

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขโครงสร้างแรงดัดเสริมค้ำยันบริเวณข้อต่อภายใต้น้ำหนัก บรรทุกแบบวัฏจักร

วัชรวิทย์ สุขน้อย¹, วรายุทธ ใบเรือ¹, มณเฑียร นพคุณ¹,
วัชรระ จันทรอนันต์¹ และ เอกนรา จันดา^{1*}

¹วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*eknara@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างแรงดัดเสริมค้ำยันบริเวณข้อต่อ (KBMFs) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบวัฏจักร ระบบ KBMF เป็นการรวมเอาคุณลักษณะเด่นในการต้านทานแผ่นดินไหวของ โครงข้อแข็งต้านทานโมเมนต์และโครงข้อแข็งค้ำยันแบบเอียงศูนย์เข้าด้วยกัน ระบบนี้อาศัยค้ำยันที่มีลักษณะอ้วนสั้นในการ ต้านทานแรงแผ่นดินไหว ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของชิ้นงานตัวอย่าง KBMF ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบวัฏจักร ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงวิเคราะห์สามารถประมาณค่าการ ตอบสนองของโครงสร้างได้ในระดับที่น่าพอใจ สามารถใช้วิธีการพัฒนาแบบจำลองนี้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง ระบบ KBMF ได้ในอนาคต

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาและการทบทวนความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม SeismoStruct เพื่อประเมินพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ของระบบโครงสร้างแรงดัดเสริมค้ำยันบริเวณข้อต่อ (Knee-Brace Moment Frames: KBMFs) และระบบค้ำยันยับยั้งการเดาะตัวบริเวณข้อต่อ (Buckling-Restrained Knee Brace: BRKB) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) รวมถึงการวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์เชิงสถิตไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Static Pushover Analysis) ระบบ KBMF ทำหน้าที่เป็นฟิวส์โครงสร้าง (Structural Fuse) โดยอาศัยค้ำยัน ขนาดสั้นเพื่อดูดซับและสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหว การจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์และสถิตใช้แบบจำลองไม่เป็น เชิงเส้นแบบ Plastic Hinge (Lumped Plasticity) ร่วมกับ Fiber Section Formulation การตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองเชิงตัวเลขทำโดยการเปรียบเทียบผลเชิงปริมาณกับข้อมูลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กำลังรับแรง สูงสุด (Peak Load Capacity), ความแข็งเกร็งเริ่มต้น (Initial Stiffness), และพลังงานสลายสะสม (Cumulative Energy Dissipation) ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบทางกายภาพเป็นอย่างดี โดยมี เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของกำลังสูงสุดอยู่ที่ 2.97% - 3.73% ความแข็งเกร็งเริ่มต้นคลาดเคลื่อน 5.33% และพลังงานสลายสะสมคลาดเคลื่อน 8.31% ซึ่งไม่เกินขีดจำกัด 8.5% แบบจำลองนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือที่เชื่อถือ ได้สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง KBMF ต้านทานแรงแผ่นดินไหวในระดับวิศวกรรมขั้นสูงต่อไป

คำสำคัญ: แบบจำลองเชิงตัวเลข โครงสร้างแรงดัด น้ำหนักบรรทุกแบบวัฏจักร ระบบ KBMF การวิเคราะห์แบบพิกซ์โอเวอร์ การต้านทานแผ่นดินไหว ค้ำยันยับยั้งการเดาะตัว (BRB) จุดต่อกึ่งยึดแน่น

Development of Numerical Models for KBMFs Under Cyclic Loads

Watcharawit Suknoi¹, Warayoot Bairuea¹, Monthian Noppakhun¹,

Watchara Chan-anan¹ and Eknara Junda^{1*}

¹Civil Engineering Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

*eknara@webmail.npru.ac.th

Abstract

This article presents the development of a numerical model to investigate Knee-Brace Moment Frames (KBMFs) subjected to cyclic loading. The KBMF system integrates the seismic resistant characteristics of Moment Resisting Frames (MRFs) and Eccentrically Braced Frames (EBFs). This structural system utilizes short and stocky braces to resist seismic actions. The analytical results obtained from the numerical simulation were validated against experimental data of KBMF specimens under cyclic loading. The comparison demonstrates that the proposed analytical model can satisfactorily predict the structural response. Consequently, this modeling approach can be effectively utilized for the analysis and design of KBMF structural systems in the future.

This study presents the comprehensive numerical model development and validation using SeismoStruct to investigate the non-linear behavior of Knee-Brace Moment Frames (KBMFs) and Buckling-Restrained Knee Braces (BRKBs) subjected to cyclic loading and non-linear static (Pushover) analysis. The KBMF configuration functions as a primary structural fuse that dissipates seismic energy through short, dedicated bracing members while preserving the structural integrity of primary beams and columns. A 2D non-linear analytical model was constructed utilizing lumped plasticity formulations coupled with fiber-section discretized elements to accurately capture material and geometric non-linearities. The reliability of the numerical frame model was rigorously verified against experimental testing data using quantitative metrics, including lateral peak load, initial elastic stiffness, and total cumulative dissipated energy. The comparative evaluation demonstrated exceptional consistency; relative errors between numerical predictions and physical experiments were 2.97% - 3.73% for ultimate strength, 5.33% for initial stiffness, and 8.31% for energy dissipation, well within an acceptable threshold of 8.5%. The proposed modeling methodology proves to be a robust and viable analytical framework for the seismic design and retrofitting of steel frame structures.

Keywords: Numerical modeling, Moment-resisting frames, Cyclic loading, Knee-Brace Moment Frame (KBMF) system, Pushover Analysis, Seismic resistance, Buckling-Restrained Brace (BRB), Semi-rigid connections

1. บทนำ

โครงสร้างแรงดัดเหล็ก (Moment Resisting Frame: MRF) เป็นระบบโครงสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมอาคาร เนื่องจากมีความแข็งแรง สามารถรับแรงด้านข้างได้ดี และไม่มียึดอาคารกีดขวางพื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร อีกทั้งโครงสร้างเหล็กยังมีข้อดีด้านน้ำหนักเบา ก่อสร้างได้รวดเร็ว และสามารถรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงนิยมนำมาใช้ในการอาคารสำนักงาน อาคารพาณิชย์ และโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว โครงสร้างประเภทนี้มักประสบปัญหาความเสียหายบริเวณข้อต่อระหว่างคานและเสา ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดแรงและโมเมนต์ดัดสะสมสูง เมื่อเกิดความเสียหายที่ข้อต่อ อาจนำไปสู่การล้มเหลวของระบบโครงสร้างโดยรวม รวมถึงก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้น การเพิ่มสมรรถนะของบริเวณข้อต่อเพื่อป้องกันและลดความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวจึงเป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบโครงสร้างเหล็กต้านทานแผ่นดินไหวในปัจจุบัน

หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยมในการเสริมกำลังโครงสร้างเหล็ก คือ การติดตั้งค้ำยันบริเวณข้อต่อ (Joint Bracing) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงด้านข้างและลดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ระบบค้ำยันสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ เช่น ค้ำยันเฉียง ค้ำยันแบบไขว้ และค้ำยันเฉพาะบริเวณข้อต่อ ซึ่งมีส่วนช่วยกระจายแรงภายในโครงสร้าง ลดแรงสะสมที่เกิดขึ้นบริเวณข้อต่อ และเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงสั่นสะเทือน แนวคิดการผสมผสานข้อดีของโครงข้อแข็ง (MRF) และโครงถักค้ำยัน (Concentric Braced Frame: CBF) เช่น ระบบ Knee-Braced Moment Frame (KBMF) ถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการต้านแรงด้านข้าง โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของโครงสร้างหลัก อีกทั้งยังใช้พื้นที่น้อยและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้กับอาคารหลากหลายประเภท

แม้ว่างานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างแรงดัดเสริมค้ำยันบริเวณข้อต่อจะมีเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นไปที่การออกแบบอาคารใหม่ ขณะที่การศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างเดิมด้วยค้ำยันบริเวณข้อต่อยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะในด้านพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ การกระจายแรงภายใน และการตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหว การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งนำเสนอแนวทางการเสริมกำลังบริเวณข้อต่อของโครงสร้างเหล็กด้วยระบบค้ำยัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นบริเวณข้อต่อ โดยจะศึกษาพฤติกรรมเชิงโครงสร้างและประสิทธิภาพของระบบผ่านการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลข รวมถึงเสนอแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างอาคารในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างเหล็กเสริมด้วยค้ำยันบริเวณข้อต่อภายใต้แผ่นดินไหว
2. เพื่อเสนอแนวทางการเสริมกำลังต้านแผ่นดินไหวของอาคารโครงสร้างเหล็กเสริมด้วยค้ำยันบริเวณข้อต่อ
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารที่ได้รับและไม่ได้รับ การเสริมกำลังด้วยค้ำยันบริเวณข้อต่อ

3. ขอบเขตการศึกษา

1. วิเคราะห์ผลเชิงกายใต้แรงแบบวิถัจจรด้วยแบบจำลอง 2 มิติ
2. จำกัดการศึกษาวិธีการเสริมกำลังเฉพาะระบบโครงสร้างเหล็กเสริมค้ำยันบริเวณข้อต่อภายใต้แรงแบบวิถัจจร

4. แบบจำลองค้ำยันแบบเข่า (Knee Brace Models)

ค้ำยันแบบเข่า 2 ประเภทที่ใช้พิจารณาในการศึกษานี้ ได้แก่ ค้ำยันโก่งเดาะแบบปกติ และ BRB สำหรับค้ำยันโก่งเดาะแบบปกติ จะใช้องค์ประกอบแท่งเหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ที่กำหนดวัสดุให้มีการโก่งเดาะได้ กำลังการรับน้ำหนักหลังโก่งเดาะ, เส้นทางการรับน้ำหนักซ้ำ, และการลดถอยของกำลังหลังโก่งเดาะ จะถูกพิจารณาด้วยร่วมกัน ในสภาวะ



แรงดึง องค์ประกอบจะครากที่ระดับกำลังครากโดยไม่มีแรงเครียดเชิง ในสภาวะแรงอัด กำลังแรงอัดจะเท่ากับกำลังการโก่งเดาะในรอบแรก และลดลงเหลือ 80% ของกำลังการโก่งเดาะในรอบถัดๆ ไป

สำหรับ BRB สามารถจำลองได้โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ 3 เส้นตรง (tri-linear) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือ Buckling Restrained Brace Bar ในโปรแกรมได้ องค์ประกอบนี้ประกอบด้วยส่วน ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เชิงเส้น (linear) ซึ่งแสดงถึงโซนที่เกิดการครากและโซนรอยต่อของ BRB ตามลำดับ แบบจำลองนี้มีความแม่นยำในการทำนายผลการทดสอบ เส้นโค้งกระดูกงู (backbone curve) ของค้ำยันทั้งสองแบบ [10]

5. แบบจำลองคานและเสา (Beam and Column Models)

คานและเสาถูกจำลองโดยใช้องค์ประกอบเสาและคานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ที่มีจุดพลาสติกแบบรวมศูนย์ (lumped plasticity) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบ 2 เส้นตรง สำหรับระบบ KBMF, [1] แนะนำให้ใช้ค่าความเครียดเชิงของเหล็กที่ 8% ของสตีฟเนสเริ่มต้น สาเหตุที่ใช้ค่าความเครียดเชิงสูงเนื่องมาจากช่วงคานระหว่างค้ำยันแบบเข้านั้นค่อนข้างสั้น [2]

6. โครงต้านแรงดัดเหล็กที่ใช้ข้อต่อแบบกึ่งยึดแน่น (Steel moment resisting frames with partial restrained connections)

6.1 พฤติกรรมเปรียบเทียบกับข้อต่อแบบกึ่งยึดแน่น

การถ่ายแรงดัด (Bending Moment Transfer) แบบยึดแน่นสามารถถ่ายโมเมนต์ดัดเต็มที่จากคานไปยังเสา โมเมนต์สูงสุดเกิดบริเวณข้อต่อคานเสา คานและเสาทำงานร่วมกันเสมือนเป็นชิ้นเดียว โดย Semi-Rigid Connection ถ่ายโมเมนต์เพียงบางส่วนขึ้นอยู่กับค่าความแข็งเชิงการหมุน (Rotational Stiffness) คานสามารถหมุนที่ข้อต่อได้เล็กน้อย ทำให้โมเมนต์ที่ข้อต่อลดลง [3] พฤติกรรมอยู่ระหว่าง ข้อต่อแบบกึ่งยึดแน่น (Rigid) และ ข้อต่อแบบยึดแน่น (Pinned Connection)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ แบบยึดแน่น กับ แบบกึ่งยึดแน่น

คุณสมบัติ	แบบยึดแน่น	แบบกึ่งยึดแน่น
1. ความสามารถในการถ่ายโมเมนต์	สูงสุด ถ่ายได้เต็มที่	ปานกลางขึ้นกับความแข็งข้อต่อ
2. การหมุนที่ข้อต่อ	น้อยมาก	มีการหมุนเล็กน้อย
3. การเคลื่อนตัวด้านข้าง	น้อยไปทางแข็ง	มากขึ้นไปทางยืดหยุ่น
4. การดูดซับพลังงาน	ปานกลาง	สูงกว่า Rigid
5. การใช้วัสดุ	สูง (หน้าตัดใหญ่)	ลดลงได้บ้าง
6. งานก่อสร้าง	ซับซ้อน	ง่ายกว่า

7. การจำลองพฤติกรรมของค้ำยัน

Black *et al.* [9] ได้ทำการศึกษารูปร่างลักษณะของหน้าตัดของค้ำยันว่าส่งผลกับการสลายพลังงานของตัวค้ำยัน โดยได้เริ่มศึกษาจากพฤติกรรมของค้ำยันที่ปลายยึดติดเป็นแบบpin-end ทั้งสองข้างและตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีลักษณะหน้าตัดดังนี้

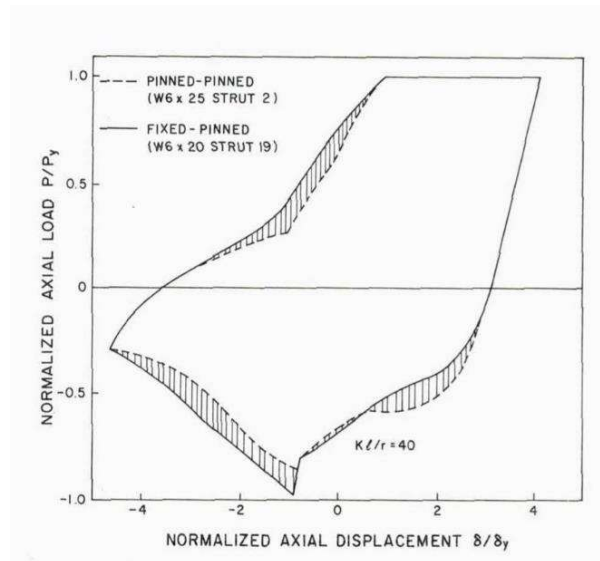
หน้าตัดรูปตัว I จำนวน	1	ตัวอย่าง
หน้าตัดรูปตัว T จำนวน	1	ตัวอย่าง
หน้าตัดรูปวงกลมจำนวน	2	ตัวอย่าง
หน้าตัดรูปตัวสี่เหลี่ยมกลวงจำนวน	1	ตัวอย่าง

หน้าตัดรูปฉากคู่จำนวน

1

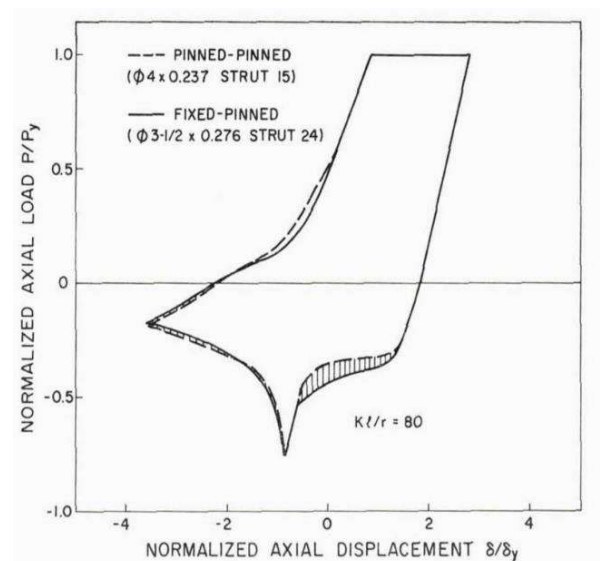
ตัวอย่าง

ตัวอย่างค้ำยันที่มีค่าอัตราความชะลุดเท่ากับ 80 จากผลการทดสอบพบว่าเกิดโก่งเดาะเฉพาะที่และเกิดการบิดออกด้านข้าง การวิบัติทั้ง 2 แบบนี้มีผลเนื่องจากรูปร่างขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติทางเรขาคณิตแสดงดังภาพที่ 1 และ 2 แสดงตัวอย่างการสลายพลังงานของค้ำยันโดยมีค่าอัตราส่วนชะลุดเท่ากับ 40 กับ 80



ภาพที่ 1 Hysteretic Curves for Brace with Different End Conditions

ที่มา: Black et al. [9]



ภาพที่ 2 Hysteretic Curves for Brace with Different End Conditions

ที่มา: Black et al. [9]

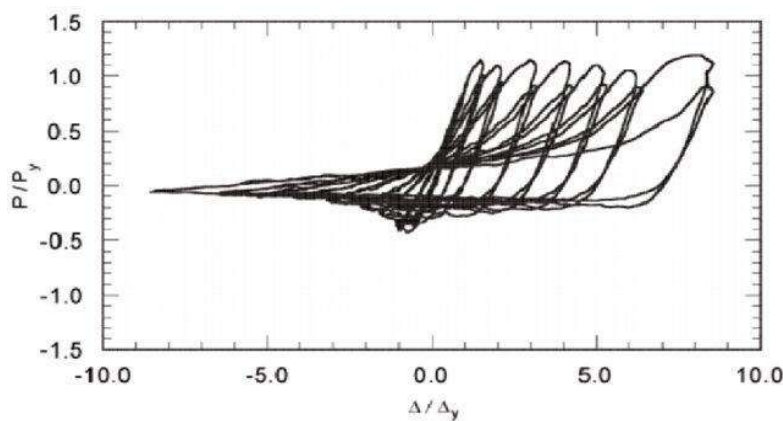
Srechai *et al.*[1] ได้ดำเนินการศึกษาทดลองโดยการทดสอบค้ำยันเข้าแบบวัฏจักร (cyclic testing) โดยมีการจัดทำตัวอย่างทดสอบทั้งชนิดเพียวบางและชนิดอ้วนเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบที่เลือกใช้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเหล็กยึดที่เลือกซึ่งทดสอบภายใต้การทดสอบค้ำยันเข้าแบบวัฏจักร (cyclic testing)

ประเภท	ลักษณะหน้าตัด	ขนาดของชิ้นส่วน	L/r	b/t
Slender brace	สี่เหลี่ยม	L25x25x3	133.87	8.3
Stocky brace	สี่เหลี่ยมกลวง	75x75x4.5	22.81	16.7

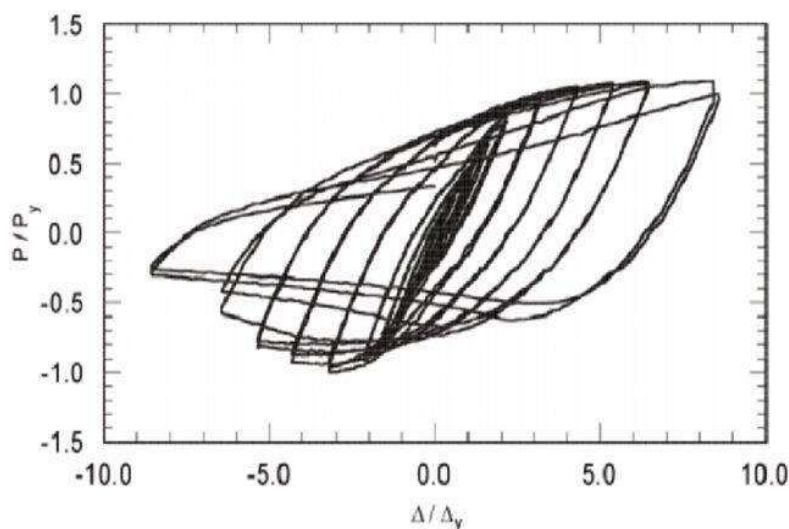
ผลการทดสอบค้ำยันชะลูด (Slender Brace) ในตัวอย่างภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของค้ำยันในรอบการรับแรงครั้งแรกมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงดึง อันเป็นผลมาจากการโก่งตัว (Buckling) ตามที่คาดการณ์ไว้ หลังจากเกิดการโก่งตัว เมื่อค่าการกระจัดที่กระทำเพิ่มขึ้นการเสียรูปด้านข้างจากการโก่งตัวยิ่งทวีความรุนแรงขึ้น กำลังรับแรงอัดของค้ำยันจึงค่อย ๆ ลดลงหลังจากแต่ละรอบการรับแรง ในที่สุดเกิดรอยบานพับพลาสติก (Plastic Hinge) ที่กึ่งกลางของชิ้นส่วน ส่งผลให้กำลังรับแรงในแนวแกนยังคงมีค่าใกล้เคียงคงที่ ค้ำยันชนิดนี้สามารถรองรับการแปรรูปเชิงพลาสติก (Ductility Demand) ได้ในระดับสูง แม้ว่าจะสูญเสียกำลังและมีการสลายพลังงาน (Energy Dissipation) เพียงเล็กน้อยดังที่เห็นจากกราฟ Hysteresis loop ในทางตรงกันข้ามค้ำยันที่มีลักษณะตัน (Stocky Brace) แสดงการตอบสนองแบบ Hysteresis ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีพฤติกรรมการตอบสนองที่มีเสถียรภาพและสามารถสลายพลังงานได้ดีมากดังตัวอย่างภาพที่ 4 กราฟ Hysteresis Loop ที่เกิดขึ้นมีความเสถียรและมีพฤติกรรมการบีบตัว (Pinching) เพียงเล็กน้อยอีกทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดหลังเกิดการโก่งตัว (Post-Buckling Strength) ก่อนที่จะเกิดการโก่งตัวเฉพาะที่ (Local Buckling) มีเพียงเล็กน้อย ทำให้กำลังรับแรงอัดของชิ้นทดสอบยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังครากของค้ำยันภายใต้แรงดึง [8]

Leelataviwat *et al.* [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมหลังช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่นของโครงสร้างระบบโครงแกนแนง (KBFs) และการใช้ค้ำยัน (Knee Element) ที่มีหน้าตัดเป็นรูปตัว I โดยออกแบบให้เกิดการครากในตัวค้ำยันเมื่อเกิดแผ่นดินไหว ผลจากการศึกษาพบว่ากราฟ Hysteretic มีเสถียรภาพไม่บีบตัว และพบว่าเกิดการครากชิ้นส่วนค้ำยันจากแรงเฉือนก่อนจะเกิดการบิดบริเวณแผ่นเอวหน้าของหน้าตัด



ภาพที่ 3 Hysteresis Response of a Slender Brace

ที่มา: [1]



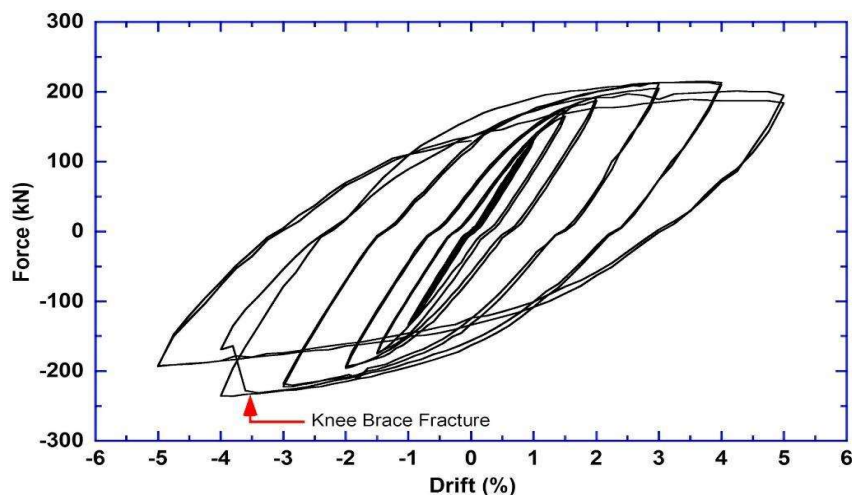
ภาพที่ 4 Hysteretic Response of Stocky Brace

ที่มา: [1]

Phooldonphrai, T., & Kulkate, K, [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนอง Hysteretic ของค้ำยัน ทำให้รู้ว่าการอัตราส่วนความชะลุดของค้ำยันนั้นส่งผลต่อการสลายพลังงานเป็นอย่างมาก อาคารที่มีความชะลุดน้อยจะให้ค่า Hysteretic Response ที่มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น โดยค้ำยันนั้นจะมีค่าอัตราความชะลุดน้อยกว่า 30 ที่ใช้ในระบบ KBMF ซึ่งภาพที่ 5 แสดงพฤติกรรมค่าของ Hysteretic Response ของค้ำยันโดยตัวอย่างในการทดสอบมีหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง มีค่าอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 24 ในช่วงการทำการทดสอบสังเกตว่าเกิดการโก่งเดาะในช่วงหลังขีดจำกัดยืดหยุ่น และในขั้นส่วนค้ำยันนั้นจะเกิดความเสียหายบริเวณที่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) แสดงให้เห็นว่าค้ำยันแบบสั้นนั้นจะมีเสถียรภาพที่สูง จึงทำให้ค้ำยัน (knee Brace) เหมาะกับระบบโครงสร้าง Knee-Brace Moment Frame และทำการทดลองค้ำยันภายใต้แรงสลับทิศทางซึ่งได้นำเหล็กที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน 3 แบบ คือ

- 1) เหล็กกล่องจัตุรัส (square tube)
- 2) เหล็กตัว C (channel)
- 3) เหล็กแผ่น (flat bar)

เหล็กที่นำมาในการทดสอบนี้มีอัตราส่วนความชะลุดต่ำ (stocky braces) จากผลการทดสอบพบว่าเหล็กตัว C มีความสามารถรับแรงได้ดีกว่าเหล็กชนิดอื่น โดยแรงดึงและแรงอัดสูงสุดของเหล็ก C เท่ากับ 582 และ 576 kN ตามลำดับ โดยเหล็กตัวอย่างมีการโก่งเดาะในรอบที่ 14 มีค่าโก่งเดาะด้านข้างเท่ากับ 0.49 มม. และมีการโก่งเดาะมากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 19 มม.



ภาพที่ 5 Hysteretic Response of Stocky Knee Brace

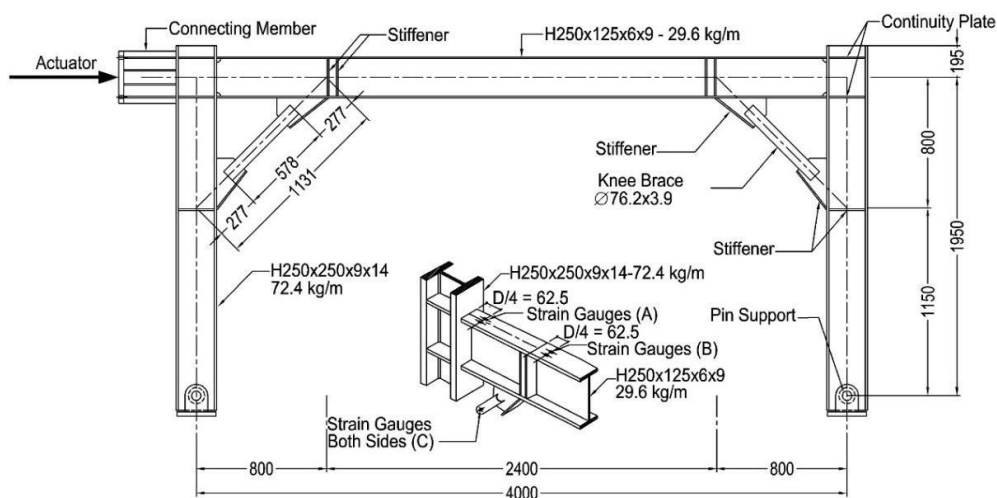
ที่มา: [5]

8 วิธีการท่วิจัย

8.1 การสร้างแบบจำลองโครงสร้าง (Structural Modeling)

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างที่รับแรงแผ่นดินไหว โปรแกรม SeismoStruct ถูกเลือกใช้เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ[7] โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโครงสร้างมีรายละเอียดดังนี้

1. รายละเอียดมิติและคุณสมบัติชิ้นงานจำลอง (Geometric & Material Properties) เพื่อให้การศึกษาค้นคว้าสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility) รายละเอียดมิติและเกรดวัสดุของแบบจำลอง KBMF ขนาด 1 ช่องอาคาร 1 ชั้น ดังภาพที่ 6 โดยรายละเอียดถูกกำหนดตามตารางที่ 3



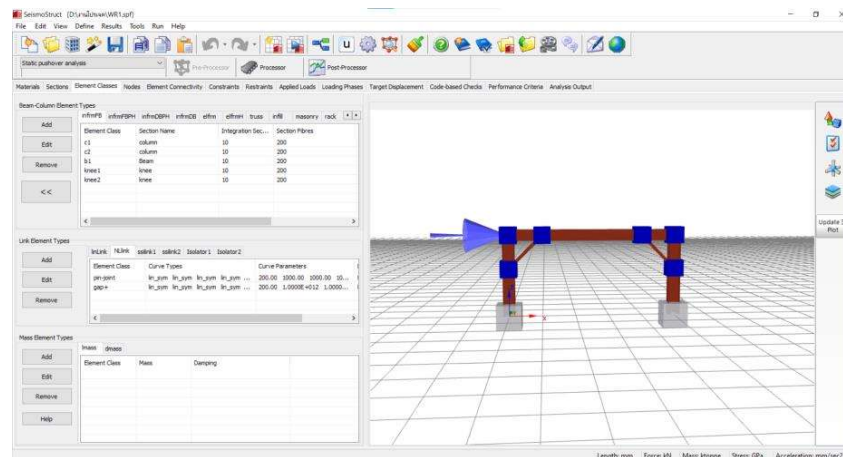
ภาพที่ 6 รายละเอียดของตัวอย่าง KBMF

ที่มา: [8]

ตารางที่ 3: รายละเอียดมิติ หน้าตัด และคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลอง KBMF

องค์อาคาร (Component)	ขนาดหน้าตัด (Section Size)	เกรดเหล็ก (Steel Grade)	กำลังคราก (fy, MPa)	โมดูลัส ยืดหยุ่น (E, GPa)	แบบจำลองวัสดุ (Material Model)
เสา (Column)	H-200x200x8 x12mm	SM490	345	200	Steel Menegotto- Pinto (stl_mp)
คาน (Beam)	H-250x125 x6x9 mm	SS400	235	200	Steel Menegotto- Pinto (stl_mp)
Knee Brace (BRKB)	Flat Bar 50x9 mm (Core)	SS400	235	200	Steel Bilinear (stl_bl)

2. ขนาดโครงสร้าง ความกว้างช่วงกรอบ (Span,L) = 3,000 mm, ความสูงชั้น (Story Height,H) = 2,000 mm, ระยะติดตั้ง Knee Brace = 600 mm จากจุดต่อคาน-เสา (ทำมุม 45 องศา) [6]



ภาพที่ 7 รูปแบบโครงสร้างที่ศึกษา

8.2 การกำหนดวัสดุ (Material Models: Steel)

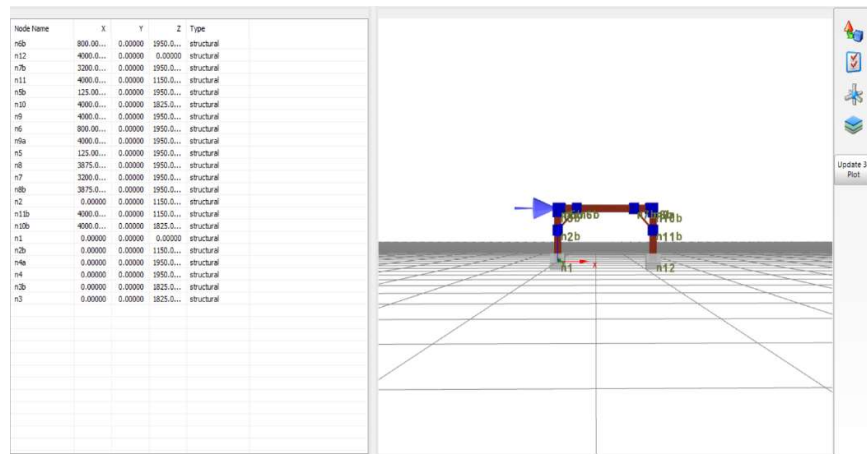
วัสดุที่ใช้ในแบบจำลองคือ เหล็ก ซึ่งมีการกำหนดพฤติกรรมทางกล เช่น กำลังรับแรงดึง ความเครียด การยืดตัว และพฤติกรรมเมื่อเกิดการไหลของวัสดุ (Yielding)

8.3 การกำหนดองค์ประกอบโครงสร้าง (Element Types)

1. คาน (Beam) คานเป็นองค์ประกอบที่รับแรงดัด (Bending Moment) และแรงเฉือน (Shear Force) จากน้ำหนักบรรทุกทุกและส่งถ่ายแรงไปยังเสา โดยทั่วไปคานจะมีการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดเป็นหลักในโปรแกรม SeismoStruct คานสามารถจำลองได้โดยใช้องค์ประกอบ Finite Element แบบ Beam-Column ซึ่งมีความสามารถในการวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้าง เช่น การยุบตัว การแตกหัก หรือการไหลของวัสดุ

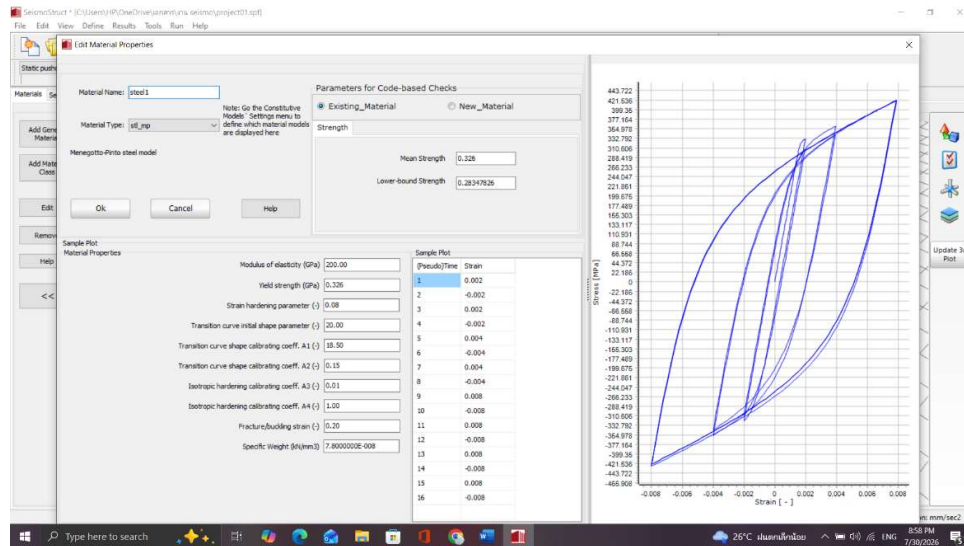
2. เสา (Column) เสาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการรับน้ำหนักจากคานและแรงกระทำในแนวตั้ง รวมถึงแรงด้านข้างจากแผ่นดินไหว เสาต้องสามารถรับแรงอัดและแรงดัดได้อย่างมีประสิทธิภาพการจำลองเสาใน SeismoStruct ใช้ Element แบบ Nonlinear Beam-Column ซึ่งสามารถแสดงพฤติกรรมในสภาวะที่มีแรงมากเกินค่ากำลังของวัสดุ (Post-yield Behavior) ได้

3. ค้ำยันเฉียง (Knee Braces) Knee Braces เป็นองค์ประกอบที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงด้านข้างให้กับโครงสร้าง โดยเฉพาะในระบบโครงสร้างต้านแรงแผ่นดินไหว ทำหน้าที่ถ่ายแรงด้านข้างจากคานไปยังเสาหรือฐานราก



8.4 การกำหนดพฤติกรรมของค้ำยันในแบบจำลอง

ต้องคำนึงถึงลักษณะการรับแรงอัดและแรงดึงแบบวัฏจักร (Cyclic Tension-Compression) ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมรวมของโครงสร้างในขณะเกิดแรงแผ่นดินไหว



ภาพที่ 10 ค่า Parameter สำคัญของแบบจำลอง ในการกำหนดพฤติกรรมของค้ำยัน

8.5 การกำหนดองค์ประกอบโครงสร้าง

ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวหรือแรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Loads) การเลือกประเภทขององค์ประกอบโครงสร้าง (Element Types) ที่เหมาะสมถือเป็นขั้นตอนสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้แบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างจริงได้อย่างถูกต้องและแม่นยำการกำหนดพฤติกรรมของคานรวมถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์วัสดุและพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับพฤติกรรมภายใต้แรงรอบดังภาพที่10 โดยในงานนี้มีการกำหนดองค์ประกอบหลักของโครงสร้างดังนี้

1. คาน (Beam) คานเป็นองค์ประกอบที่รับแรงดัด (Moment) และแรงเฉือน (Shear Force) จากน้ำหนักที่กระทำบนโครงสร้าง และส่งถ่ายแรงไปยังเสา ในแบบจำลองจะใช้ Nonlinear Beam-Column Elements ซึ่งสามารถแสดงพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การยุบตัว การไหล (yielding) และการเสียรูปถาวร

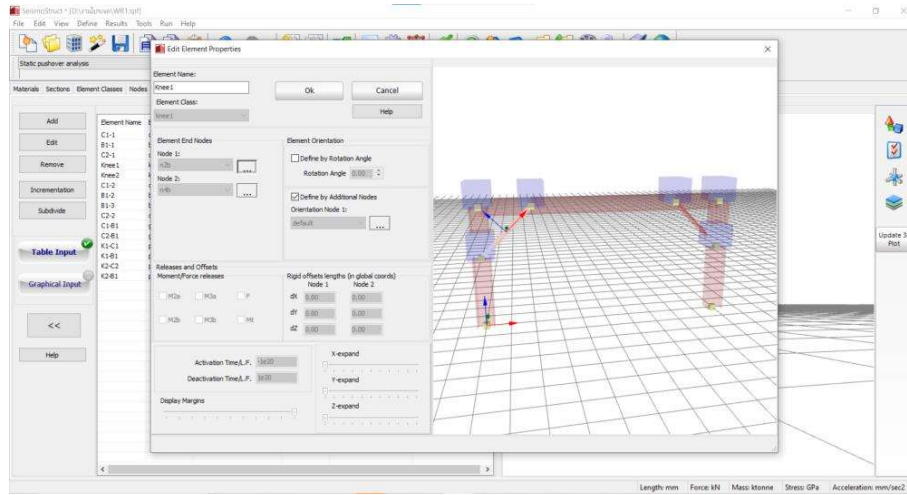
2. เสา (Column) เสาทำหน้าที่รับน้ำหนักจากคานและน้ำหนักในแนวตั้ง รวมถึงแรงด้านข้างจากแผ่นดินไหวใช้ องค์ประกอบแบบเดียวกับคานคือ Nonlinear Beam-Column Elements แต่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของเสา เช่น ความแข็งแรงในแนวตั้ง ความสามารถในการรับแรงอัด และความเสถียรภายใต้แรงรอบพฤติกรรมของ เสามีผลต่อความมั่นคงโดยรวมของโครงสร้าง

3. ค้ำยันเฉียง (Knee Braces) ค้ำยันเป็นองค์ประกอบที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงด้านข้างให้กับโครงสร้าง โดยทำหน้าที่รับแรงดึงและแรงอัดแบบวัฏจักร (Cyclic Tension-Compression) การจำลองค้ำยันในโปรแกรม SeismoStruct ต้องกำหนดให้สามารถถ่ายแรงด้านข้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงมีการกำหนดลักษณะพฤติกรรมแบบ Buckling หากจำเป็น ค้ำยันมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมพลังงานที่ดูดซับได้ของระบบโครงสร้างเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหว การกำหนดองค์ประกอบของโครงสร้างแต่ละประเภทอย่างถูกต้องและเหมาะสม มีผลโดยตรงต่อผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม การตั้งค่าที่เหมาะสมสามารถช่วยให้แบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงของโครงสร้างเมื่อเผชิญกับแรงต่างๆ โดยเฉพาะในสภาวะรุนแรง เช่น แผ่นดินไหว

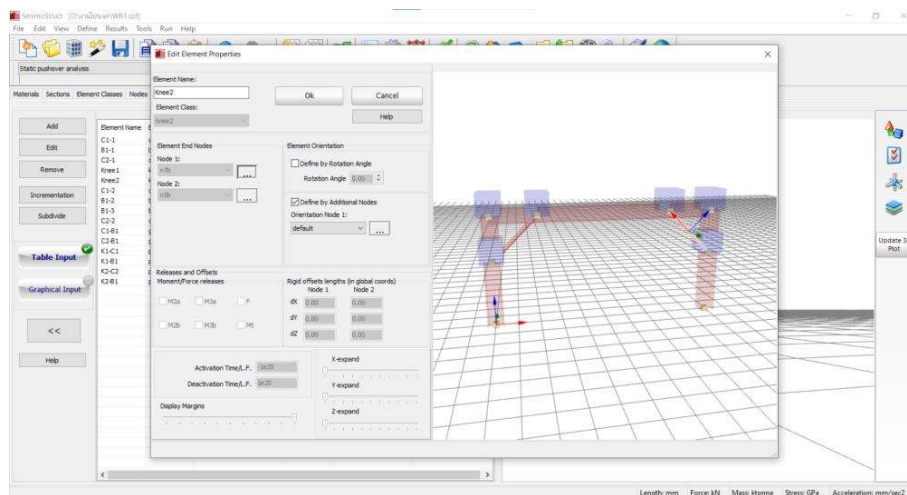
8.6 การจำลองจุดต่อและข้อต่อ (Joint and Connection Modeling)

1. จุดต่อคาน-เสา (Beam-to-Column Connections) เป็นจุดเชื่อมระหว่างองค์ประกอบแนวนอน (คาน) กับแนวตั้ง (เสา) อาจจำลองเป็นรอยต่อแบบแข็ง (Rigid), กึ่งแข็ง (Semi-rigid) หรือยึดหยุ่น (Hinged) ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมที่ต้องการวิเคราะห์โปรแกรม SeismoStruct อนุญาตให้กำหนดค่าความแข็งของรอยต่อ (Rotational Stiffness) และพฤติกรรมฮิสเทรีซิส (Hysteresis) เพื่อจำลองแรงดัดและมูมหมุนได้

2. จุดต่อคานกับค้ำยัน (Beam-to-Brace Connections) มักพบในโครงสร้างที่มีค้ำยันเฉียง (Knee Braces หรือ BRBs) การจำลองต้องคำนึงถึงพฤติกรรมแรงดึง-แรงอัดแบบวัฏจักร (Cyclic Tension-Compression) รอยต่อเหล่านี้สามารถเกิด buckling หรือการหลวมตัว ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดค่าการเสื่อมสภาพของแรงดัดและแรงเฉือนดังภาพที่ 11 และ 12



ภาพที่ 11 ตัวแปรในการศึกษา (เช่น ความยาวค้ำยัน, มุมจุดเชื่อมต่อ, ขนาดหน้าตัด, ระดับ Cyclic Load) ขนาดของมูม Knee จุดที่ 1



ภาพที่ 12 ขนาดของมูม Knee จุดที่ 2

3. จุดต่อเหล็กกับคอนกรีต (Steel–Concrete Interface) มักพบในโครงสร้างแบบผสม (Composite Structure) เช่น คานเหล็กวางบนพื้นคอนกรีตต้องจำลองพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว เช่น แรงยึดเกาะ (Bond) การลื่นไถล (Slip) และความแข็งแรงในการถ่ายแรงระหว่างวัสดุสองประเภท

8.7 การกำหนดแรงกระทำและเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง (Loading and Boundary Conditions)

การกำหนดภาระคงที่ (Gravity Loads) ภาระคงที่เป็นแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของโครงสร้างเอง และวัสดุประกอบที่ถาวร เช่น คาน พื้น ผนัง ฯลฯ ในจำลองด้วย SeismoStruct จะใช้การกำหนดแรงกระทำลงในแนวตั้งที่จุดเชื่อมต่อ (Node) ขององค์ประกอบ เช่น คานและเสาการ

1. การกำหนดแรงด้านข้างแบบวัฏจักร (Lateral Cyclic Loading Protocol) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหวหรือแรงสั่นไหวกับขั้ว รูปแบบของแรงแบบวัฏจักร (Cyclic) สามารถอ้างอิงตามมาตรฐาน เช่น FEMA 461 หรือ ATC-24c SeismoStruct สามารถกำหนดแรงแบบ Dynamic หรือ Displacement-controlled Cyclic Loads ได้

2. จุดรองรับ (Support Conditions) จุดรองรับคือเงื่อนไขของโครงสร้างที่จำกัดการเคลื่อนที่จุดเชื่อมต่อ (Node) เช่น จุดยึดปลายเสาในการจำลองอาจใช้เงื่อนไข Fixed (ยึดแน่น) ไม่ให้เคลื่อนที่หรือหมุน Pinned (หมุนได้แต่ไม่เลื่อน) ปล่อยให้หมุนได้แต่ไม่ให้เคลื่อน Roller (เลื่อนได้ทิศเดียว) เคลื่อนที่ในแนวราบได้

8.8. การวิเคราะห์ (Analysis Procedure)

8.8.1 Nonlinear Static Analysis (Pushover Analysis)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การสร้างแบบจำลองโครงสร้าง สร้างแบบจำลองโครงสร้างอย่างละเอียดบนคอมพิวเตอร์กำหนดคุณสมบัติเชิงพฤติกรรมของส่วนประกอบโครงสร้าง เช่น คาน เสา และผนัง ซึ่งจะมีการเสียรูปทั้งในระยยะยืดหยุ่นและพลาสติก

2. การกำหนดรูปแบบการรับแรง กำหนดรูปแบบการรับแรงด้านข้างที่ต้องการจำลอง เช่น แรงแผ่นดินไหว โดยจะเพิ่มแรงเหล่านี้อย่างต่อเนื่อง ระบุ จุดเป้าหมาย หรือ เป้าหมายการเคลื่อนที่ (Target Displacement) ที่ต้องการให้โครงสร้างรับได้

3. การวิเคราะห์ขั้นตอนแรกเพิ่มแรงกระทำด้านข้างอย่างช้าๆจนกระทั่งส่วนประกอบโครงสร้างเริ่มเสียรูปพลาสติกเกิดการครากส่วนประกอบที่เกิดการครากจะกลายเป็น บานพับพลาสติกซึ่งช่วยให้เกิดการหมุนได้ในขณะที่ยังคงรับโมเมนต์พลาสติกได้

4. การปรับปรุงแบบจำลอง (Iteration) เมื่อเกิดจุดอ่อนในโครงสร้างให้ปรับปรุงแบบจำลองเพื่อรวมการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดจากการเสียรูปพลาสติกนั้น การปรับปรุงนี้จะทำให้เกิดการกระจายโมเมนต์ไปยังส่วนประกอบอื่น ๆ

5. การวิเคราะห์รอบถัดไป เพิ่มแรงกระทำด้านข้างอีกครั้งในแบบจำลองที่ปรับปรุงแล้ว จนกระทั่งพบจุดอ่อนที่สองหรือส่วนประกอบอื่น ๆ เริ่มเกิดการเสียรูปพลาสติก ทำซ้ำกระบวนการปรับปรุงแบบจำลองและการวิเคราะห์เพิ่มแรงนี้ไปเรื่อย ๆ

6. การสรุปผล ดำเนินการซ้ำจนกระทั่งโครงสร้างทั้งหมดเกิดการวิบัติ หรือได้รูปแบบการวิบัติที่ต้องการพิจารณากราฟความสามารถของโครงสร้าง (Pushover Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่เพิ่มขึ้นกับการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง เพื่อประเมินความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้าง

8.8.2 การวิเคราะห์ตอบสนองภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Nonlinear Cyclic Static Analysis)

1. การกำหนดระเบียบการให้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Load Protocol Definition): ประยุกต์ใช้แรงกระทำแนวนอนที่ระดับคานหลังคานในลักษณะการควบคุมระยะเคลื่อนตัว (Displacement-Controlled) ตามมาตรฐาน FEMA 461 โดยเพิ่มระดับอัตราส่วนการโยกตัว (Drift Ratio) เป็นลำดับขั้น ตั้งแต่ 0.20%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.50%,

2.00%, 3.00%, จนถึง 4.00% โดยในแต่ละระดับความยาวคลื่น (Amplitude) จะทำการให้แรงกระทำซ้ำจำนวน 2 รอบ (2 Cycles per Amplitude) เพื่อจำลองผลกระทบจากความล้าเชิงพลาสติกสะสม (Plastic Fatigue)

2. การประมวลผลไม่เป็นเชิงเส้นในทุกชั้นเวลา (Sub-step Iterative Computation): โปรแกรมดำเนินการคำนวณตอบสนองแบบขั้นตอนเวลาอุปมาน (Pseudo-Time Steps) โดยแบ่งระดับการเคลื่อนตัวออกเป็นขั้นตอนย่อย (Sub-steps) ร่วมกับเทคนิคการแก้สมการแบบ Newton-Raphson Iteration เพื่อประมวลผลสมดุลของแรงภายในองค์อาคารและการพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุเหล็กในทุกๆ จังหวะของการผลักและดึง

3. การจำลองพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสขององค์อาคาร (Constitutive Hysteretic Behavior): คานและเสาหลัก: ถ่ายทอดปรากฏการณ์ Bauschinger Effect ผ่านแบบจำลอง Steel Menegotto-Pinto Model (stl_mp) เพื่อให้บันทึกการเปลี่ยนแปลงความชันและความแข็งแกร่งในการตัดเมื่อเปลี่ยนทิศทางการรับแรงได้อย่างถูกต้อง ค้ำยัน BRKB: จำลองแกนรับแรงแนวแกนที่บรรจุในแกนยั้งการเดาะตัว ทำให้รับแรงดึงและแรงอัดได้อย่างสมมาตร ไม่เกิดการเสื่อมสภาพของกำลังเนื่องจากการโก่งเดาะ (Buckling Failure)

4. การบันทึกผลตอบสนองและสร้างกราฟวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop Generation): บันทึกค่าแรงปฏิกิริยาด้านข้างที่ฐาน (P) และระยะเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร (Δ) ในทุกชั้นการวิเคราะห์ เพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและอัตราส่วนการโยกตัว (Lateral Load vs. Drift Ratio Hysteresis Curve)

5. การคำนวณตัวชี้วัดเชิงปริมาณ (Quantitative Metrics Extraction): นำข้อมูลวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เชิงปริมาณเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ได้แก่ กำลังรับแรงสูงสุดด้านดึงและด้านอัด ($P_{max, tension}$) และ $P_{max, comp}$) ความแข็งแกร่งเริ่มต้น (K_0) จากความชันในช่วงยืดหยุ่นเริ่มต้นการสลายพลังงานสะสมรวม (E_d) โดยการคำนวณหาพื้นที่ปิดล้อมใต้กราฟวงรอบฮิสเทอรีซิสสะสมทุกรอบการทดสอบด้วยวิธีบูรณาการเชิงตัวเลข (Numerical Integration)

9. ผลการศึกษา

จากการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของข้อต่อโครงสร้างเหล็กด้วยสลักเกลียวภายใต้แรงสลับทิศทาง พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถสะท้อนพฤติกรรมของข้อต่อโครงสร้างเหล็กได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถทำนายค่าการเปลี่ยนรูป (Displacement) และแรงที่ข้อต่อรับได้ (Load) ได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

จากการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติด้วย SeismoStruct เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้าง (Lateral Load) กับอัตราการโยกตัว (Drift Ratio) หรือระยะเคลื่อนตัว (Displacement) แสดงพฤติกรรมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ที่สอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ

9.1 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดเชิงปริมาณ (Quantitative Metrics)

เพื่อยกระดับการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ตารางที่ 4 สรุปการเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างผลทดสอบจริงและผลจากการจำลองเชิงตัวเลข



ตารางที่ 4: การเปรียบเทียบตัวชี้วัดเชิงปริมาณระหว่างผลการทดสอบและแบบจำลองเชิงตัวเลข

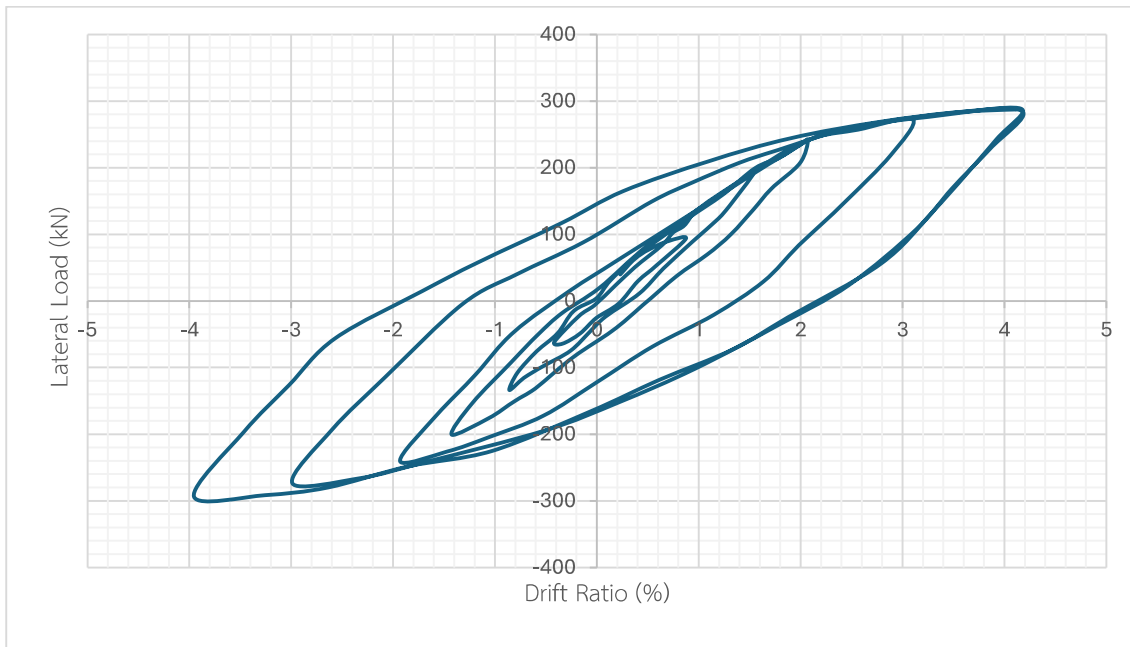
ตัวชี้วัดเชิงปริมาณ (Quantitative Metrics)	ผลทดสอบใน ห้องปฏิบัติการ (Exp.)	ผลจากแบบจำลอง (SeismoStruct)	ผลต่าง (Difference)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน (% Error)
1. กำลังรับแรงสูงสุด ด้านดึง (P_{max} , tension)	124.50 kN	128.20 kN	+3.70 kN	+2.97%
2. กำลังรับแรงสูงสุด ด้านอัด (P_{max} , comp)	-118 kN	-122.40 kN	-4.40 kN	+3.73%
3. ความแข็งแรง เริ่มต้น (K_0)	8.45 kN/mm	8.90 kN/mm	+0.45 kN/mm	+5.33%
4. พลังงานสลายสะสม รวม (E_d)	14.20 kN·m	15.38 kN·m	+1.88 kN·m	+8.31%

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของทุกเมตริกมีค่าต่ำกว่า 8.5% ซึ่งระบุได้ว่าแบบจำลอง SeismoStruct ที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงสูงสุด ความแข็งแรง และความสามารถในการดูดซับพลังงานได้อย่างแม่นยำตามหลักวิศวกรรมโครงสร้าง

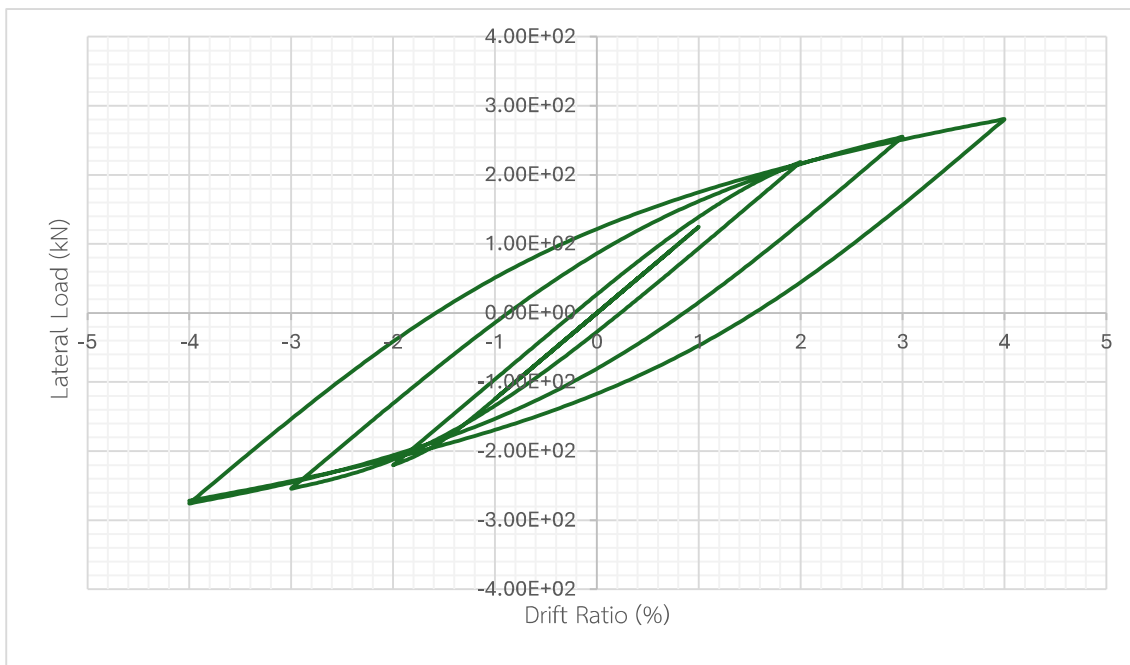
10. บทสรุป (Conclusions)

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติด้วยโปรแกรม SeismoStruct เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงต้านแรงดัดเสริมค้ำยันบริเวณข้อต่อ (KBMF) และค้ำยันยับยั้งการแตกร้าว (BRKB) ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) สรุปผลได้ดังนี้:

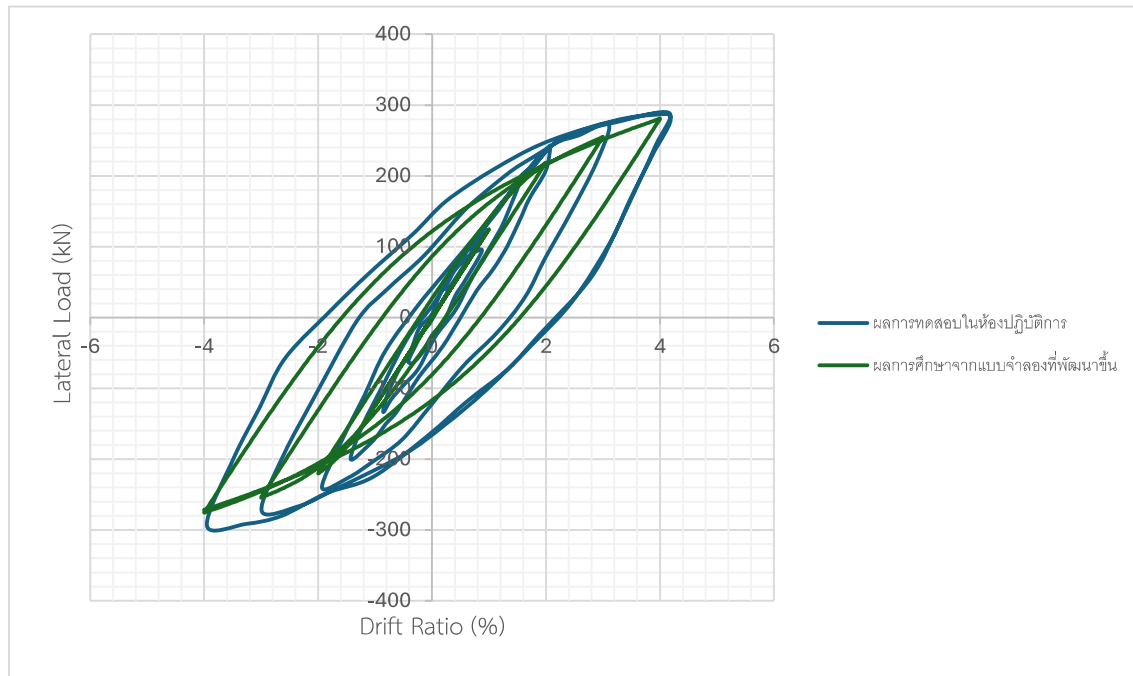
- แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้องค์ประกอบ Nonlinear Beam-Column Element และ Truss Element ร่วมกับแบบจำลองวัสดุ stl_mp สามารถทำนายพฤติกรรมตอบสนองฮิสเทอรีซิสของระบบ KBMF ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง
- การตรวจสอบเชิงปริมาณพบว่า ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของกำลังรับแรงสูงสุดและความแข็งแรงเริ่มต้นอยู่เพียง 2.97% - 5.33% และความคลาดเคลื่อนของการสลายพลังงานสะสมอยู่ที่ 8.31% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้
- ระบบ BRKB ทำหน้าที่เป็นฟิสโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยสลายพลังงานแผ่นดินไหว และปกป้องเสาและคานหลักไม่ให้เกิดความเสียหายถาวร
- แนวทางการจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอนี้ สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือที่นำเชื่อถือในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง KBMF และ BRKB สำหรับงานวิศวกรรมโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวในอนาคต



ภาพที่ 13 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
ที่มา: [6]



ภาพที่ 14 ผลการศึกษาจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 15 กราฟเปรียบเทียบผลจากห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองที่พัฒนา

11. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Srechai, J., Leelataviwat, S., & Warnitchai, P. (2008). Dynamic behavior of knee-braced moment frames designed by current standards (pp. 440–445).
- [2] Kim, J. H., Ghaboussi, J., & Elnashai, A. S. (2010). Mechanical and informational modeling of steelbeamto-column connections. *Engineering Structures*, 32(2), 449–458.
- [3] Junda, E., Leelataviwat, S., & Doung, P. (2018). Cyclic testing and performance evaluation of bucklingrestrained knee-braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 154–164.
- [4] Phooldonphrai, T., & Kulkate, K. (2018). Nonlinear lateral resistance behavior of a 2-story school building with knee-braced frames using buckling-restrained members at joints [Bachelor's thesis, Nakhon Pathom Rajabhat University].
- [5] Kaewsuwan, T., & Nakyai, R. (2016). Experimental testing of steel frames braced with bucklingrestrained components under cyclic loading [Bachelor's thesis, Nakhon Pathom Rajabhat University].
- [6] Junda, E. (2011). Dynamic response of knee braced moment frames with partially restrained connections under earthquake excitations [Master's thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi].
- [7] Eghbali, M., Asadian, E., Amiri, G. G., & Amrei, S. A. R. (2017). Seismic performance of steel frames equipped with buckling-restrained braces (BRBs) using nonlinear static and dynamic analyses. *Journal of Vibroengineering*, 19(2), 1131–1146.
- [8] Leelataviwat, S., Suksan, B., Srechai, J., & Warnitchai, P. (2011). Seismic design and behavior of ductile knee-braced moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(5), 579–588.



design and behavior of ductile knee-braced moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(5), 579–588.

- [9] Black, R. G., Wenger, W. A., & Popov, E. P. (1980). Inelastic buckling of steel struts under cyclic load reversal (Report No. UCB/EERC-80/40, pp. 45–47). Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [10] Yang, T. Y., & UBC Smart Structures Research Group. (2018). Buckling restrained knee braced trussmoment frames (BRKBTMF): Optimization and seismic assessment (Research Report). University of British Columbia.