



วิธีการสร้างแบบจำลองระดับมาโครของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะภายใต้แรงสลับทิศทาง

สุธิมา ประทุมสูตร¹, วัชรระ จันทร์อนันต์^{1*} และ เอกนรา จันดา¹

¹วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*sutimamint2547@gmail.com

บทคัดย่อ

ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (Buckling Restrained Braces, BRB) เป็นอุปกรณ์ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักในการวิเคราะห์โครงสร้างคือความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองคอมพิวเตอร์กับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นในห้วงปฏิบัติการ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองระดับมาโครของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (BRB) เพื่อให้มั่นใจว่าผลที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์อื่น ๆ ได้อย่างมั่นใจโดยไม่ต้องทำการทดสอบจริงซ้ำทุกครั้ง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระดับมาโคร โดยนำผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงภายใต้แรงสลับทิศทาง และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีการกำหนดพารามิเตอร์ทางวัสดุที่เป็นลักษณะเฉพาะของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้ในอนาคต

คำสำคัญ: ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงทดลอง แบบจำลองระดับมาโคร

Developing of Buckling Restrained Braces Macro Models and Cyclic Load Validation

Suthima Prathummasut¹, Watchara Chan-anan^{1*} and Eknara Junda¹

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

*sutimamint2547@gmail.com

Abstract

Buckling Restrained Braces (BRB) are high-performance earthquake-resistant devices. However, a major challenge in structural analysis is the discrepancy between computer simulation models and actual behavior observed in laboratories. Therefore, this study investigates methods for creating macro-level models of Buckling Restrained Braces (BRB) to ensure that computer simulation results are reliable and can be confidently used to simulate various scenarios without the need for repetitive experimental testing. This research focuses on the calibration and verification of BRB macro-level models by comparing computer simulation results with actual experimental results under cyclic loading. Furthermore, the developed models incorporate specific material parameters unique to Buckling Restrained Braces to serve as a guideline for future application of these models.

Keywords: Buckling Restrained Braces, Experimental Verification, Macro-modeling

1. บทนำ

ภัยพิบัติทางธรรมชาติโดยเฉพาะแผ่นดินไหวเป็นหนึ่งในปัจจัยเสี่ยงร้ายแรงที่สร้างความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารและสิ่งก่อสร้าง ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีและอุปกรณ์ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (Buckling Restrained Braces, BRB) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [1] เนื่องจากมีความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนของอาคารได้ดี โดยอาศัยพฤติกรรมความไม่เชิงเส้นของวัสดุในช่วงพลาสติกที่ซับซ้อนเพื่อดูดซับและสลายพลังงานจากแผ่นดินไหว [2] ซึ่งในกระบวนการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างที่ติดตั้งอุปกรณ์ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (BRB) จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์และคำนวณ ปัญหาหลักที่พบคือความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ ถึงแม้ว่าการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือที่สุด แต่มีข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่ายที่สูง ใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน และมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน [3] ด้วยข้อจำกัดนี้ การพัฒนาแบบจำลองระดับมาโครที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำจึงเป็นแนวทางที่คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองระดับมาโครของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะเพื่อให้มั่นใจว่าผลที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์นี้ในการจำลองสถานการณ์อื่น ๆ ได้อย่างมั่นใจโดยไม่ต้องทำการทดสอบจริงซ้ำทุกครั้ง



2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาแนวทางและพัฒนาแบบจำลองระดับมาโครของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะให้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

2.2 เพื่อสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระดับมาโคร โดยเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริงภายใต้แรงสลับทิศทาง

2.3 เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ทางวัสดุที่เป็นลักษณะเฉพาะของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะสำหรับใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้กับแบบจำลองโครงสร้างในอนาคต

3. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างและพัฒนาแบบจำลองระดับมาโครของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะที่เป็นหลักล้านไม่มีคอนกรีตบรรจุอยู่ใน วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Perform-3D เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่สามารถจำลองพฤติกรรมความไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Material Nonlinearity) และพฤติกรรมฮิสเทอรีซิส (Hysteretic Behavior) ในช่วงพลาสติกได้อย่างแม่นยำ โดยการสอบเทียบพารามิเตอร์และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอ้างอิงและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงจากงานวิจัยของ Chou and Chen (2010) ทำการสอบเทียบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และจำลองพฤติกรรมของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะภายใต้สภาวะแรงสลับทิศทางเพื่อประเมินความสามารถในการสลายพลังงาน โดยอ้างอิงเกณฑ์การให้แรงตามแนวทางข้อกำหนดการออกแบบด้านทานแผ่นดินไหว AISC

4. ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (Buckling Restrained Braces, BRB)

ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการสลายพลังงานที่ดี โดยมีลักษณะเด่น คือ สามารถยืดและหดตัวได้อย่างสมดุลทั้งแรงดึงและแรงอัดโดยไม่เกิดการโก่งเดาะ ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ 1) ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะที่มีคอนกรีตหรือมอร์ต้าบรรจุอยู่ในแสดงดังภาพที่ 1 2) ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะที่เป็นหลักล้านแสดงดังภาพที่ 2 ส่วนประกอบหลัก ๆ ที่สำคัญของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะมีดังนี้

4.1 แกนเหล็ก (Steel Core)

เป็นชิ้นส่วนหลักของค้ำยันที่ทำหน้าที่รับแรงตามแนวแกนและสลายพลังงานในระหว่างเกิดแผ่นดินไหว และถูกออกแบบให้เกิดการครากก่อนชิ้นส่วนอื่น ๆ

4.2 ปลอกหุ้ม (Casing)

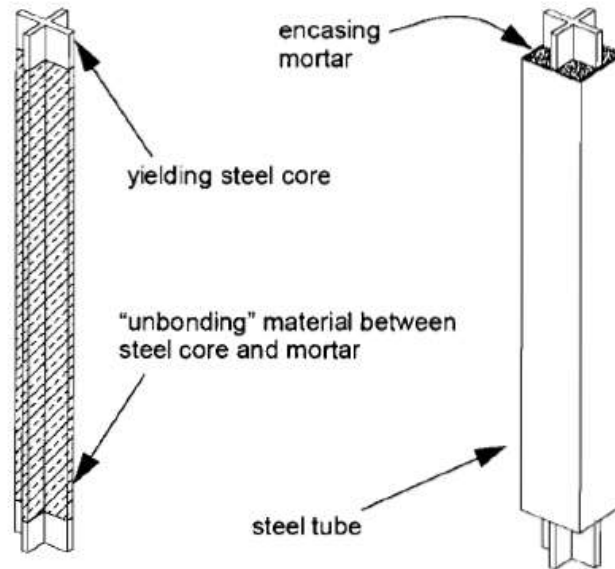
เป็นปลอกเหล็กที่หุ้มอยู่ภายนอกสุดของค้ำยันและมีวัสดุกรอกบรรจุอยู่ในส่วนใหญ่ใช้คอนกรีตหรือมอร์ต้า โดยปลอกหุ้มทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แกนเหล็กเกิดการโก่งเดาะในขณะรับแรงสูงสุด

4.3 แกนเหล็กส่วนยื่น (Unconfined Metal Core)

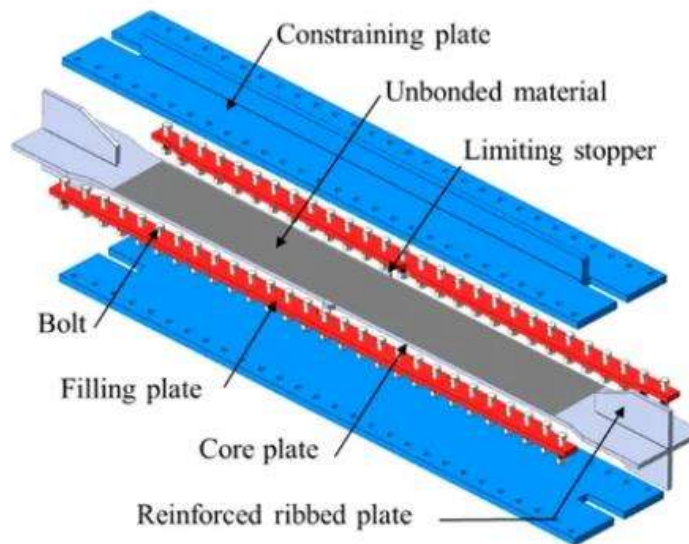
เป็นแกนเหล็กส่วนที่อยู่ภายนอกปลอกหุ้ม เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อค้ำยันเข้ากับโครงสร้างอาคาร

4.4 วัสดุลดแรงยึดเหนี่ยว (Non-stick Material)

เป็นวัสดุที่ใช้เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแกนเหล็กกับวัสดุที่กรอกบรรจุภายใน ชนิดของวัสดุที่ใช้โดยทั่วไปคือแผ่นยาง



ภาพที่ 1 ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะที่มีคอนกรีตหรือมอร์ต้าบรรจุอยู่ภายใน [4]

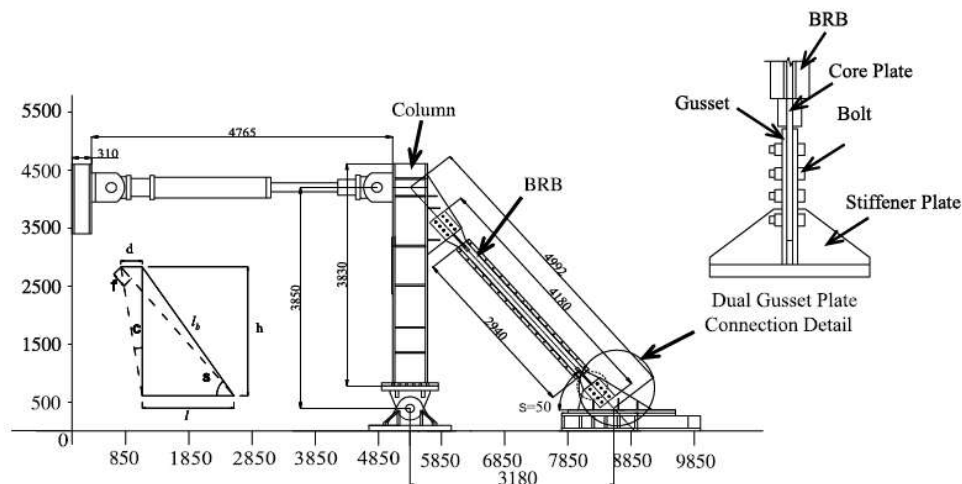


ภาพที่ 2 ค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะที่เป็นเหล็กล้วน [5]

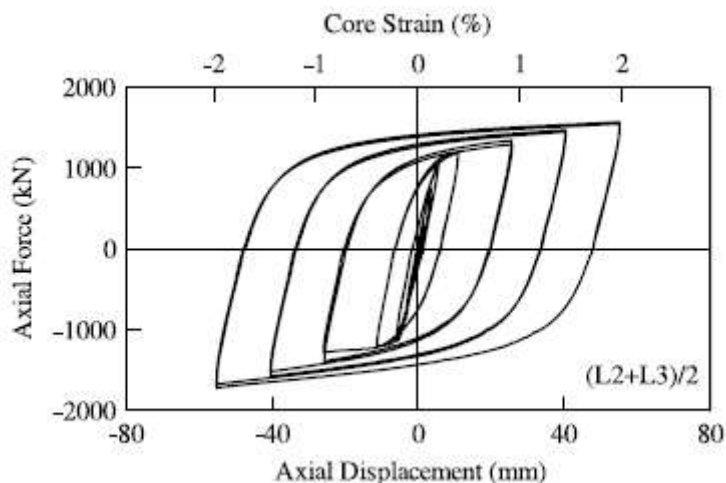
Chatree Ngamsangiem [4] ได้ทำการทดสอบค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะโดยทดสอบตัวอย่างขนาดเล็ก (มาตราส่วน 1:5) จำนวน 6 ตัวอย่าง ขนาดใหญ่ (มาตราส่วน 1:2) จำนวน 1 ตัวอย่าง และทดสอบกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ขนาดมาตราส่วน 1:2) จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบตัวอย่างขนาดเล็กที่มีลักษณะแตกต่างกัน เพื่อนำข้อดีและข้อเสียของแต่ละตัวอย่าง มาปรับใช้กับการทดสอบขนาดใหญ่ จากนั้นจึงนำไปทดสอบกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะเปรียบเทียบกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ หลังจากการทดสอบพบว่าการ

สลายพลังงานของระบบที่มีการเสริมกำลังด้วยค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะมีค่าสูงกว่า 5 เท่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนการเสริมกำลังด้วยค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ และผลการทดสอบสรุปได้ว่าค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

Chou and Chen [6] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะจำนวนทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ลักษณะการทดสอบค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะแสดงดังภาพที่ 3 โดยประกอบด้วยเสาหนึ่งต้นที่จุ่มรองรับเป็นจุดหมุน (Pin-supported) ยึดติดกับพื้นห้องปฏิบัติการและเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องไฮดรอลิก (Hydraulic Actuator) ขนาด 2,000 กิโลนิวตัน ตัวอย่างทดสอบค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะจะถูกติดตั้งให้มีความเอียงเป็นมุม 50 องศา โดยที่ปลายด้านล่างจะถูกยึดติดกับพื้นห้องปฏิบัติการส่วนปลายด้านบนจะถูกยึดติดกับเสา ทดสอบโดยการให้แรงแบบสลับทิศทาง (ดึงและอัด) ซึ่งแรงที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบใช้ตามข้อกำหนดการต้านทานแผ่นดินไหวของ AISI (AISI Seismic Provisions) ผลการทดสอบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับการเสียรูปของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะตัวอย่างทดสอบที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4 และได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis) กับค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะแต่ละตัวอย่างเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลและศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะในรูปแบบต่าง ๆ Rahnavard et al. [7] ได้เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะอย่างง่าย โดยเสนอให้สร้างแบบจำลองที่มีแกนหลักเพียงอย่างเดียวแทนการสร้างแบบจำลองที่มีทั้งแกนหลัก คอนกรีต และปลอกหุ้ม ซึ่งการสร้างแบบจำลองที่มีชิ้นส่วนครบทุกชิ้นส่วนจะทำให้เกิดความซับซ้อนและใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นาน รวมถึงคอนกรีตที่อยู่ในค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะนั้นไม่ได้มีหน้าที่ในการรับแรงทางด้านข้างแต่ทำหน้าที่เพียงแค่ป้องกันการโก่งตัวของแกนหลักเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องนำคอนกรีตมาวิเคราะห์ จึงได้มีการเสนอการสร้างแบบจำลองที่มีแกนหลักเพียงอย่างเดียวซึ่งจะช่วยให้สามารถลดความซับซ้อนและลดระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้างได้มากขึ้น



ภาพที่ 3 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างทดสอบค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (BRB) [6]



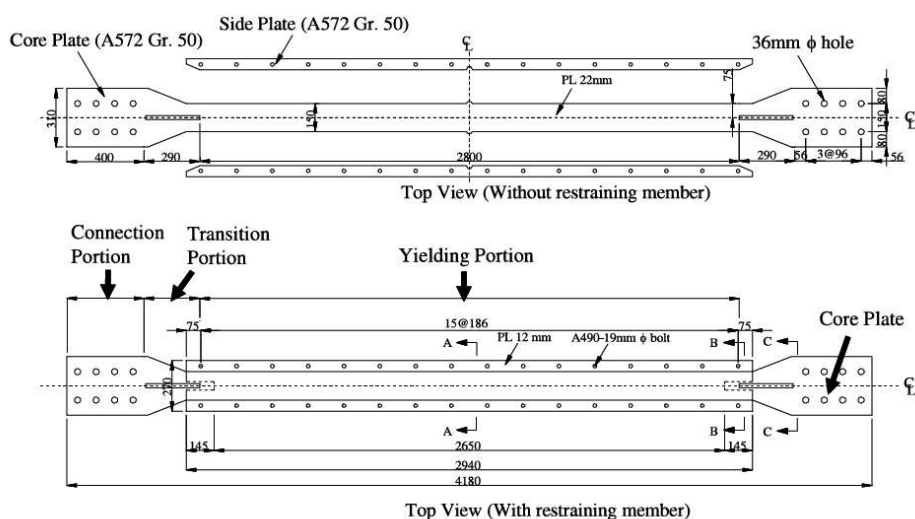
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับการเสียรูปของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (BRB) [6]

ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้นำผลการทดสอบค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยของ Chou and Chen [3] จำนวน 1 ตัวอย่าง ไปทำการศึกษาและเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

5. การสร้างแบบจำลองค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ

5.1 ลักษณะและขนาดของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ

การสร้างแบบจำลองค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะจะใช้โปรแกรม Perform 3D ในการวิเคราะห์ ซึ่งลักษณะและขนาดของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะใช้เหมือนกับตัวอย่างการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการดังแสดงในภาพที่ 5 โดยมีความยาวทั้งหมด 4,180 มิลลิเมตร มีความยาวระยะคราก 2,800 มิลลิเมตร แกนหลักส่วนยื่นมีความยาวด้านละ 690 มิลลิเมตร แกนหลักเป็นเหล็กรูปพรรณ A572 Gr.50 มีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีพื้นที่หน้าตัด 3,300 ตารางมิลลิเมตร แกนหลักส่วนยื่นมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปกากบาท และปลอกหุ้มเป็นเหล็กรูปพรรณ A572 Gr.50 หน้าตัดตรงน้ำ (Channel)



ภาพที่ 5 ลักษณะและขนาดของค้ำยันแบบไม่โก่งเดาะ (BRB) [6]

5.2 คุณสมบัติของวัสดุ

โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ที่ใช้ในแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 200 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร แกนเหล็กมีความเค้นที่จุดครากและความเค้นสูงสุดเท่ากับ 0.367 และ 0.525 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ปลอกหุ้มมีความเค้นที่จุดครากและความเค้นสูงสุดเท่ากับ 0.274 และ 0.425 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

5.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สอบเทียบ

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการสอบเทียบแสดงดังตารางที่ 1

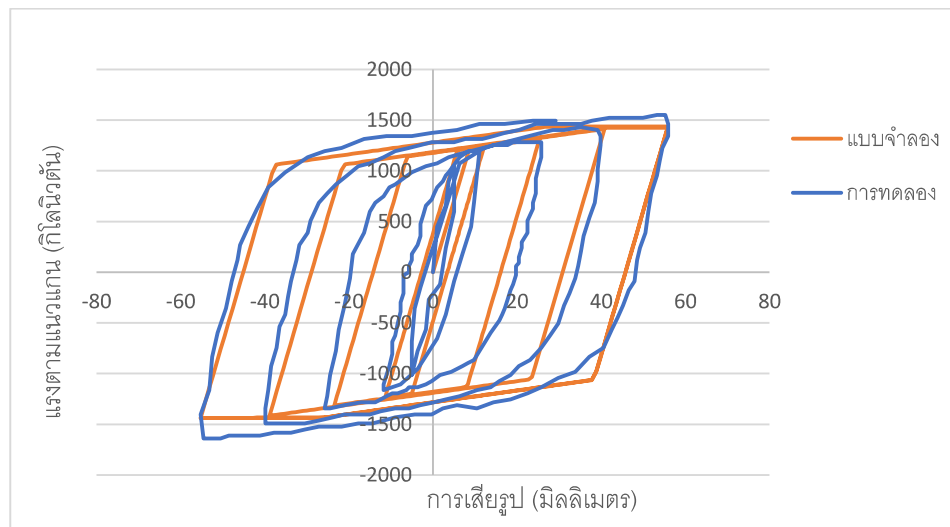
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบ

FY (kN)	FUO (kN)	FUH (kN)	KO (kN/mm)	KF (kN/mm)
1,211	1,392	1,574	142	1.42

โดยที่ FY คือ แรง ณ จุดคราก หาได้จากสมการ $F_y \cdot A$ โดยที่ F_y คือ ความเค้นที่จุดครากของแกนเหล็ก A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก , FUO คือ แรงสูงสุดที่ขีดจำกัดล่าง มีค่าเท่ากับ $1.15FY$, FUH คือ แรงสูงสุดที่ขีดจำกัดบน มีค่าเท่ากับ $1.3FY$, KO คือ ความชันในช่วงเริ่มต้น หาได้จากสมการ $(0.9 \cdot E \cdot A) / L$ โดยที่ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น L คือ ความยาวทั้งหมดของ BRB และ KF คือ ความชันในช่วงหลังจุดคราก มีค่าเท่ากับ $0.01KO$

5.4 ผลการสร้างแบบจำลอง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับการเสียรูปที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังภาพที่ 6 จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับการเสียรูปของแบบจำลองกับการทดสอบจริง

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบจริง

คุณสมบัติเชิงกล	การทดสอบจริง	แบบจำลอง	% ความแตกต่าง
ค่าความชัน (kN/mm)	186	136	26.88
กำลังดึงสูงสุด (kN)	1,552	1,438	7.35
กำลังอัดสูงสุด (kN)	1,641	1,439	12.31

6. สรุปผล

จากการเปรียบเทียบผลความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการเสียรูปภายใต้แรงสลับทิศทางระหว่างแบบจำลองคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริง พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายกำลังรับแรงดึงสูงสุดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดได้สอดคล้องกับการทดสอบจริง โดยมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 7.35 และ 12.31 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแบบจำลองยังขาดความแม่นยำในการทำนายความชันเริ่มต้น ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 26.88 โดยมีสาเหตุมาจากพฤติกรรมของวัสดุที่กำหนดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุที่เกิดขึ้นจริง รวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับกำหนดค่าความชันยังไม่แม่นยำเพียงพอ ดังนั้นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจึงมีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์และคาดการณ์พฤติกรรมเชิงกลเบื้องต้นของค้ำยันแบบไมโก้งเตาะสำหรับงานออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว แต่ยังคงต้องใช้ความระมัดระวังในการนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้งาน

7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Black, C., Makris, N., & Aiken, I. (2004). Inelastic behavior of buckling-restrained braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 130(9), 1381-1390.
- [2] Iwata, M., & Murai, M. (2006). Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a energy-dissipation device. *Journal of Constructional Steel Research*, 62 (1-2), 55-64.
- [3] Asgarian, B., & Shokrgozar, H. R. (2009). BRBF response modification factor estimation using pushover analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 290-298.
- [4] Chatree Ngamsangiem (2010). *Development of Buckling–Restrained Braces for Strengthening of Reinforced Concrete Buildings* [Master of Engineering] King Mongkut's University of Technology Thonburi (In Thai)
- [5] Chen, Y., Wang, X., Wu, K., & Zhang, Z. (2025). Cyclic Loading Response and Failure Mechanism of Composite Auxetic Perforated Buckling-Restrained Braces: A Comparative Study of Q235B and LY160 Steel. *Journal of Composites Science*, 9(11), 581.
- [6] Chou, C.-C., & Chen, S.-Y. (2010). Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 32, 2108-2121
- [7] Rahnavard, R., Naghavi, M., Aboudi, M., & Suleiman, M. (2018). Investigating modeling approaches of buckling–restrained braces under cyclic loads. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 476-488