϕ = ตัวคูณกำลังส่วนเกิน มีค่า 1.7
 F_{YSC} = หน่วยแรงที่จุดคราก (Yield Stress)
 A_{SC} = พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก



รูปที่ 4 รูปแบบขององค์อาคารรับยึดไร้การโก่งเดาะ



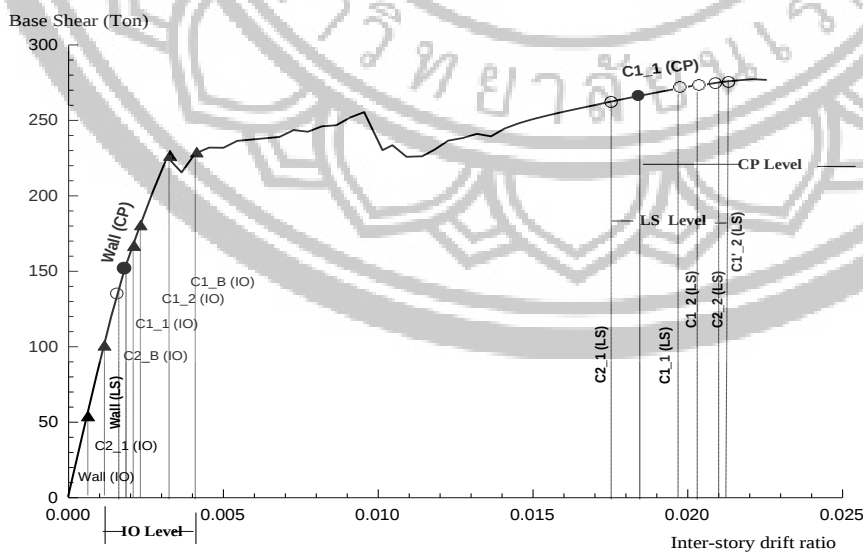
รูปที่ 5 พฤติกรรมภายใต้แรงวัฏจักร (Hysteretic behavior) (ก) จากผลการทดสอบ (ข) จากแบบจำลอง

ผลการศึกษา (Results)

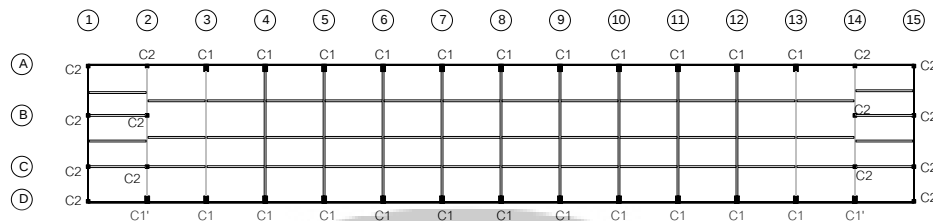
1. ความเสียหายของโครงสร้างจากการวิเคราะห์การผลักอาคาร

ผลการวิเคราะห์การผลักอาคารสำหรับแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงมาก (จ. แพร่) แสดงกราฟความสัมพันธ์

ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของยอดอาคาร แสดงเฉพาะสำหรับโหมดที่ 2 ผลักในทิศทางตามยาว ดังรูปที่ 6 เนื่องจาก การเคลื่อนที่ในโหมดนี้แสดงความเสียหายของโครงสร้างอาคารได้อย่างชัดเจน เนื่องจากสามลักษณะแบบชั้นอ่อน (Soft Story) สำหรับตำแหน่งเสาในผังอาคารแสดงในรูปที่ 7



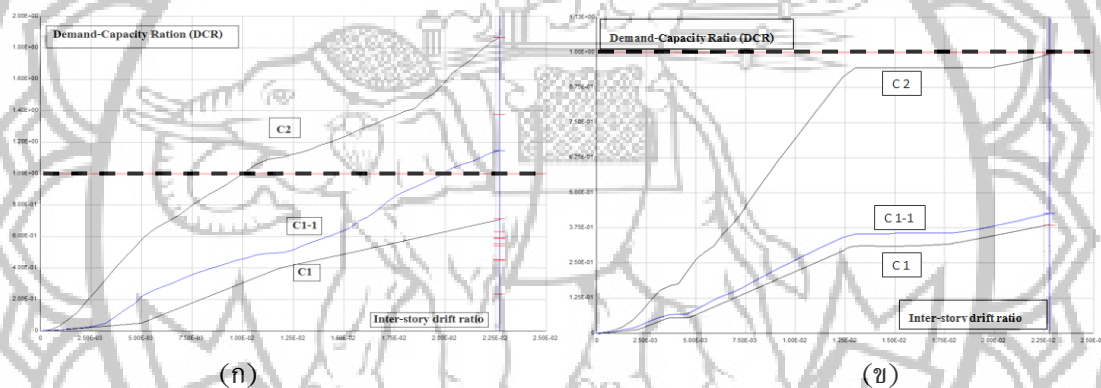
รูปที่ 6 การผลักอาคารโหมดที่ 2 (200% Target Displacement) สำหรับแผ่นดินไหวความรุนแรงมาก (จ. แพร่)



รูปที่ 7 ตำแหน่งของเสาในผังอาคาร

ความเสียหายเฉพาะที่เกิดจากการผลักอาคารโหมดที่ 2 (200% Target Displacement) สำหรับแผ่นดินไหวความรุนแรงมาก (จ. แพร่) ดังรูปที่ 8 ในช่วงนี้ค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของผนังอิฐและเสาอาคาร จัดอยู่ในสมรรถนะระดับที่ 2 คือ ระดับความ

ปลอดภัยต่อชีวิต (LS) พบว่า 1) เมื่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เท่ากับ 0.0017 พบว่า ผนังอิฐถึงจุดแตกประลัย 2) เมื่อโครงสร้างมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง 0.0175-0.022 เหล็กเสริมของเสา C1, C2, ในชั้นที่ล่างถึงชั้นที่สอง เริ่มถึงจุดประลัย



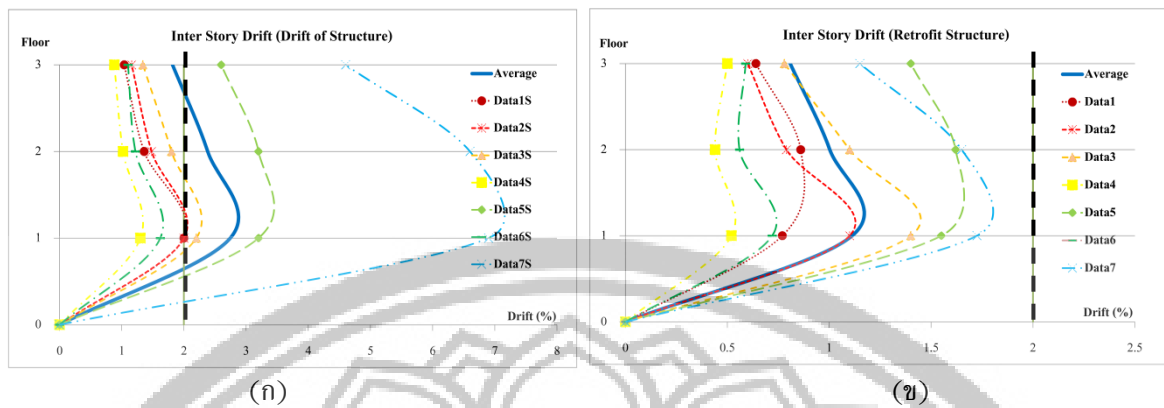
รูปที่ 8 ค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) การวิเคราะห์การผลักอาคารสำหรับทิศทางตามยาว (ก) ก่อนเสริมกำลัง หลังเสริม (ข) กำลังด้วยBRB

หลังจากเสริมกำลังด้วย BRB สมรรถนะของโครงสร้างเมื่อการเคลื่อนที่ไปเกินกว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในช่วงสมรรถนะความปลอดภัยต่อชีวิต (LS) Level ค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของเสาอาคารทั้งหมด มีค่าน้อยกว่า เส้นประและเมื่อการเคลื่อนที่ไปถึงค่าการผลักเป้าหมาย (DCR) ของเสามีค่าสูงสุด ที่เสา 0.95C- ดังนั้นโครงสร้างเสาของ 2

อาคาร มีความปลอดภัยสำหรับ สมรรถนะของโครงสร้างระดับความปลอดภัยต่อชีวิต LS

2. การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter-Story drift)

ผลการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นโดยคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 7 ชุด ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9

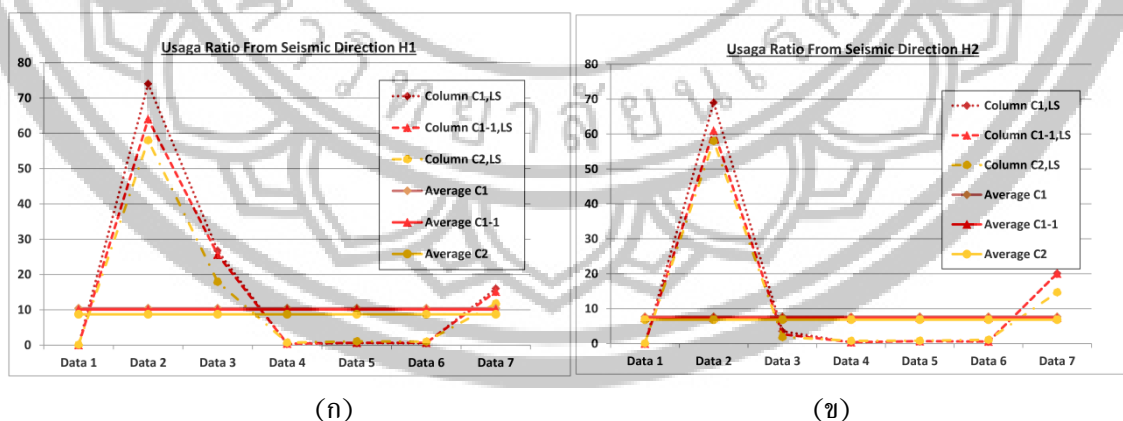


รูปที่ 9 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นอาคาร ก) ก่อนเสริมกำลัง ข) หลังเสริมกำลังด้วย BRB

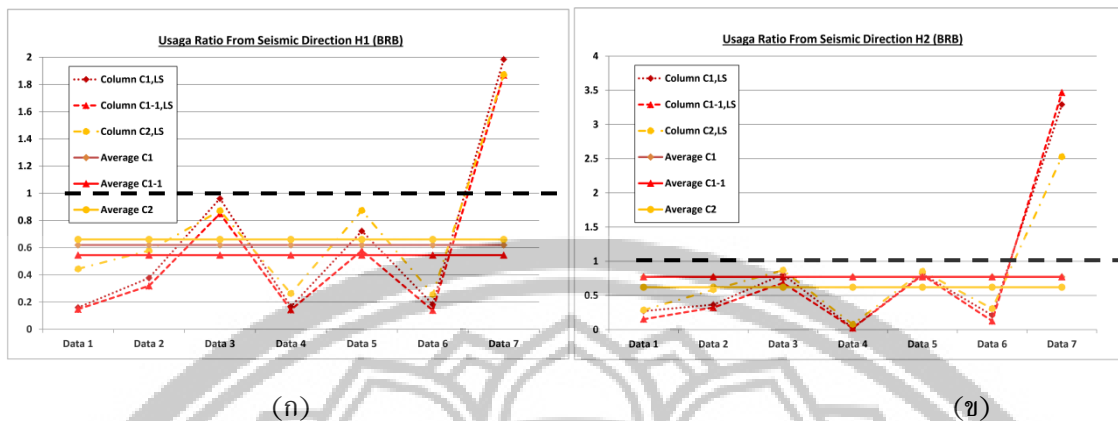
จากรูปที่ 9 พบว่าค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นอาคารสำหรับทิศทางตามยาว สำหรับคลื่นข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว ก่อนเสริมกำลังมีค่าเกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว คือ 2% หลังเสริมกำลังมีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เท่ากับ 1.2% บริเวณชั้นล่างของอาคาร และ 0.8% บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

3. ความเสียหายจากการวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว (Nonlinear Time History Analysis)

ผลการวิเคราะห์สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงมาก แสดงค่า (จ.แพร่) Demand-Capacity Ratio ของโครงสร้าง แสดงค่าสำหรับความปลอดภัยสำหรับ สมรรถนะของโครงสร้างระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS) สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว ในทิศทาง H1 ตามยาว มีค่าสูงสุดเฉลี่ย 7.5-10 และทิศทาง H2 ตามขวาง ค่าสูงสุดเฉลี่ย 7-8 แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) การวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว
(ก) สำหรับทิศทางตามขวาง (ข) สำหรับทิศทางตามยาว



รูปที่ 11 ค่า Demand-Capacity Ratio(DCR)การวิเคราะห์ตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหวหลังเสริมกำลังด้วย BRB (ก) สำหรับทิศทางตามขวาง (ข) สำหรับทิศทางตามยาว

หลังจากเสริมกำลังด้วย BRB แสดงค่าสำหรับความปลอดภัยสำหรับ สมรรถนะของโครงสร้างระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS) สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว ค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของเสาอาคารทั้งหมด มีค่าน้อยกว่า 1.0 เส้นประและ ในทิศทาง H1 ตามยาว ค่า DCR ของเสามีค่าสูงสุด 0.66 ที่เสา C2 เสริมอาคาร และในทิศทาง H2 ตามขวาง ค่า DCR ของเสามีค่าสูงสุด .077 ที่เสา C1' เสา Line 2-D และ Line 14-D ดังนั้นโครงสร้างเสาของอาคารมีความปลอดภัยสำหรับสมรรถนะของโครงสร้างระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS)

สรุปผลการศึกษา

1. โครงสร้างอาคารตัวอย่างก่อนเสริมกำลังมีโอกาสวิบัติเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว โดยในระดับชั้นอาคารเกิดการวิบัติแบบชั้นอ่อนที่ชั้นล่างทั้งแนวตามขวางและตามยาว เนื่องจากค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มีค่าเกินค่าที่ยอมให้ ส่วนในระดับของค้ำอาคาร เสาชั้นล่างและชั้นสองจากการวัดสมรรถนะของโครงสร้างด้วยค่า Demand-Capacity Ratio ของโครงสร้าง พบว่า อยู่ใน ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS)
2. เมื่อเสริมกำลังโครงสร้างอาคารตัวอย่างแล้ว โครงสร้างสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ โดยในระดับชั้นอาคารให้ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ไม่เกินค่าที่ยอมให้ ทำให้ไม่เกิดการวิบัติแบบชั้นอ่อน ส่วนในระดับ

ของค้ำอาคารไม่เกิดการวิบัติเฉพาะที่ ค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของเสาอาคารทั้งหมด มีค่าน้อยกว่า 1.0 จึงอาจสามารถใช้วิธีการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยของค้ำอาคารเรียงยึดไว้การโก่งเดาะกับอาคารตัวอย่างได้

เอกสารอ้างอิง

บริบูรณ์ สัมพันธุ์เจริญ และไพบูลย์ ปัญญาคะโป (2010). พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหว ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยของค้ำอาคารเรียงยึดไว้การโก่งเดาะการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (น. 499-504). เพชรบุรี: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และไพบูลย์ ปัญญาคะโป (2013). การเสริมกำลังผนังก่ออิฐสำหรับอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9 (น. 455-462). พิษณุโลก: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

American Institute of Steel Construction Incorporation. (2005). "ANSI/AISC 341-05: Seismic Provision for Structural Steel Building". Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction Incorporation.



- American Society of Civil Engineers. (2006). *"ASCE/SEI 41-06: Seismic Rehabilitation of Existing Buildings"*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *"FEMA 356-2000: Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings"*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Kim, J., & Choi, H. (2004). "Behavior and Design of Structure with Buckling-Restrained Brace". *Engineering Structure*, 26, 693-706.
- Matrin, S. (2007). *"Nonlinear modeling of gravity load designed reinforced concrete buildings for seismic performance evaluation"*. Master's thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- PERFORM-3D. (2011). *"Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D structure: Analysis Reference"*. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc.
- SeismoStruct User Manual 6.5 (2013). *SeismoStruct - A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*. Pavia Italy: Seismosoft.
- Sozen, M. A. (1981). *Review of earthquake response of RC building with a view to drift control*. Turkey: State of the art in earthquake engineering, Kelaynak Press.
- Tasnimi, A. A., & Mohebkah, A. (2011). Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings experimental and analytical approaches. *Engineering structure*, 33(3), 968-980.