

การใช้หลักวิธีการขับเคลื่อนด้วยข้อมูลเพื่อเลือกตัวแปรมาตรวัดความเข้มแผ่นดินไหว สำหรับประมาณค่าพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้

Using data-driven methods to select intensity measures

for estimating the seismic response of cross-laminated timber walls

เกษรินทร์ ชาวเกวียน¹, เอกนรา จันดา^{2*} และ วัชร จันทรอนันต์²

¹ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จ.นครปฐม

² วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: eknara@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

การระบุตัวแปรมาตรวัดความเข้มแผ่นดินไหว (intensity measures) อย่างถูกต้องมีความสำคัญต่อการออกแบบและการประเมินผลกระทบของโครงสร้างภายใต้แรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกมาตรวัดสำหรับการประมาณการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนของกำแพงไม้แผ่นไขว้ (cross-laminated timber) โดยใช้วิธีการขับเคลื่อนด้วยข้อมูล (data-driven method) วิธีการขับเคลื่อนด้วยข้อมูลถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ชุดข้อมูลขนาดใหญ่ที่ได้มาจากการผลการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงตัวเลข โดยพิจารณาตัวแปรมาตรวัดความเข้มที่หลากหลาย ใช้ขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะและแบบจำลองถดถอยทางสถิติเพื่อระบุตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดในการประมาณค่าพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ ภายใต้แรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว ผลการศึกษาให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีความสำคัญสำหรับการพิจารณาตัวแปรในการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างอาคารที่ใช้ระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ภายใต้แผ่นดินไหว ช่วยเสริมประสิทธิภาพการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างให้ดีขึ้น

คำสำคัญ: กำแพงไม้แบบแผ่นไขว้, วิธีการขับเคลื่อนด้วยข้อมูล, พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น, ตัวแปรมาตรวัดความเข้มแผ่นดินไหว

Abstract

Accurate identification of seismic intensity measures is important for the design and evaluation of the seismic response of structures. The research focused on selecting intensity measures for estimating the seismic response of cross-laminated timber (CLT) walls using data-driven methods. Data-driven approaches were employed to analyze a large dataset from numerical structural analysis results. Various candidate intensity measures were selected using data-driven based feature selection processes and statistical regression models were applied to identify the most influential variables in estimating the nonlinear behavior of CLT wall systems under earthquakes. The findings offer valuable insights into the appropriate intensity measure in the evaluation and design of CLT-walled building systems, enhancing the effectiveness of performance-based structural evaluations under earthquakes.

Keywords: cross-laminated timber wall, data-driven method, nonlinear behavior, intensity measure

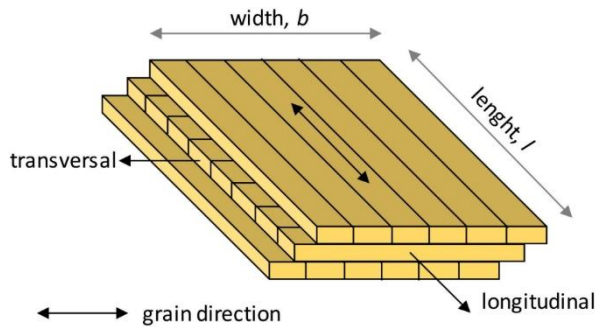
1. คำนำ

โครงสร้างไม้กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในงานก่อสร้างทั้งที่อยู่อาศัยและอาคารเชิงพาณิชย์ตลอดสองทศวรรษที่ผ่านมา แม้แต่ในประเทศที่ไม่ค่อยได้ใช้ไม้ในงานก่อสร้างก็เริ่มหันมาใช้วัสดุไม้มากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม้วิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาทิ ไม้ประสาน (Glue-Laminated Timber หรือ Glulam), ไม้แผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber หรือ CLT) และไม้วีเนียร์ประสาน (Laminated Veneer Lumber หรือ LVL) [1] ซึ่งกระบวนการทางวิศวกรรมเข้ามามีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความหลากหลายในการประยุกต์ใช้ไม้สำหรับงานก่อสร้างสมัยใหม่

ไม้แผ่นไขว้ ถือเป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีศักยภาพสูงด้านความยั่งยืนและกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง วัสดุนี้สามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบโครงสร้างได้หลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นผนังรับน้ำหนัก พื้น หรือหลังคา ข้อได้เปรียบที่สำคัญของไม้แผ่นไขว้ ได้แก่ การปล่อยคาร์บอนในระดับต่ำ (low carbon footprint) ความสะดวกในการติดตั้งและประกอบที่หน้างาน รวมถึงระยะเวลาก่อสร้างที่สั้นลง นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งเดิมอย่างคอนกรีตหรือเหล็ก [2] ไม้แผ่นไขว้ยังมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงกว่า คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลให้ไม้แผ่นไขว้กลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการก่อสร้างอาคารระดับกลางถึงระดับสูงในหลายประเทศทั่วโลก

ไม้แผ่นไขว้ เป็นวัสดุก่อสร้างที่ผลิตจากการนำชิ้นส่วนไม้ขนาดเล็กมาติดกาวและจัดเรียงในลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกัน (ดังแสดงในรูปที่ 1) การประกอบกันลักษณะนี้ส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงและความคงตัวในแนวระนาบ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบหลักในระบบต้านแรงด้านข้างในอาคาร เช่น โครงสร้างรับแรงลมและแรงแผ่นดินไหว อย่างไรก็ดี แม้ว่าไม้แผ่นไขว้จะมีศักยภาพสูงในการใช้งานด้านโครงสร้าง แต่การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงด้านข้างของอาคารที่ใช้วัสดุนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัด ประกอบกับธรรมชาติของไม้ที่มีความแข็งแรงแปร การออกแบบที่ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่การวิบัติแบบฉับพลันที่ไม่พึงประสงค์ได้ ด้วยเหตุนี้ วิศวกรจึงนิยมใช้ข้อต่อเหล็กในจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของระบบโครงสร้างนี้ เพื่อเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงาน โดยเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างต้องรับแรงกระทำรุนแรง เช่น แรงจากแผ่นดินไหว [3] ในช่วงที่ผ่านมา มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของกำแพงไม้แผ่นไขว้เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะแรงสลับทิศทางพบว่า พลังงานจากภายนอกส่วนใหญ่จะถูกสลายผ่านการเสียดสีของข้อต่อเหล็ก ในขณะที่ตัวแผ่นกำแพงไม้ยังคงอยู่

ในช่วงยืดหยุ่น [2,3] นอกจากนี้ ยังพบพฤติกรรมที่ซับซ้อนระหว่างการแกว่งตัวและการเลื่อนของผนังกำแพงไม้ภายใต้แรงด้านข้าง ซึ่งเกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น การบีบตัว (pinching) และแรงเสียดทาน (friction) ภายในชิ้นส่วนในโครงสร้างเอง



รูปที่ 1 การวางตัวเป็นชั้นของไม้แผ่นไขว้ [1]

ความรู้และเข้าใจการตอบสนองของโครงสร้างอาคารต่อการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและประเมินโครงสร้างด้านแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้นั้นถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดด้านพื้นที่และทรัพยากร การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์ข้อมูลจึงมีบทบาทสำคัญในการสร้างความเข้าใจที่ซับซ้อนนี้ ในทางตรงกันข้าม องค์ความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง มาตรการความเข้มแผ่นดินไหวและการตอบสนองของอาคารกำแพงไม้แผ่นไขว้ ยังน้อยมาก บทความนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมระหว่าง มาตรการความเข้มแผ่นดินไหวและการตอบสนองของอาคารกำแพงไม้แผ่นไขว้ ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองและเทคนิคทางวิทยาการข้อมูล

เพื่อให้สามารถกำหนดรูปแบบฟังก์ชันและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและสามารถจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับข้อมูลหลายมิติและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ระหว่าง มาตรการความเข้มแผ่นดินไหวและการตอบสนองของอาคารกำแพงไม้แผ่นไขว้ นั้น ทางผู้วิจัยเล็งเห็น สามารถการวิเคราะห์ข้อมูลเทคนิคการขับเคลื่อนด้วยข้อมูล เช่น อัลกอริทึม การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning, ML) [4] ในการจัดการกับข้อจำกัดที่ต่างๆ เทคนิคเหล่านี้ยังสามารถนำมาใช้คัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมของอาคารภายใต้แผ่นดินไหว เช่น การเสียรูป แรงภายในอาคาร ได้อีกด้วย

บทความนี้ นำเสนอวิธีการการขับเคลื่อนด้วยข้อมูล (data-driven method) เพื่อวิเคราะห์ชุดข้อมูลขนาดใหญ่ที่ได้มาจากการผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวนมาก กับตัวแปรมาตรการความเข้มที่หลากหลาย โดยจะใช้วิธีการขับเคลื่อนด้วยข้อมูลที่หลากหลายใช้ขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะและประเมินอิทธิพลสูงสุดในการประมาณค่าพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ ภายใต้แรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ไม้แผ่นไขว้

ไม้แผ่นไขว้ เป็นวัสดุก่อสร้างที่ประกอบจากชิ้นการนำไม้ขนาดเล็กมาจัดเรียงเป็นชั้น ๆจนเป็นแผ่นขนาดใหญ่ โดยแต่ละชั้นจะวางในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกันและยึดติดด้วยกาว โดยทั่วไปแผ่นไม้ไขว้ประกอบด้วยชั้นไม้ที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกันในทุกทิศทาง โดยจะนิยมใช้ไม้เนื้ออ่อนเป็น

หลัก แต่ในบางกรณีอาจเลือกใช้ไม้ที่มีความทนทานสูงเพื่อรองรับน้ำหนักในโครงสร้างหลัก รูปแบบการจัดเรียงชั้นไม้อาจแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศผู้ผลิต [1]

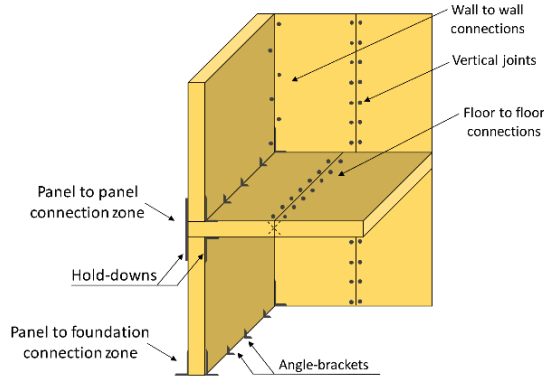
คุณสมบัติการซ้อนชั้นไม้ในรูปแบบนี้ทำให้แผ่นไม้ไขว้มีความแข็งแรงและคงตัวสูง ทำให้แข่งขันกับวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมในงานอาคารระดับกลางและสูงได้อย่างดี นอกจากนี้ข้อดีหลัก ๆ ของไม้แผ่นไขว้นี้คือน้ำหนักเบาแต่สามารถรองรับน้ำหนักได้ดี รับแรงทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง ด้านทานการเปลี่ยนแปลงความชื้น เก็บกักความชื้นและพลังงานความร้อนได้ รวมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถผลิตในขนาดที่เหมาะสมกับความต้องการทางสถาปัตยกรรม [1,2,3] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าไม้แผ่นไขว้จะได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ข้อมูลและมาตรฐานการออกแบบในระดับชาติและนานาชาติก็ยังมีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ในปัจจุบัน วิศวกรและผู้ออกแบบจำเป็นต้องอ้างอิงคู่มือและคำแนะนำที่จัดทำขึ้นโดยกลุ่มวิจัยตามผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการออกแบบอาคาร

2.2 โครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้

อาคารที่ใช้ระบบโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้ส่วนใหญ่เป็นอาคารระดับต่ำถึงปานกลาง โดยใช้แผ่นไม้ไขว้เป็นองค์ประกอบหลักในการรับแรงเฉือนในแนวตั้ง (ผนัง) และในแนวนอน (พื้น) แผ่นไม้ไขว้เหล่านี้ผลิตสำเร็จรูปจากโรงงานและนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ณ สถานที่ก่อสร้าง โดยใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อโลหะประเภทต่างๆ เช่น hold-downs, angle brackets, สกรู และตะปู การเชื่อมต่อระหว่างแผ่นไม้เข้าด้วยกันและระหว่างแผ่นไม้กับฐานรากนั้น จะเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อเหล็ก โดยทั่วไปจะใช้แผ่นเหล็กบางขึ้นรูปเป็นประเภท hold-downs และ angle brackets ซึ่งยึดติดกับแผ่นไม้ด้วยตะปูสกรู และยึดติดกับฐานรากด้วยสลักเกลียว

อาคารที่ใช้ระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้มีพฤติกรรมโครงสร้างแบบกล่อง ซึ่งมีข้อได้เปรียบเมื่อต้องรับแรงแผ่นดินไหวร่วมกับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง ในกรณีที่พิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่ง ระบบการเชื่อมต่อไม่จำเป็นต้องมีการออกแบบพิเศษ แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีแรงกระทำด้านข้างจากแรงลมหรือแผ่นดินไหว จะเกิดการกระจายแรงในระบบโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น ความซับซ้อนนี้เกิดจากการกระจายบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นไม้ด้วยกันและระหว่างแผ่นไม้กับฐานราก รวมถึงการสัมผัสระหว่างไม้กับไม้ และการถ่ายโอนแรงกดคั่นเนื่องมาจากแรงกระทำในแนวนอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นไม้หรือระหว่างแผ่นไม้กับฐานราก เป็นต้น

ปัจจุบัน มีการศึกษาพฤติกรรมของอาคารที่ใช้ระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้กันมากขึ้น เช่น โครงการ SOFIE [5] และ SERIES โดย Gavric et al. [6,7] ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมแบบสลับทิศทางของข้อต่อภายใต้การแรงที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า hold-down ที่ทดสอบภายใต้แรงดึงมีความแข็งแรงในทิศทางตามแนวแกนเป็นหลัก (แรงดึง) ในขณะที่ในทิศทางเฉือนจะไม่สามารถต้านทานแรงได้ เนื่องจากการพับตัวของแผ่นเหล็ก ส่วน angle bracket นั้นมีความแข็งแรงในทุกสองทิศทาง นอกจากนี้ ยังพบว่าพฤติกรรมการตอบสนองแบบสลับทิศทางของ hold-down มีลักษณะเป็นลูป (loop) ที่กว้างในทิศทางแรงดึงและเป็นศูนย์ในทิศทางแรงอัด ในขณะที่ angle bracket มีผลตอบสนองมีการบีบอัด (pinching) เนื่องจากการเลื่อนของตัวยึดในรูฝังของไม้ นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบอื่น ๆ ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อพยายามทำความเข้าใจในพฤติกรรมต่างๆของอาคารระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ [8,9] ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 2 การประกอบโครงสร้าง กำแพง-พื้น ในระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ [1]

2.3 ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหวกับพฤติกรรมของโครงสร้าง

ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว เป็นตัวแทนของค่าความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีผลโดยตรงต่อโครงสร้าง มีการใช้เทคนิคทางการชั่งเคลือด้วยข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว กับผลตอบสนองแผ่นดินไหวของโครงสร้าง อย่างแพร่หลาย เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (ML) ในการประเมินผลกระทบจากแผ่นดินไหวและการออกแบบโครงสร้างของ Hwang และคณะ [10] โดยได้ใช้เทคนิค ML ที่หลากหลายในการทำนายการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวและการพังทลายของโครงสร้างของโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก Paral และคณะ [11] ได้นำเสนอวิธีการที่อิงจากการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) สำหรับการประเมินสภาพของการเชื่อมต่อแบบกึ่งแข็ง (semi-rigid connection) ในโครงเหล็ก Neuyen และคณะ [12] ได้เสนอแบบจำลองการทำนายจาก ML สำหรับการประมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดในโครงสร้างที่มีการแยกฐานรากเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว (seismically isolated structures) สำหรับการประยุกต์วิธีการชั่งเคลือด้วยข้อมูลกับการทำนายพฤติกรรมในอาคารไม้ นั้นยังไม่มีการศึกษามากนัก งานวิจัยที่ผู้ประพันธ์พบเห็นเช่น การใช้ ML ในการตรวจสอบการตอบสนองของโครงสร้างไม้ต่อแรงภายนอก ของ Li และคณะ [13] โดยได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network - ANN) ในการประมาณความเสียหายในระยะยาวและความน่าจะเป็นของการพังทลายของชิ้นส่วนโครงสร้างไม้ ในขณะที่ Xin และคณะ [14] ได้เสนอวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (non-destructive testing) โดยใช้อัลกอริทึม ML เพื่อทำนายความหนาแน่นและคุณสมบัติทางกลของชิ้นส่วนไม้โบราณ

3. วิธีการศึกษา

3.1 คลื่นและตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว

เพื่อสร้างชุดข้อมูลจำนวนมากในการวิเคราะห์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจริง เราได้ใช้ชุดข้อมูลชุดคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 1,656 คลื่น จากการศึกษาของ Hancock และคณะ [15] เป็นชุดคลื่นอ้างอิง โดยชุดคลื่นนี้ได้คัดเลือกมาจากฐานข้อมูล NGA-West จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในเปลือกโลกส่วนผิวและขนาดโมเมนต์แมกนิจูดระหว่าง 5.1 ถึง 7.9 โดยมีค่า peak ground acceleration (PGA) เฉลี่ยอยู่ที่ 1 g

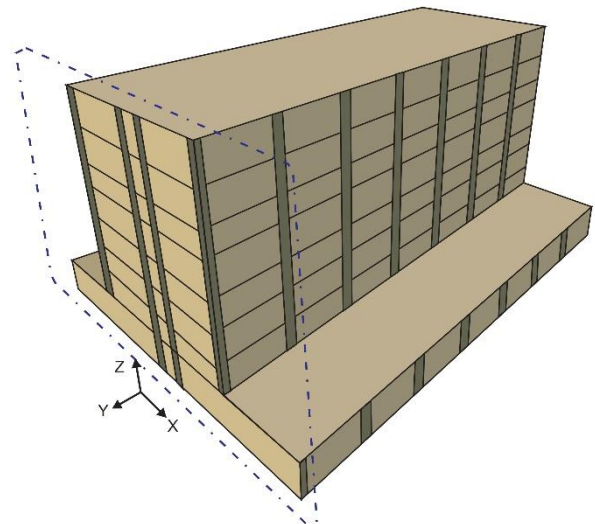
จากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวและชุดคลื่นแผ่นดินไหวข้างต้น ผู้ประพันธ์ได้เลือก 8 ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหวยอดนิยามหาค่าความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของอาคาร ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่หลากหลายดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว

Parameter	Abbreviation
Peak ground acceleration	PGA
Peak ground velocity	PGV
Peak ground displacement	PGD
Pseudo-acceleration response at the fundamental period of the building	$S_a(T_1)$
Arias intensity	I_a
5%-75% significant duration of the total Arias intensity	D_{5-75}
5%-95% significant duration of the total Arias intensity	D_{5-95}
Period ratio between the fundamental period of the structure and the mean period of the seismic record	T_1/T_m

3.2 ข้อมูลพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหวของอาคาร

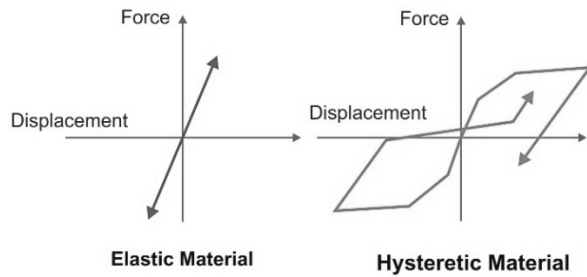
ฐานข้อมูลการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวภายใต้ชุดแผ่นดินไหวข้างต้นของอาคารระบบแผ่นไม้ไขว้ จำนวน 69 อาคาร แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3 ถูกนำมาวิเคราะห์ในการศึกษานี้ อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้คืออาคารพาณิชย์ทั่วไป อาคารทั้งหมดได้รับการออกแบบตามหลักการทั่วไปที่ระบุไว้ในมาตรฐานการออกแบบฯ [10] โดยปฏิบัติตามแนวคิดการออกแบบเชิงความสามารถและการตรวจสอบการควบคุมรูปแบบการบิด เพื่อให้อาคารสามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัยภายใต้การใช้งานจริง การศึกษานี้ได้พิจารณาความสูงอาคารที่หลากหลาย รวมถึงระดับความเหนียวในการออกแบบระดับต่าง ๆ



รูปที่ 3 ตัวอย่างอาคารที่ใช้ระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้

ผนังแกนอาคารได้รับการจำลองแบบในสองมิติใน OpenSeesPy [16] (รูปที่ 4) โดยพิจารณาความไม่เชิงเส้นของโครงสร้างและวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นในอาคารส่วนใหญ่จะกระจุกตัวที่ข้อต่อเหล็ก [2,3] องค์ประกอบไม่เชิงเส้นจึงถูกใช้เฉพาะที่ตำแหน่งเหล่านั้น ในขณะที่แผ่นไม้ไขว้ถูกจำลองด้วยองค์ประกอบแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น [2,17] องค์ประกอบเชื่อมโยงสองโหนด (2-node link elements) แบบไม่มีความยาว ประกอบกับการใช้วัสดุแกนเดียวแบบฮิสเทอเรซิส (hysteretic uniaxial material) ถูกเลือกใช้เพื่อจำลองเหล็กฉากรับแรงเฉือนและโมเมนต์ แบบจำลองเชิงตัวเลขได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับผล

การสอบในห้องปฏิบัติการโดยเปรียบเทียบการตอบสนองแบบฮิสเทอเรซิส และวิวัฒนาการการสลายพลังงาน ก่อนนำมาวิเคราะห์โครงสร้าง



รูปที่ 4 อธิบายความสัมพันธ์ แรง-การเสียรูป ที่ใช้ในแบบจำลอง

3.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการขับเคลื่อนด้วยข้อมูล

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างในการศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธี การวิเคราะห์พลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ของแบบจำลองผนังจำนวน 69 แบบจำลองภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 1,656 คลื่น จากนั้นนำ ผลตอบสนองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหวกับการ ตอบสนองของอาคาร ในการศึกษานี้จะใช้ค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างสัมพัทธ์ เป็นตัวแทนของการตอบสนองของอาคารกำแพงไม้แผ่นไขว้ โดยก่อนทำการ วิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในสเกลลอ็ก (logarithm) [2] เพื่อให้สอดคล้องกับธรรมชาติของข้อมูลแผ่นดินไหว

การประเมินส่วนแรกคือการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (r) ดังแสดงในสมการ ที่ 1 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ตัวแปร มาตรวัดแผ่นดินไหวที่มีต่อการเคลื่อนที่ด้านข้างสัมพัทธ์ ของกำแพงไม้แผ่น ไขว้ การวิเคราะห์ดำเนินการโดยทำการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับแต่ละ พารามิเตอร์ในตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหวทั้งหมดที่พิจารณาเทียบกับการเคลื่อนที่ด้านข้างสัมพัทธ์

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

เมื่อ x_i และ y_i คือค่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ i โดยพิจารณา ค่า $\bar{x}_i$ และ $\bar{y}_i$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

การประเมินส่วนที่สอง คือ การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลอง multi-linear seismic demand models แบบจำลองนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลองที่ใช้พารามิเตอร์เดียว ในบทความนี้ ได้มีการใช้ เทคนิคการขับเคลื่อนด้วยข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ตัวแปรมาตรวัด แผ่นดินไหว สองวิธี คือ การถดถอยแบบขั้นตอน (stepwise regression) และการถดถอยแบบลาสโซ (Lasso regression) โดยเมื่อใช้เทคนิคทั้งสองนี้ พารามิเตอร์ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหวที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมของ โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวจะถูกรวมไว้ในแบบจำลองการทำนาย ในขณะที่ พารามิเตอร์ที่ไม่สำคัญจะถูกมองข้ามไป

3.3.1 การถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise regression)

การถดถอยแบบขั้นตอนเป็นเครื่องมือที่น่าสนใจซึ่งใช้สำหรับระบุชุดตัวแปรที่ดีที่สุดโดยการเพิ่มหรือลบตัวแปรทีละตัวตามเกณฑ์ทางสถิติที่กำหนด การถดถอยแบบขั้นตอนมักใช้เพื่อลดตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องน้อยใน แบบจำลองเชิงเส้น เพื่อให้แบบจำลองง่ายขึ้นโดยยังคงความแม่นยำไว้ ใน

บทความนี้ จะใช้การถดถอยแบบขั้นตอนแบบ Forward (Forward stepwise regression) ซึ่งวิธีนี้จะเริ่มต้นด้วยจุดตัดแกน y (intercept) จากนั้นเพิ่มตัวแปรตัวเลือกทีละตัวที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง มากที่สุด โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินแบบจำลองของบทความนี้ คือค่า R^2 และ RMSE ดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

เมื่อ $\hat{y}_i$ ค่า y จากการประมาณด้วยแบบจำลอง, y_i ค่า y จาก ข้อมูลจริง และ n จำนวนข้อมูล

3.3.2 การถดถอยแบบลาสโซ (Lasso regression)

การถดถอยแบบลาสโซ (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) เป็นเทคนิคการหดตัวที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย น้อยลงเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำนายที่ดีขึ้นของแบบจำลอง โดยภายใต้การทำงานของกระบวนการนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญจะถูกเก็บไว้ ขณะที่พารามิเตอร์ที่ไม่สำคัญจะถูกลดสัมประสิทธิ์ของการถดถอยให้น้อยลง จนเป็นศูนย์

นอกจากนี้ การศึกษานี้ได้ใช้การตรวจสอบแบบ 10-cross validation ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งจากการถดถอยแบบ ขั้นตอนและการถดถอยแบบลาสโซ ในการแบ่งข้อมูลแบบ 10-fold โดย ข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 10 ส่วน โดย 9 ส่วนใช้สำหรับการฝึกฝน (training) และอีก 1 ส่วนใช้สำหรับการตรวจสอบ (validation) กระบวนการฝึกฝน และตรวจสอบจะดำเนินการทั้งหมด 10 ครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของ แต่ละส่วน จากนั้นค่าความแม่นยำทั้ง 10 ค่าจะถูกเฉลี่ยเพื่อแสดง ประสิทธิภาพรวมของแบบจำลอง

4. ผลการศึกษา

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้า เริ่มจาก การหาสหสัมพันธ์ของตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 3 แสดงผลลัพธ์ของการถดถอยแบบขั้นตอน และการ เปลี่ยนแปลงของข้อผิดพลาดของแบบจำลอง จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าการ ปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำนาย (จากการลดลงของข้อผิดพลาด) ค่อยๆลดลงเมื่อมีตัวแปรเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยผลการศึกษพบว่า PGV ถูก เลือกเป็นตัวแปรแรก จากนั้นคือ $S_a(T_1)$ และ T_1/T_m เมื่อพิจารณาจาก วรรณกรรมพบว่า PGV ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นตัวแปร มาตรวัดแผ่นดินไหวที่ดีที่สุดสำหรับการตอบสนองทางโครงสร้างต่อแผ่นดินไหว [18,19] ในขณะที่ค่าความเร่งเชิงสเปกตรัม โดยเฉพาะ $S_a(T_1)$ เป็นที่ยอมรับ กันอย่างกว้างขวางเช่นกัน น่าสนใจที่ T_1/T_m เป็นหนึ่งในตัวแปรที่ได้รับการ คัดเลือก แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาการสั่นพ้องของอาคาร กับคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

ตารางที่ 2 สหสัมพันธ์ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว

	PGA	PGV	PGD	D ₅₋₇₅	D ₅₋₉₅	I _a	T ₁ /T _m	S _a (T ₁)
PGA								
PGV	0.8							

PGD	0.3	0.7						
D ₅₋₇₅	-0.7	-0.4	0.1					
D ₅₋₉₅	-0.7	-0.4	0.1	0.9				
I _a	1.0	0.9	0.5	-0.5	-0.5			
T ₁ /T _m	0.3	0.0	-0.2	-0.4	-0.4	0.2		
S _a (T ₁)	0.6	0.7	0.5	-0.3	-0.3	0.7	-0.4	

ตารางที่ 3 ผลการคัดเลือกตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหวด้วย Stepwise

จำนวน	ตัวแปรมาตรวัดแผ่นดินไหว	MSE
1	PGV	0.305
2	PGV, T ₁ /T _m	0.281
3	PGV, T ₁ /T _m , S _a (T ₁)	0.243

ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยแบบลาสโซ่ ที่ใช้ค่า $\lambda = 0.01$ ซึ่งพบว่าทั้งสามตัวแปร PGV, T₁/T_m, S_a (T₁) ได้รับการคัดเลือกเช่นเดียวกับการถดถอยแบบขั้นตอน อย่างไรก็ตาม ความสำคัญของแต่ละตัวแปรกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของอาคารมีความแตกต่างกัน โดยจะพบว่า T₁/T_m มีผลกับพฤติกรรมการเสยรูดด้านข้างของโครงสร้างสูงสุด รองลงมาคือ S_a (T₁) ที่ค่า 0.57 และ 0.27 ตามลำดับนอกจากนี้ ตัวแปรอื่นๆมีผลน้อยมาก

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยแบบลาสโซ่

Parameter	Estimated coefficient
PGV	0.07
D ₅₋₇₅	-0.01
I _a	0.02
S _a (T ₁)	0.27
T ₁ /T _m	0.57

5. สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

บทความนี้ นำเสนอวิธีการการขับเคลื่อนด้วยข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ การถดถอยแบบขั้นตอน และการถดถอยแบบลาสโซ่ ในการวิเคราะห์ชุดข้อมูลขนาดใหญ่ที่ได้มาจากการผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว (การเคลื่อนที่ด้านข้างสัมพัทธ์) กับตัวแปรมาตรวัดความเข้มที่หลากหลาย ใช้ขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะและประเมินอิทธิพลสูงสุดในการประมาณค่าพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ ภายใต้แรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วคลื่นสูงสุด (PGV) อัตราส่วนคาบการสั่นของอาคาร และคลื่นแผ่นดินไหว (T₁/T_m) และสเปกตรัมการตอบสนองที่คาบการสั่นพื้นฐานอาคาร S_a (T₁) มีความสำคัญและมีผลต่อการเคลื่อนที่ด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงสร้างระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ จากค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยแบบลาสโซ่ของทั้ง 3 ตัวแปรที่มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่ายิ่งค่าดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น การเคลื่อนที่ด้านข้างสัมพัทธ์ของโครงสร้างจะมากขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ทูพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2568 และ ผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ในการสนับสนุนการนำเสนอบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sandoli A, D'Ambra C, Ceraldi C, Calderoni B, Prota A. Sustainable cross-laminated timber structures in a seismic area: Overview and future trends. Applied Sciences (Switzerland) 2021;11:1–24.
- [2] Junda E, Málaga-Chuquitaype C, Chawglen K. Interpretable machine learning models for the estimation of seismic drifts in CLT buildings. Journal of Building Engineering 2023;70.
- [3] Junda E, Málaga-Chuquitaype C. Seismic acceleration demands in tall CLT buildings, predictive models and intensity measures. Engineering Structures 2024;298:117024.
- [4] Macedo J, Liu C, Soleimani F. Machine-learning-based predictive models for estimating seismically-induced slope displacements. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2021;106795.
- [5] Minowa C, Kawai N. SOFIE project – 3D shaking table test on a sev en-storey full-scale cross-laminated timber building 2013;42:2003–21.
- [6] Gavric I, Fragiaco M, Ceccotti A. Cyclic behavior of CLT wall systems: Experimental tests and analytical prediction models. Journal of Structural Engineering (United States) 2015;141:1–14.
- [7] Aloisio A, Alaggio R, Fragiaco M. Fragility functions and behavior factors estimation of multi-story cross-laminated timber structures characterized by an energy-dependent hysteretic model. Earthquake Spectra 2021;37:134–59.
- [8] Flatscher G, Bratulic K, Schickhofer G. Experimental tests on cross-laminated timber joints and walls. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings 2015;168:868–77.
- [9] Tomasi R, Sartori T. Mechanical behaviour of connections between wood framed shear walls and foundations under monotonic and cyclic load. Construction and Building Materials 2013;44:682–90.
- [10] Hwang SH, Mangalathu S, Shin J, Jeon JS. Machine learning-based approaches for seismic demand and collapse of ductile reinforced concrete building frames. Journal of Building Engineering 2021;34:101905.
- [11] Paral A, Singha Roy DK, Samanta AK. A deep learning-based approach for condition assessment of semi-rigid joint of steel frame. Journal of Building Engineering 2020:101946.
- [12] Nguyen HD, Dao ND, Shin M. Machine learning-based prediction for maximum displacement of seismic isolation systems. Journal of Building Engineering 2022;51:104251.
- [13] Li Z, Tao D, Li M, Shu Z, Jing S, He M, et al. Prediction of

- damage accumulation effect of wood. *Materials* 2019;12:1243.
- [14] Xin Z, Ke D, Zhang H, Yu Y, Liu F. Non-destructive evaluating the density and mechanical properties of ancient timber members based on machine learning approach. *Construction and Building Materials* 2022;341:127855.
- [15] Hancock J, Bommer JJ, Stafford PJ. Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2008;1585–607.
- [16] Zhu M, McKenna F, Scott MH. OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX* 2018;7:6–11.
- [17] Demirci C. Seismic Response of Multi-Storey Cross-Laminated Timber Buildings. Imperial College London, 2019.
- [18] Heresi P, Miranda E. Intensity measures for regional seismic risk assessment of low-rise wood-frame residential construction. *Journal of Structural Engineering* 2021;147:https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002859.
- [19] Morfidis K, Kostinakis K. Seismic parameters' combinations for the optimum prediction of the damage state of R/C buildings using neural networks. *Advances in Engineering Software* 2017;106:1–16.