การปรับปรุงโครงแกงแนงเหล็กเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวด้วยชิ้นส่วนแกงแนงแบบต่างๆ

Seismic Retrofitting of Steel Brace Frames Using Different Bracing Configurations

เอกพงศ์ วิริยะพาณิชย์ (Ekkaphong Wiriyaphanit)* ณัฐพงษ์ อารีมิตร (Natthapong Areemit)[1]**

(Received: *November 25, 2021*; Revised: *March 21, 2022*; Accepted: *March 23, 2022*)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารโครงสร้างเหล็กที่ไม่ได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวหรือถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวได้ตามมาตรฐานเก่า NBCC-1980 [1] ซึ่งอาคารดังกล่าวจะถือเป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหาย เมื่อประเมินด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ใช้ในมาตรฐาน NBCC-2015 [2] ในปัจจุบัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ทำการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารรวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้างเพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงกลุ่มอาคารดังกล่าว 3 รูปแบบประกอบด้วย การติดตั้งชิ้นส่วนแกงแนงรูปแบบตัววีคว่ำเพิ่มอีก 1 ช่วงเสา (Retrofit-A) การเพิ่มและปรับเปลี่ยนแนวชิ้นส่วนแกงแนง (Retrofit-B) และการเพิ่มขนาดของชิ้นส่วนแกงแนงเดิม (Retrofit-C) โดยใช้วิธีแรงกระทำทางด้านข้าง (Push-over analysis) ซึ่งในผลการศึกษาพบว่าการปรับปรุงโครงสร้างในทุกวิธีจะส่งผลให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้นรวมถึงโครงสร้างจะมีการเสียรูปทางด้านข้างที่ลดลง โดยการปรับปรุงโครงสร้างวิธี Retrofit-A และ Retrofit-C จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติของระบบโครงสร้างได้จึงทำให้โครงสร้างยังคงอยู่ในรูปแบบโครงต้านแรงดัดแบบธรรมดา ในขณะที่การปรับปรุงวิธี Retrofit-B สามารถยกระดับให้โครงสร้างอยู่ในประเภทโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวพิเศษได้เนื่องจากโครงสร้างยังคงมีเสถียรภาพในการรับแรงกระทำด้านข้างภายหลังจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะเนื่องจากรับแรงอัด

ABSTRACT

In many regions, old structures might be designed to withstand only gravitational loads due to lack of information about seismic risk. However, with more seismic records available, seismic design requirements had been incorporated into recent design codes. Many buildings which were designed according to outdated codes might need seismic performance evaluation, as well as, seismic upgrading, if needed. In this study, a steel frame structure, which was designed according to outdated codes, was evaluated for its seismic performance. Push-over analysis was performed to evaluate seismic capacity of the structure and its performance level. Three retrofit schemes were proposed and compared. The results showed that the Retrofit-A, in which an additional span of the chevron brace was added, improved lateral stiffness of the structure. The Retrofit-B, in which all bracings were changed to concentric, showed improvement in ductility and stiffness. The Retrofit-C, in which all bracings were enlarged, showed similar behavior as the Retrofit A.

คำสำคัญ: วิธีแรงกระทำทางด้านข้าง โครงสร้างเหล็ก การปรับปรุงโครงสร้างเพื่อต้านแผ่นดินไหว

Keywords: Push-over analysis, Steel structure, Seismic retrofit

[1]*Corresponding author: natthapg@kku.ac.th*

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

***รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมาผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวได้สร้างความเสียหายต่อที่พักอาศัยจนทำให้เกิดการสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก ด้วยข้อมูลที่มีอย่างจำกัดในการออกแบบอาคารจึงไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่มีจากแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามข้อมูลในปัจจุบันได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าประเทศไทยมีความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเมืองและประชากรจึงทำให้อาคารที่พักอาศัยที่ออกแบบและก่อสร้างมาแล้วมีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของระบบโครงสร้างอาคารและตรวจสอบความเสียที่เกิดขึ้นเพื่อหาวิธีการในการปรับปรุงโครงสร้างให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพียงพอ

เมื่อปี 2003 Rai [3] ได้ทำการศึกษาอาคารเหล็กที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว Northridge ปี 1994 โดยอาคารจะมีลักษณะเป็นโครงแกงแนงเหล็ก ซึ่งถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวได้ตามมาตรฐานเก่าจากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างไม่มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวได้เพียงพอเนื่องจากเกิดความเสียหายในจุดต่อระหว่างเสากับคาน และจุดต่อชิ้นส่วนแกงแนง ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวในอดีตที่ไม่ได้พิจารณาถึงผลของความเหนียว และปี 2017 Mottier และคณะ [4] ได้ทำการประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารเหล็กที่มีลักษณะเป็นโครงแกงแนงรูปแบบ Chevron และถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวได้ตามมาตรฐานเก่าใน NBCC-1980 [1] ซึ่งจะพบว่าเมื่อพิจารณาถึงมาตรฐานการออกแบบใหม่ใน NBCC-2015 [2] จะพบว่าความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจนโครงสร้างมีโอกาสได้รับความเสียหายจึงทำให้โครงสร้างนั้นจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพียงพอ ต่อมาในปี 2017 Nassani [5] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างเหล็กที่มีการติดตั้งเสริมแกงแนงรูปแบบต่างๆ โดยจะพบว่าโครงสร้างเหล็กที่ไม่ได้รับการเสริมแกงแนงจะพบความเสียหายในคานก่อนเสาตามลำดับ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเหล็กที่ได้รับการเสริมแกงแนงโดยจะเกิดความเสียหายในชิ้นส่วนแกงแนงเป็นลำดับแรกและต่อมาจะเกิดความเสียหายในคานและเสา ดังนั้นการติดตั้งเสริมแกงแนงจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างในระบบโครงสร้างได้โดยที่ชิ้นส่วนแกงแนงจะทำหน้าที่ยอมให้เกิดความเสียหายก่อนชิ้นส่วนอื่นๆ และ Minouei [6] ได้ทำการศึกษาวิธีการเสริมกำลังในโครงสร้างเหล็กให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นด้วยการขยายขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนคานและชิ้นส่วนแกงแนงซึ่งพบว่าการขยายขนาดชิ้นส่วนในระบบโครงสร้างสามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวได้ แต่อย่างไรก็ตามแรงภายในฐานเสาก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างเกิดการพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์ได้ ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบเสริมกำลังให้กับโครงสร้างจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบสำหรับการออกแบบเป็นสำคัญ

สำหรับงานวิจัยนี้จะประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารเหล็กรวมถึงตรวจสอบความเสียหายและระดับสมรรถนะในระบบโครงสร้างซึ่งเป็นตัวแทนของอาคารเหล็กขนาดเล็กที่ไม่ได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวหรือถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวได้ตามมาตรฐานเก่า โดยจะทำการปรับปรุงโครงสร้างให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นและโครงสร้างยังคงมีเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ระดับที่สามารถเข้าใช้งานอาคารได้ทันทีด้วยวิธีการปรับปรุง 3 รูปแบบ ประกอบด้วยการติดตั้งชิ้นส่วนแกงแนงรูปแบบเดิมเพิ่มอีก 1 ช่วงเสา การเพิ่มและปรับเปลี่ยนแนวชิ้นส่วนแกงแนง และการเพิ่มขนาดชิ้นส่วนแกงแนงเดิม ทั้งนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อพิจารณาผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหวจะวิเคราะห์โดยใช้วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) หรือวิธีการผลักด้วยแรงด้านข้าง (Push-Over Analysis) ตามมาตรฐาน FEMA-440 [7]

วัตถุประสงค์การศึกษา

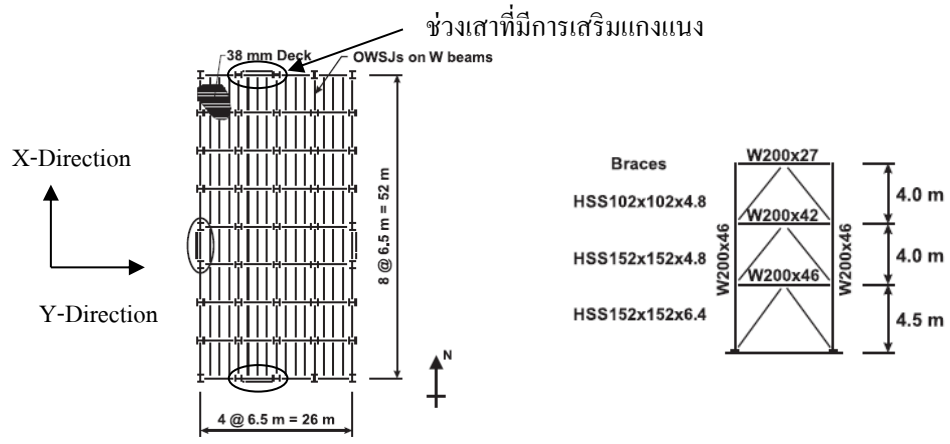
1. เพื่อปรับปรุงโครงสร้างเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้
2. เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของการปรับปรุงด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการศึกษา

ในการศึกษาจะตรวจสอบคุณสมบัติทางวัสดุในโครงสร้างและกำหนดแบบจำลองพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของระบบโครงสร้างด้วยวิธีการผลักด้วยแรงด้านข้างตามมาตรฐาน FEMA-440 [7] ที่พิจารณาจุดสมรรถนะ (Performance Point) หรือจุดที่แสดงถึงผลการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของระบบโครงสร้าง ซึ่งในภายหลังจากการประเมินถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าโครงสร้างไม่มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวได้เพียงพอจะทำการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นโดยที่โครงสร้างมีเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ระดับที่สามารถเข้าใช้งานอาคารได้ทันที

คุณสมบัติทางวัสดุในชิ้นส่วนโครงสร้าง

งานศึกษานี้อาคารโครงสร้างเหล็กจะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Mottier และคณะ [4] ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มอาคารเหล็กที่ถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวได้ตามมาตรฐานเก่าหรือมาตรฐาน NBCC-1980 [1] โดยอาคารจะมีลักษณะเป็นโครงแกงแนงรูปแบบ Chevron ซึ่งมีจุดต่อบริเวณฐานเสาเป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support) และจุดต่อระหว่างเสากับคานจะสามารถส่งถ่ายโมเมนต์ได้ (Fixed Connection) ทั้งนี้คานกับเสาจะเป็นเหล็กรูปพรรณชั้นคุณภาพ 300W ที่มีกำลังครากเท่ากับ 300 MPa และชิ้นส่วนแกงแนงเป็นเหล็กรูปพรรณ ชั้นคุณภาพ 350W ที่มีกำลังครากเท่ากับ 350 MPa



ก) แบบแปลนอาคาร ข) ภาพด้านข้างแสดงขนาดชิ้นส่วน

ภาพที่ 1 รายละเอียดของโครงสร้างเหล็กที่มีการเสริมแกงแนง

การพิจารณาน้ำหนักบรรทุกรวมจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE41-13 [8] โดยพิจารณาน้ำหนักของหิมะด้วย เนื่องจากอาคารตั้งอยู่ในประเทศเขตหนาวซึ่งน้ำหนักบรรทุกจะแสดงดังข้อมูลต่อไปนี้

หลังคา

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) = 1 kPa (หลังคามีความหนา 38 mm)

น้ำหนักบรรทุกหิมะ (Snow Load) = 1.64 kPa

พื้น

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) = 2.6 kPa (พื้นมีความหนา 63 mm)

น้ำหนักบรรทุกผนัง (Partitions Load) = 1 kPa

น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) = 2.4 kPa

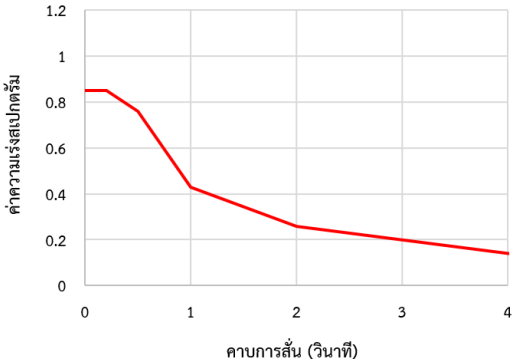
น้ำหนักกำแพงรอบนอก (Exterior Walls Load) = 0.5 kPa

แบบจำลองพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของชิ้นส่วนโครงสร้าง

สำหรับการกำหนดแบบจำลองพฤติกรรมความเสียหายที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบโครงสร้างจะประกอบด้วยชิ้นส่วนเสา คาน และชิ้นส่วนแกงแนง ซึ่งการกำหนดพฤติกรรมในช่วงสภาวะไม่เป็นเชิงเส้นด้วยคุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) จะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE41-13 [8] โดยจะกำหนดให้ชิ้นส่วนเสามีพฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่กระทำร่วมกับโมเมนต์ดัดบริเวณปลายทั้งสองฝั่งของชิ้นส่วน ในขณะที่ชิ้นส่วนคานจะมีพฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกเป็นโมเมนต์ดัดบริเวณปลายทั้งสองฝั่งของชิ้นส่วน และในชิ้นส่วนแกงแนงจะกำหนดให้จะมีพฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกเป็นแรงในแนวแกนบริเวณกึ่งกลางชิ้นส่วน ซึ่งพฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกนั้นจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อการเสียรูปซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE41-13 [8] ทั้งนี้จะมีการกำหนดเกณฑ์ของระดับสมรรถนะในชิ้นส่วนประกอบด้วย Yield, IO, LS และ CP ซึ่ง Yield คือ ระดับที่ชิ้นส่วนรับแรงถึงจุดคราก โดย IO คือ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level) ในขณะที่ LS คือ ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level) และ CP คือ ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level)

สเปกตรัมผลการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว

ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่นำมาวิเคราะห์จะเลือกใช้สเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DE) ตามมาตรฐาน NBCC-2015 [2] ที่มีความหน่วงเท่ากับ 2% ในชั้นดินประเภท C หรือชั้นดินแข็ง เนื่องจากอาคารที่ทำการศึกษาตั้งอยู่ประเทศแคนาดา ดังนั้นข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์จึงอ้างอิงตามมาตรฐาน NBCC-2015 [2] โดยความรุนแรงของแผ่นดินไหวจะอยู่ในระดับที่มีโอกาสเกิน 2% ในรอบ 50 ปี แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน NBCC-2015 [4] ที่ใช้ในการศึกษาชิ้นนี้

วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหวในระบบโครงสร้างจะเลือกใช้วิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นมาวิเคราะห์ โดยสามารถจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเมื่อเกิดความเสียหายเกินช่วงพิกัดยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ ซึ่งหลักการของวิธีดังกล่าวจะกำหนดให้มีแรงกระทำทางด้านข้างต่อโครงสร้าง โดยขนาดของแรงจะมีสัดส่วนเป็นไปตามรูปแบบการสั่นที่มีผลรวมของมวลประสิทธิผล (Effective Modal Mass) รวมไม่น้อยกว่า 90% ซึ่งเพียงพอต่อการประเมินการตอบสนองของโครงสร้างด้วยวิธีนี้ จากนั้นเพิ่มแรงกระทำต่อโครงสร้าง โดยจะผลักโครงสร้างไปจนถึงระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) ในทิศทาง X และ Y โดยจะกำหนดระยะการเสียรูปที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ASCE41-13 [8] ซึ่งพิจารณาที่ยอดอาคารซึ่งยอมให้เคลื่อนที่ 2.5% ของความสูงอาคาร ทั้งนี้การประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างจะใช้วิธี Capacity Spectrum method ตามที่เสนอโดยมาตรฐาน FEMA-440 [7] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่พัฒนามาจากมาตรฐาน ATC-40 [9] โดยผลตอบสนองในระบบโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวจะถูกลดทอนความรุนแรงโดยขึ้นอยู่กับความเหนียวของโครงสร้างจึงทำให้เป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะใช้จุดสมรรถนะ (Performance Point) หรือจุดตัดระหว่างเส้นโค้งกำลังและเส้นสเปกตรัมสำหรับการออกแบบในการพิจารณาผลตอบสนองของแผ่นดินไหวในระบบโครงสร้างจึงทำให้ทราบได้ถึงเสถียรภาพและความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้าง

การประเมินค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) จะเป็นค่าที่ใช้ในการปรับทอนแรงจากแผ่นดินไหว โดยปรับจากผลตอบสนองในสภาวะเชิงเส้นให้เป็นผลตอบสนองแบบสภาวะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งจะเป็นระดับของแรงที่ใช้สำหรับการออกแบบโดยจะยอมให้ระบบโครงสร้างมีการสลายพลังงานผ่านการเสียรูปในสภาวะไม่เป็นเชิงเส้นของชิ้นส่วนในโครงสร้างในรูปแบบของจุดหมุนพลาสติก ซึ่งในมาตรฐาน ASCE7-16 [10] ได้กำหนดค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหวให้เป็นไปตามประเภทอาคารที่มีลักษณะเฉพาะต่างๆโดยประเมินจากค่าความเหนียวที่ต้องการ (Ductility Demand) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการยอมให้โครงสร้างนั้นสามารถรับแรงได้ไปจนค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย และค่าตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Overstrength Ratio, Ω_d) ที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานเสาที่สภาวะไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายต่อค่าแรงเฉือนที่ถูกออกแบบไว้ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 ถึง 2 และภาพที่ 3

$$R = \Omega_d \mu \quad (1)$$

โดยที่ Ω_d คือ ค่าตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Over Strength Factor)

μ คือ ค่าความเหนียวที่ต้องการ (Ductility Demand)

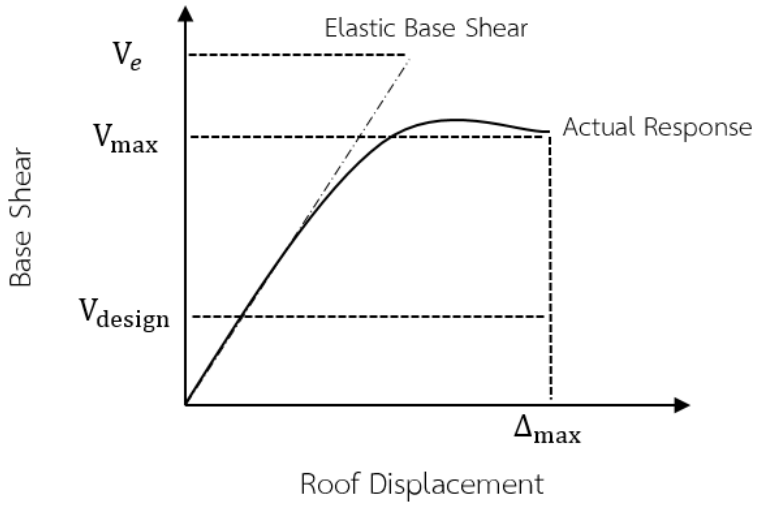
$$\Omega_d = \frac{V_{max}}{V_{design}} \quad (2)$$

และ V_{max} คือ ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุดในสภาวะไม่เป็นเชิงเส้น

V_{design} คือ ค่าแรงเฉือนสำหรับการออกแบบ

V_e คือ ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุดในสภาวะเชิงเส้น

Δ_{max} คือ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดที่ยอมให้เกิดในสภาวะไม่เป็นเชิงเส้น



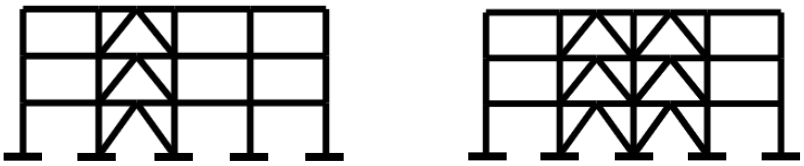
ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์แรงเฉือนในฐานเสากับการเสียรูปที่พิจารณาร่วมกับค่าปรับผลตอบสนอง

การปรับปรุงโครงสร้างให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหว

ในการตรวจสอบโครงสร้างเมื่อพบว่าโครงสร้างไม่มีเสถียรภาพที่เพียงพอหรือชิ้นส่วนเสาซึ่งมีความสำคัญต่อการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งของระบบโครงสร้างเกิดความเสียหายตั้งแต่ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS) ขึ้นไปจะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพียงพอภายใต้ขอบเขตที่โครงสร้างมีความปลอดภัยสำหรับเข้าใช้งานได้ ซึ่งวิธีการปรับปรุงโครงสร้างที่เสนอมีดังต่อไปนี้

1. การปรับปรุงด้วยการติดตั้งชิ้นส่วนแกงแนงรูปแบบ Chevron เพิ่มอีก 1 ช่วงเสา (Retrofit-A)

สำหรับรูปแบบการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีนี้จะแสดงดังภาพที่ 4 โดยจะทำการเสริมชิ้นส่วนแกงแนงขนาดเท่าเดิมรูปแบบ Chevron เพิ่มอีก 1 ช่วงเสาเพื่อเพิ่มสติฟเนสของระบบโครงสร้างให้โครงสร้างมีความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการปรับปรุงด้วยวิธีดังกล่าวมีข้อดี คือ แรงภายในชิ้นส่วนแกงแนงเดิมจะลดลงเนื่องจากชิ้นส่วนแกงแนงที่ถูกติดตั้งใหม่จะทำหน้าที่ช่วยกระจายการรับแรง แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวก็มีข้อเสีย คือ อาจส่งผลต่อรูปลักษณ์ของอาคาร และฐานเสาบริเวณที่มีการติดตั้งเสริมชิ้นส่วนแกงแนงจะมีแรงเฉือนในฐานเสาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความแข็งซึ่งทางวิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงกำลังรับแรงของจุดต่อฐานเสาด้วย



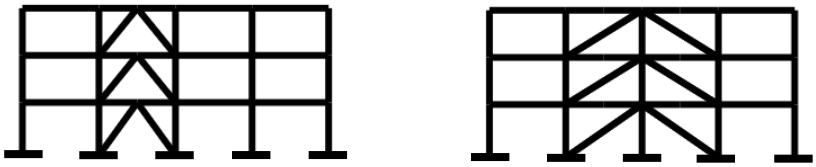
ก) ก่อนการปรับปรุง ข) ภายหลังการปรับปรุง

ภาพที่ 4 การปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี Retrofit-A

2. การปรับปรุงด้วยการเพิ่มและปรับเปลี่ยนแนวชิ้นส่วนแกงแนง (Retrofit-B)

สำหรับรูปแบบการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีนี้จะทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนแกงแนงใหม่ทั้งหมดโดยติดตั้งชิ้นส่วนแกงแนงตามภาพที่ 5 การปรับปรุงด้วยวิธีนี้จะส่งผลให้แรงในชิ้นส่วนแกงแนงถ่ายเข้าจุดต่อระหว่างเสากับคานและไม่เกิดแรงที่ไม่สมดุลบริเวณกึ่งกลางคานซึ่งการปรับแนวแกงแนงจะส่งผลให้โครงสร้างมีสติฟเนสที่เพิ่มขึ้น แต่

อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวก็มีข้อเสีย คือ มีการเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนของอาคารที่อาจส่งผลกระทบต่อสถาปัตยกรรมของอาคารและชิ้นส่วนแกงแนงมีความยาวที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ชิ้นส่วนแกงแนงมีความสามารถในการรับแรงอัดที่ลดลง



ก) ก่อนการปรับปรุง ข) ภายหลังการปรับปรุง

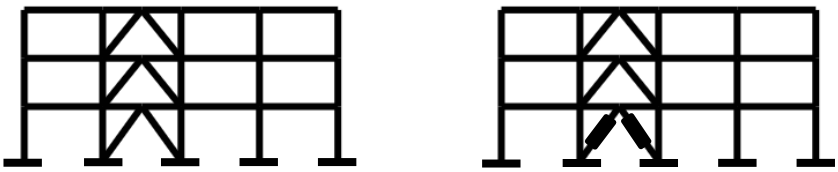
ภาพที่ 5 การปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี Retrofit-B

3. การปรับปรุงด้วยการเพิ่มขนาดของชิ้นส่วนแกงแนงเดิม (Retrofit-C)

สำหรับรูปแบบการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีนี้จะแสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 6 โดยจะทำการขยายพื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วนแกงแนงโดยเพิ่มความหนาของชิ้นส่วนจากเดิม 6.4 มิลลิเมตรให้เป็น 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งในการออกแบบชิ้นส่วนจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 41% และกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น 45% ภายใต้เกณฑ์การออกแบบขยายหน้าตัดชิ้นส่วนแกงแนงที่ทำให้โครงสร้างอยู่ในระดับสมรรถนะที่สามารถเข้าใช้งานอาคารได้ทันที (IO) ซึ่งการปรับปรุงวิธีดังกล่าวมีข้อดี คือ ไม่เสียพื้นที่ทางสถาปัตย์และชิ้นส่วนแกงแนงมีความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสีย คือ แรงภายในที่ส่งถ่ายเข้าจุดต่อแกงแนงจะมากขึ้นจึงทำให้การออกแบบจุดต่อแกงแนงต้องมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 1 การขยายขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนแกงแนง

ขนาดหน้าตัด	โมเมนต์ความเฉื่อย (cm^4)	พื้นที่ (cm^2)	กำลังอัด (kN)	กำลังดึง (kN)
HSS 152x152x6.4 (หน้าตัดเดิม)	1,319.5	37.3	670.6	1,279.4
HSS 152x152x9.5 (หน้าตัดใหม่)	1,840.8	54.2	948.5	1,858.6



ก) ก่อนการปรับปรุง ข) ภายหลังการปรับปรุง

ภาพที่ 6 การปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี Retrofit-C

ผลการศึกษา

การวิเคราะห์โครงสร้างก่อนการปรับปรุงด้วยวิธีสถิตไม่เป็นเชิงเส้น

สำหรับการวิเคราะห์ผลการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหวในโครงสร้างที่เป็นรูปแบบโครงแกงแนงเหล็กแบบตรงศูนย์ (Concentrically Braced Frame, CBF) ด้วยวิธีสถิตไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในตารางที่ 2 จะต้องพิจารณารูปแบบของการสั่นไหวที่ทำให้มีผลรวมของมวลประสิทธิผลมีค่าไม่น้อยกว่า 90% ซึ่งรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในทิศทาง X และ Y จะมีอิทธิพลมาจากโหมดที่ 1 เป็นหลักจึงทำให้สามารถใช้การตอบสนองเพียงรูปแบบเดียวได้จากข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างจะพบว่ามีจำนวนโหมดที่เพียงพอต่อการตอบสนองโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยทิศทาง X จะสั่นด้วยโหมดที่ 1 ในขณะที่ทิศทาง Y จะสั่นด้วยโหมดที่ 2 ซึ่งค่าคาบการสั่นในทิศทาง X จะมีค่าที่มากกว่าทิศทาง Y เนื่องจากโครงสร้างทิศทาง Y มีความแข็งที่มากกว่าทิศทาง X

ตารางที่ 2 ข้อมูลเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างทาง X และ Y

ทิศทาง	โครงสร้าง	โหมด	คาบ (วินาที)	อัตราส่วนการมีส่วนร่วมของมวล (%)
X	CBF	1	0.749	90
Y	CBF	2	0.730	90

เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างในระบบสามมิติที่ถูกปล่อยให้มีการเคลื่อนที่อิสระในทิศทาง X และ Y โดยวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจะพบว่าคาบการสั่นไหวที่ประเมินได้มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ถูกวิเคราะห์โดย Mottier และคณะ [4] ที่วิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างในสองมิติเฉพาะในทิศทาง X ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเทียบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในโปรแกรมกับงานวิจัยของ Mottier และคณะ [2]

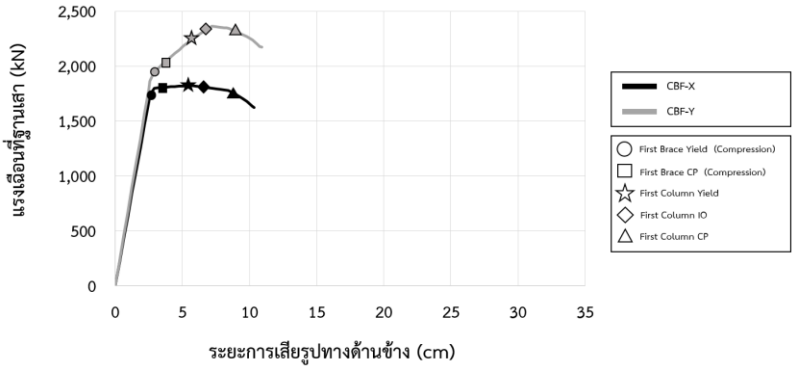
ลำดับโหมด	คาบ[1] (วินาที)		คาบ[2] (วินาที)
	ทิศทาง X	ทิศทาง Y	ทิศทาง X
1	0.749	0.730	0.705
2	0.301	0.294	0.294
3	0.214	0.209	0.198

*หมายเหตุ : [1]ผลการศึกษานี้คำนวณโดย SAP2000 [11]

[2]Mottier และคณะ [4]

สำหรับการพิจารณาเส้นโค้งกำลัง (Capacity Curve) จากการผลักโครงสร้างในทิศทาง X และ Y ภายใต้ขอบเขตระยะการเสียรูปที่ยอมให้ (Allowable Drift) ที่มีค่าเท่ากับ 31 เซนติเมตรดังแสดงในภาพที่ 7 จะพบว่าเส้นโค้งกำลังในทิศทาง Y จะมีแรงเฉือนที่เกิดในฐานเสามากกว่าทิศทาง X เนื่องจากการวางตัวของเสาในแกนที่แข็งกว่าดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาเส้นโค้งกำลังภายใต้ผลของ P-Delta หรือผลของโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนัก

บรรทุกในแนวดิ่งที่กระทำกับโครงสร้างในตำแหน่งที่มีการโก่งตัวทางด้านข้างจะพบว่าความสามารถในการรับผลของแรงอัดที่กระทำร่วมกับโมเมนต์ดัดของเสามีไม่เพียงพอ โดยเมื่อผลักโครงสร้างในทิศทาง Y จะพบว่าเมื่อชิ้นส่วนแกงแนงที่รับแรงอัดไม่สามารถรับแรงได้เนื่องจากการโก่งเดาะ สติฟเนสในการรับแรงด้านข้างจะลดลง แต่สำหรับทิศทาง X นั้นความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างจะสูญเสียไปทั้งหมด ซึ่งโครงสร้างในทิศทาง X จะสูญเสียเสถียรภาพในการรับแรงด้านข้างภายหลังจากที่ชิ้นส่วนเสารับแรงอยู่ในช่วงสภาวะไม่เป็นเชิงเส้น ในขณะที่โครงสร้างทิศทาง Y สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างต่อไปได้ โดยไม่สูญเสียเสถียรภาพในการรับแรงด้านข้าง แต่อย่างไรก็ตามการผลักโครงสร้างทั้งสองทิศทางก็ไม่สามารถผลักโครงสร้างไปได้ถึง 31 เซนติเมตร เนื่องจากโครงสร้างนั้นไม่มีเสถียรภาพที่เพียงพอต่อการรับแรงกระทำทางด้านข้างภายหลังจากที่ชิ้นส่วนเสารับแรงถึงระดับ CP



ภาพที่ 7 เส้นโค้งกำลังเมื่อผลักโครงสร้างทิศทาง X และ Y

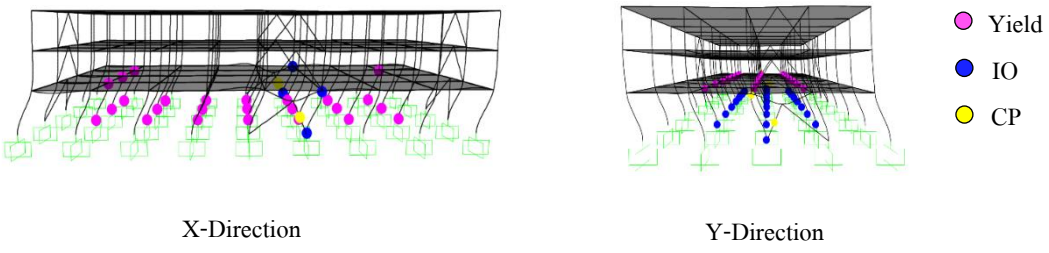
เมื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน FEMA-440 [7] ด้วยเส้นโค้งกำลังกับเส้นสเปกตรัมสำหรับการออกแบบจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration) และค่าการเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Displacement) ซึ่งข้อมูลผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวจะแสดงในตารางที่ 4 โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าการเสียรูปเป้าหมายบนยอดอาคารจะพบว่าโครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่เพียงพอ เนื่องจากการเสียรูปโดยรวมทางด้านข้างของโครงสร้างจะอยู่ในระดับ IO อ้างอิงตามมาตรฐาน FEMA-356 [12] ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัยสำหรับการใช้งาน นอกจากนี้โครงสร้างยังมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างไปจนถึงค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายได้โดยที่โครงสร้างในทิศทาง Y จะมีแรงเฉือนเกิดขึ้นในฐานเสาที่มากกว่าทิศทาง X เนื่องจากผลของการวางตัวของเสาในแกนที่แข็งและผลของค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในทิศทาง Y ที่มากกว่าทิศทาง X แต่ถึงอย่างนั้นค่าความเหนียวที่ต้องการและค่าคาบประสิทธิผลของโครงสร้างทิศทาง Y ก็จะมีค่าที่น้อยกว่าทิศทาง X เนื่องจากมีความแข็งที่มากกว่า

ตารางที่ 4 ผลการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหวของระบบโครงสร้าง

ค่าการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว	ทิศทาง	
	X	**Y**
ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (g)	0.143	0.190
ค่าการเคลื่อนที่ตอบสนองเชิงสเปกตรัม (cm)	7.729	7.682
ค่าการเสียรูปเป้าหมาย (cm)	8.521	8.604
ค่าแรงเฉือนในฐานเสา (kN)	1,777	2,345
ค่าความเหนียวที่ต้องการ	3.858	3.537
ค่าคาบประสิทธิผล (วินาที)	1.473	1.276

การตรวจสอบระดับสมรรถนะในชิ้นส่วนโครงสร้างก่อนการปรับปรุง

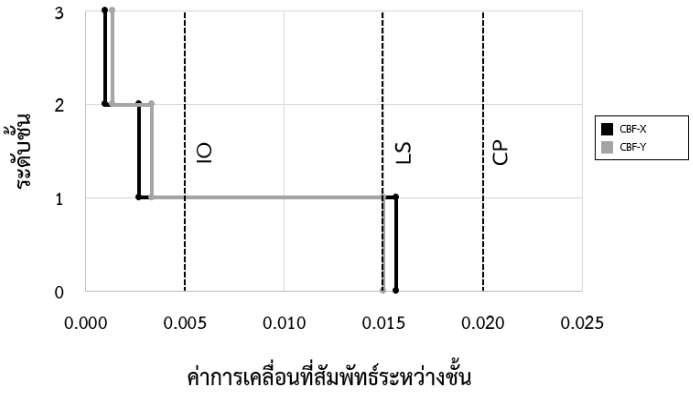
สำหรับการประเมินระดับสมรรถนะของชิ้นส่วนในโครงสร้างจะพิจารณาความเสียหายที่ค่าการเสียรูปเป้าหมายโดยภาพที่ 8 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เกิดจุดหมุนพลาสติกที่มีระดับสมรรถนะของชิ้นส่วนแตกต่างกันออกไป ซึ่งจากการผลักโครงสร้างในทิศทาง X และ Y ชิ้นส่วนแกงแนงที่รับแรงอัดบริเวณชั้นล่างจะเกิดการโก่งเดาะในขณะที่ชิ้นส่วนแกงแนงในชั้นอื่นๆรวมถึงชิ้นส่วนคานในทุกๆชั้นจะไม่เกิดความเสียหายใดๆ โดยเมื่อชิ้นส่วนแกงแนงที่รับแรงอัดเกิดการโก่งเดาะ ชิ้นส่วนแกงแนงที่รับแรงดึงจะทำให้คานเกิดโมเมนต์ดัดเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้เสาข้างเคียงเกิดความเสียหายตั้งแต่ระดับ Yield ไปจนถึงระดับ CP ซึ่งเสานั้นถือเป็นชิ้นส่วนหลักที่สำคัญต่อเสถียรภาพในระบบโครงสร้างเนื่องจากต้องทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งทั้งหมด เมื่อชิ้นส่วนเสาเกิดความเสียหายถึงระดับ CP จะถือว่าโครงสร้างไม่มีความปลอดภัยสำหรับเข้าใช้งาน



ภาพที่ 8 ตำแหน่งความเสียหายในโครงสร้างเมื่อผลักโครงสร้างทิศทาง X และ Y

การตรวจสอบเสถียรภาพในโครงสร้างก่อนการปรับปรุง

เมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Inter-Story Drift) ณ ค่าการเสียรูปเป้าหมายดังแสดงในภาพที่ 9 จะพบว่าในการผลักโครงสร้างทิศทาง X และ Y จะมีระดับสมรรถนะระหว่างชั้นฐานเสากับชั้นที่ 1 อยู่ในระดับ LS ซึ่งถือว่าไม่ปลอดภัยสำหรับการใช้งาน ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงบริเวณชั้นล่างมีความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างที่น้อยจึงต้องปรับปรุงโครงสร้างเพื่อเพิ่มสติฟเนสและปรับพฤติกรรมการรับแรงให้โครงสร้างมีการเสียรูปทางด้านข้างลดลงจนอยู่ในระดับ IO



ภาพที่ 9 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเมื่อผลักโครงสร้างทิศทาง X และ Y

การประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง

ภายหลังการปรับปรุงโครงสร้างเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพลศาสตร์ในทิศทาง X และ Y ดังแสดงในตารางที่ 5 จะพบว่าคาบการสั่นไหวของโครงสร้างมีแนวโน้มที่ลดลงสำหรับการปรับปรุงโครงสร้างในทุกวิธีเนื่องจากผลของสติฟเนสในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีการเพิ่มขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนแกงแนงจะเพิ่มสติฟเนสได้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการปรับปรุงวิธีอื่นๆ ในขณะที่การปรับปรุงด้วยการติดตั้งชิ้นส่วนแกงแนงเพิ่มอีก 1 ช่วงเสาจะเพิ่มสติฟเนสให้กับโครงสร้างมากที่สุด ทั้งนี้ในการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีการเพิ่มขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนแกงแนงจะมีค่าผลรวมของมวลประสิทธิผลที่น้อยที่สุด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสติฟเนสในชั้นล่างที่จะส่งผลต่อรูปแบบการสั่นบางโหมดเป็นพิเศษ โดยจะส่งผลต่อโหมดพื้นฐานหรือโหมดแรกมากกว่าโหมดอื่นๆจึงทำให้ผลรวมของมวลประสิทธิผลมีค่าที่ลดลงมาก

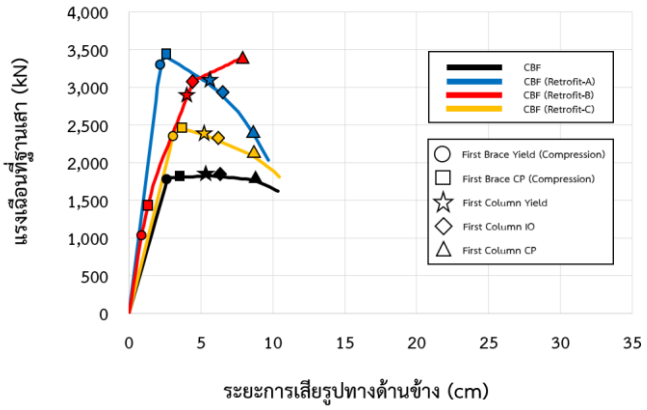
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบข้อมูลเชิงพลศาสตร์ในโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง

โครงสร้าง	X		Y	
	คาบ (วินาที)	อัตราการมีส่วนร่วมของมวล (%)	คาบ (วินาที)	อัตราการมีส่วนร่วมของมวล (%)
CBF	0.749	90	0.730	90
Retrofit-A	0.509	91	0.508	91
Retrofit-B	0.565	90	0.560	90
Retrofit-C	0.694	85	0.679	86

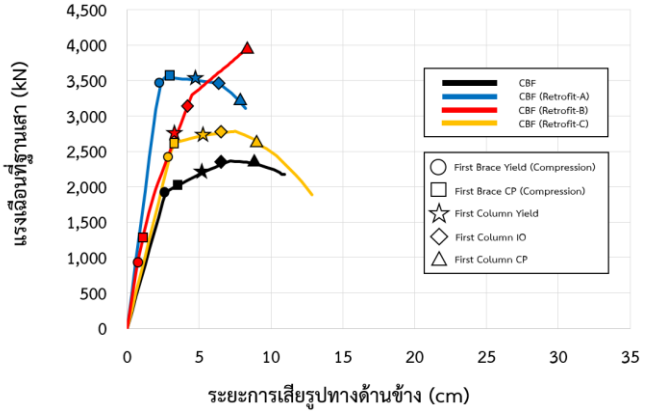
เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างในทิศทาง X และ Y ภายใต้ระยะการเสียรูปสูงสุดที่ยอมให้ดังแสดงในภาพที่ 10 และ 11 จะพบว่าการปรับปรุงวิธี Retrofit-A จะเพิ่มสติฟเนสให้กับโครงสร้างมากที่สุด แต่เมื่อถึงจุดที่โครงสร้างนั้นรับแรงสูงสุด สติฟเนสของระบบโครงสร้างจะลดลง จนทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของโครงสร้างภายหลังจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะ โดยจะทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุลและเกิดการดัดในคานบริเวณที่มีชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะเชื่อมต่ออยู่ ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องระวังเมื่อทำการปรับปรุง

โครงสร้างด้วยวิธีนี้ ดังนั้นอาจต้องทำการเสริมกำลังให้กับคานเพิ่มเติม ในขณะที่การปรับปรุงวิธี Retrofit-B จะส่งผลให้โครงสร้างมีแรงเฉือนในฐานเสามากที่สุดเนื่องจากเป็นการปรับปรุงด้วยรูปแบบที่เพิ่มสติฟเนสทางด้านข้างให้กับโครงสร้าง ซึ่งความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างยังสามารถรับได้เพิ่มขึ้นโดยที่โครงสร้างยังไม่สูญเสียเสถียรภาพโดยชิ้นส่วนแกงแนงฝั่งที่รับแรงดึงจะทำหน้าที่ช่วยรับแรงกระทำทางด้านข้างเป็นหลัก การปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธีนี้จึงมีความจำเป็นต้องเสริมกำลังของฐานเสา และอาจรวมไปถึงฐานรากของโครงสร้างด้วยหากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่ามากเกินกว่ากำลังของโครงสร้างเดิม ส่วนการปรับปรุงวิธี Retrofit-C จะมีแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานเสาน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงด้วยวิธีอื่นๆซึ่งกำลังของจุดต่อแกงแนงนั้นจำเป็นต้องได้รับการเสริมกำลังด้วยให้สามารถควบคุมความเสียหายให้เกิดขึ้นในชิ้นส่วนแกงแนง

จากการตรวจสอบพฤติกรรมการวิบัติของโครงสร้างจะพบว่าในโครงสร้างก่อนการปรับปรุงเมื่อชิ้นส่วนแกงแนงที่รับแรงอัดเกิดการโก่งเดาะ ความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้างจะไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี Retrofit-A และ Retrofit-C จะทำให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างได้เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะก็จะสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างจากการปรับปรุงวิธี Retrofit-B ที่ความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างจะไม่ลดลงในค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ ทั้งนี้สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างในทิศทาง Y จะมีเฉพาะการปรับปรุงวิธี Retrofit-A ที่ความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างนั้นลดลงภายหลังจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียสติฟเนสอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบเส้นโค้งกำลังของโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุงในทิศทาง X



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบเส้นโค้งของโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุงในทิศทาง Y

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีสเปกตรัมในทิศทาง X และ Y ดังแสดงในตารางที่ 6 จะพบว่าการปรับปรุงโครงสร้างในทุกวิธีจะส่งผลให้โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้างได้มากขึ้น รวมไปถึงโครงสร้างจะเกิดการเสียรูปทางด้านข้างลดลง เนื่องจากค่าการเสียรูปเป้าหมายมีค่าที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของสติฟเนสในระบบโครงสร้าง นอกจากนี้ค่าคาบประสิทธิผลจะลดลงด้วยเนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งที่มากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาระดับสมรรถนะของโครงสร้างตามมาตรฐาน FEMA-356 [12] จะพบว่าโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงในทุกวิธีจะอยู่ในระดับ IO เนื่องจากชิ้นส่วนเสาซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญต่อการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจะรับผลของแรงอัดที่กระทำร่วมกับโมเมนต์ดัดอยู่ในระดับ IO อีกทั้งการเสียรูปทางด้าน ณ ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายบริเวณจุดควบคุมบนยอดอาคารจะอยู่ในระดับ IO ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัยสำหรับการใช้งานอาคาร สำหรับการปรับปรุงวิธี Retrofit-A สามารถลดค่าการเสียรูปเป้าหมายได้มากที่สุด เนื่องจากมีสติฟเนสของโครงสร้างในช่วงสภาวะเชิงเส้นที่มากที่สุด และในการปรับปรุงวิธี Retrofit-B จะมีความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างได้มากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างมีการยอมให้เกิดความเสียหายที่สภาวะไม่เป็นเชิงเส้นในชิ้นส่วนแกงแนงบางส่วน โดยที่ชิ้นส่วนอื่นๆส่วนที่เหลือในระบบโครงสร้างจะยังคงอยู่ในสภาวะเป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้โครงสร้างจึงมีความเหนียวและสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นภายหลังจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะ ซึ่งชิ้นส่วนแกงแนงในทุกๆชั้นจะทำหน้าที่ช่วยในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง และสำหรับการปรับปรุงวิธี Retrofit-C จะมีแรงเฉือนในฐานเสาเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงด้วยวิธีอื่นๆ

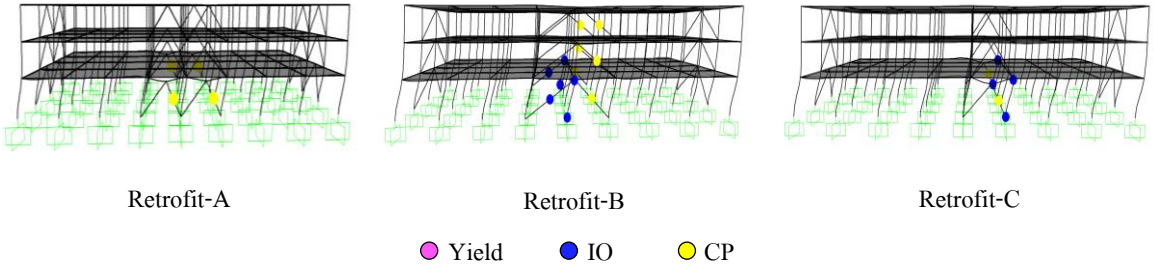
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรการตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหวในโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง

ทิศทาง	โครงสร้าง	จุดสมรรถนะ			
		ค่าการเสียรูปเป้าหมาย (cm)	แรงเฉือนที่ฐานเสา (kN)	ค่าความเหนียวที่ต้องการ	ค่าคาบประสิทธิผล (วินาที)
X	CBF	8.521	1,777	3.858	1.473
	Retrofit-A	4.571	3,183	2.348	0.794
	Retrofit-B	7.123	3,339	3.995	0.926
	Retrofit-C	6.458	2,279	2.397	1.094
Y	CBF	8.604	2,345	3.537	1.276
	Retrofit-A	4.530	3,526	2.256	0.751
	Retrofit-B	7.212	3,772	4.025	0.872
	Retrofit-C	6.217	2,761	2.220	0.962

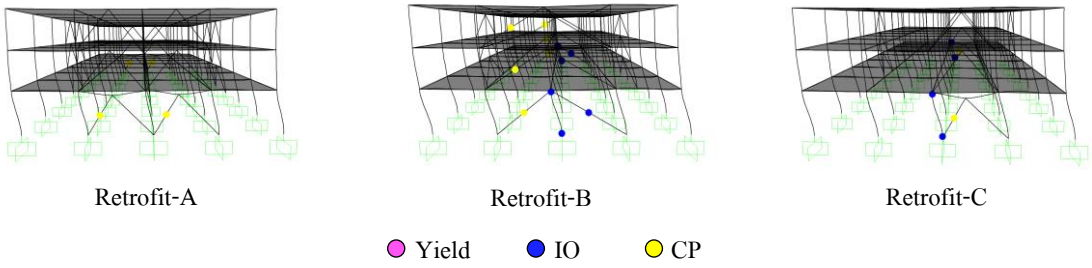
ระดับสมรรถนะในชิ้นส่วนโครงสร้างหลังการปรับปรุง

เมื่อพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้น ณ ค่าการเสียรูปเป้าหมายจะพบว่าในโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงดังแสดงในภาพที่ 12 และ 13 จะมีจำนวนจุดหมุนพลาสติกในเสาลดน้อยลงอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปรับปรุงวิธี Retrofit-A ที่เสาไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากชิ้นส่วนแกงแนงช่วยทำหน้าที่ในกระจายการรับแรงทางด้านข้าง ในขณะเดียวกันการปรับปรุงวิธี Retrofit-B และ Retrofit-C จะทำให้เสายังคงรับแรงอยู่ในระดับ IO ซึ่งเมื่อพิจารณาชิ้นส่วนคานจะไม่พบความเสียหายใดๆ แต่ในขณะเดียวกันจำนวนชิ้นส่วนแกงแนงที่เกิดความเสียหายจะมีมากขึ้นเนื่องจากผลของการ

ปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงในชิ้นส่วนแกงแนงที่จากเดิมมีความเสียหายเฉพาะในชิ้นส่วนแกงแนงบริเวณชั้นล่าง ดังนั้นการเพิ่มสติฟเนสในโครงสร้างและการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงในโครงสร้างจะช่วยลดความเสียหายในชิ้นส่วนได้ โดยโครงสร้างจะอยู่ในระดับ IO เนื่องจากชิ้นส่วนเสายังคงรับแรงอยู่ในระดับไม่เกิน IO ในขณะที่ชิ้นส่วนแกงแนงยอมให้เกิดความเสียหายเกินระดับ CP ได้ ด้วยเหตุนี้โครงสร้างจึงมีความปลอดภัยสำหรับใช้งาน



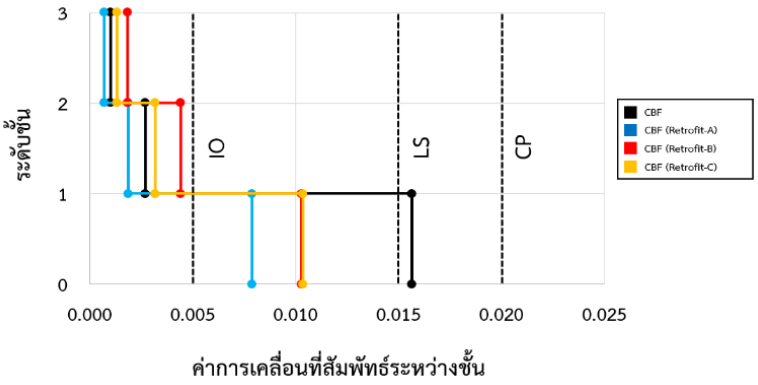
ภาพที่ 12 ตำแหน่งความเสียหายของโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงจากการผลักโครงสร้างทิศทาง X



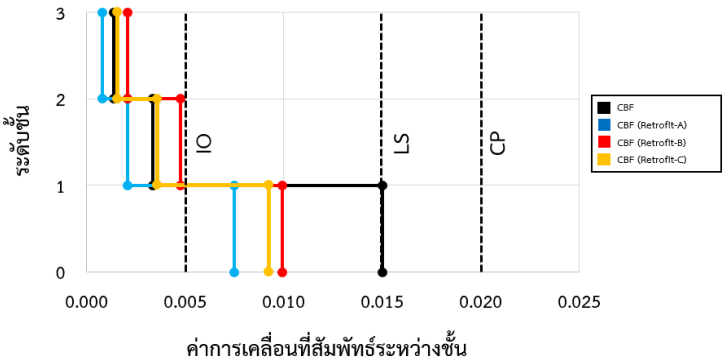
ภาพที่ 13 ตำแหน่งความเสียหายของโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงจากการผลักโครงสร้างทิศทาง Y

เสถียรภาพในโครงสร้างหลังการปรับปรุง

เมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในทิศทาง X และ Y ของโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุงดังแสดงในภาพที่ 14 และ 15 จะพบว่าการปรับปรุงโครงสร้างในทุกวิธีจะส่งผลให้ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีค่าที่ลดลง ระดับสมรรถนะในทุกๆชั้นจะอยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับใช้งานโดยอยู่ในระดับ IO ซึ่งการปรับปรุงโครงสร้างด้วยการติดตั้งชิ้นส่วนแกงแนงเพิ่มอีก 1 ช่วงเสา (Retrofit-A) จะสามารถลดค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นฐานเสากับชั้น 1 ได้มากที่สุด



ภาพที่ 14 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเมื่อผลักโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงแล้วในทิศทาง X



ภาพที่ 15 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเมื่อผลักโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงแล้วในทิศทาง Y

ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองในโครงสร้างหลังการปรับปรุง

ภายหลังการปรับปรุงโครงสร้างเมื่อประเมินหาค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว หรือค่า R ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE7-16 [10] ภายใต้เงื่อนไขที่สมมติให้รายละเอียดของจุดต่อในระบบโครงสร้างมีความแข็งแรงเทียบเท่าหรือมากกว่ากำลังของชิ้นส่วน พบว่าในโครงสร้างก่อนการปรับปรุง ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองจะมีค่าน้อยทำให้โครงสร้างนั้นจัดอยู่ในประเภทโครงต้านแรงดัดแบบธรรมดา (Steel Ordinary Moment Frame) ซึ่งการปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี Retrofit-A และ Retrofit-C นั้นไม่สามารถทำให้ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนองนั้นมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นได้เนื่องจากโครงสร้างมีค่าความเหนียวที่ต้องการที่น้อย ซึ่งแตกต่างจากการปรับปรุงวิธี Retrofit-B ที่มีค่าความเหนียวที่ต้องการที่มากจึงส่งผลให้ค่า R มีค่ามากที่สุดจนสามารถยกระดับให้โครงสร้างอยู่ในประเภทโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวพิเศษ (Steel Special Moment Frame) ได้

ตารางที่ 7 ค่าตัวประกอบผลตอบสนองแผ่นดินไหวในโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง

ทิศทาง	โครงสร้าง	Ω_d	R	ประเภท
X	CBF	1.1	4.1	Ordinary Braced Frame
	Retrofit-A	1.9	4.5	Ordinary Braced Frame
	Retrofit-B	2.0	8.0	Special Braced Frame
	Retrofit-C	1.4	3.3	Ordinary Braced Frame
Y	CBF	1.4	5.0	Ordinary Braced Frame
	Retrofit-A	2.1	4.8	Ordinary Braced Frame
	Retrofit-B	2.3	9.2	Special Braced Frame
	Retrofit-C	1.7	3.7	Ordinary Braced Frame

สรุปผลการศึกษา

1. โครงสร้างก่อนการปรับปรุงมีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่ไม่เพียงพอเนื่องจากเกิดความเสียหายในชิ้นส่วนเสาและชิ้นส่วนแกงแนงเฉพาะบริเวณชั้นล่าง โดยโครงสร้างจะขาดเสถียรภาพในการรับแรงทางด้านข้างภายหลังจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะรวมถึงการเสียรูปทางด้านข้างบริเวณชั้นล่างจะอยู่ในระดับ LS ซึ่งไม่ปลอดภัยสำหรับการใช้งาน

2. การปรับปรุงโครงสร้างในทุกวิธีจะส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปทางด้านข้างน้อยลงโดยค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจะลดลงจนโครงสร้างมีการตอบสนองอยู่ในเกณฑ์ระดับ IO ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัยสำหรับการใช้งานอาคาร

3. การปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี Retrofit-A และ Retrofit-C ไม่สามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติของระบบโครงสร้างได้จึงยังคงรูปแบบโครงต้านแรงดัดแบบธรรมดา ซึ่งแตกต่างจากการปรับปรุงวิธี Retrofit-B ที่สามารถยกระดับให้โครงสร้างอยู่ในประเภทโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวพิเศษเนื่องจากโครงสร้างยังคงมีเสถียรภาพในการรับแรงกระทำด้านข้างภายหลังจากที่ชิ้นส่วนแกงแนงเกิดการโก่งเดาะ

4. การปรับปรุงด้วยวิธี Retrofit-A จะเหมาะกับการปรับปรุงโครงสร้างแกงแนงเหล็กที่มีเป้าหมายในการกระจายแรงทางด้านข้างไปยังชิ้นส่วนแกงแนงในอีก 1 ช่วงเสาโดยทำให้แรงภายในชิ้นส่วนแกงแนงเดิมนั้นลดลง ในขณะที่การปรับปรุงวิธี Retrofit-B จะเหมาะกับโครงสร้างแกงแนงเหล็กที่ต้องการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงโดยหลีกเลี่ยงไม่ให้คานเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงที่ไม่สมดุล และสำหรับการปรับปรุงวิธี Retrofit-C นั้นจะเหมาะกับการเพิ่มกำลังรับแรงของชิ้นส่วนแกงแนงในระบบโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขที่มีมีพื้นที่อยู่อย่างจำกัด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้มอบทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจนทำให้นักศึกษาสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. NRCC. National Building Code of Canada (NBCC), 8th ed. Ottawa, ON, Canada: National Research Council of Canada (NRCC); 1980.
2. NRCC. National Building Code of Canada (NBCC), 13th ed. Ottawa, ON, Canada: National Research Council of Canada (NRCC); 2015.
3. Rai D C, Goel.S C.“Seismic Evaluation and Upgrading of Chevron Braced Frames.” Journal of Constructional Steel Research 59(8): 971–94 ; 2003.
4. Mottier, Paul, Robert Tremblay, and Colin Rogers. “Seismic Retrofit of Low-Rise Steel Buildings in Canada Using Rocking Steel Braced Frames.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics 47(2): 333–35 ; 2018.
5. Nassani, Dia Eddin, Ali Khalid Hussein, and Abbas Haraj Mohammed. “Comparative Response Assessment of Steel Frames With Different Bracing Systems Under Seismic Effect.” Structures 11(June): 229–22 ; 2017.

6. Balazadeh-Minouei, Yasaman, Robert Tremblay, and Sanda Koboevic. “Seismic Retrofit of an Existing 10-Story Chevron-Braced Steel-Frame.” Journal of Structural Engineering 144(10): 04018180 ; 2018.
7. FEMA 440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2006.
8. American Society of Civil Engineers. Seismic evaluation and retrofit of existing building, ASCE 41-13. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers ; 2014.
9. ATC 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Redwood, CA, USA, 1996.
10. American Society of Civil Engineers. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-16. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers ; 2016.
11. CSI. SAP2000 Ultimate, Version 21. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc; 2019.
12. Federal emergency management agency (FEMA). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Reston, Virginia: Federal Emergency Management Agency ; 2000.