

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้ภายใต้แรงสลับทิศทาง Development of a computational model for cross-laminated timber wall structures under cyclic loading

เอกนรา จันดา^{1,*} อุมพร ปฏิพันธุ์ภูมิสกุล¹ ดวงภา วาณิชสรรพ¹ และ ธาตุทธิ์ ส่งแสง¹

¹ วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จ.นครปฐม

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

บทคัดย่อ

แบบจำลองโครงสร้างที่มีความแม่นยำสามารถช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างได้ดียิ่งขึ้นอีกทั้งยังใช้งบประมาณต่ำเมื่อเทียบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber: CLT) ภายใต้แรงสลับทิศทาง ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้และข้อต่อระหว่างแผ่นไม้ นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองกับข้อมูลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ภายใต้แรงสลับทิศทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคารที่ใช้โครงสร้างกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ต่อไป

คำสำคัญ: กำแพงไม้แบบแผ่นไขว้, แรงสลับทิศทาง, แบบจำลอง, พฤติกรรมโครงสร้าง

Abstract

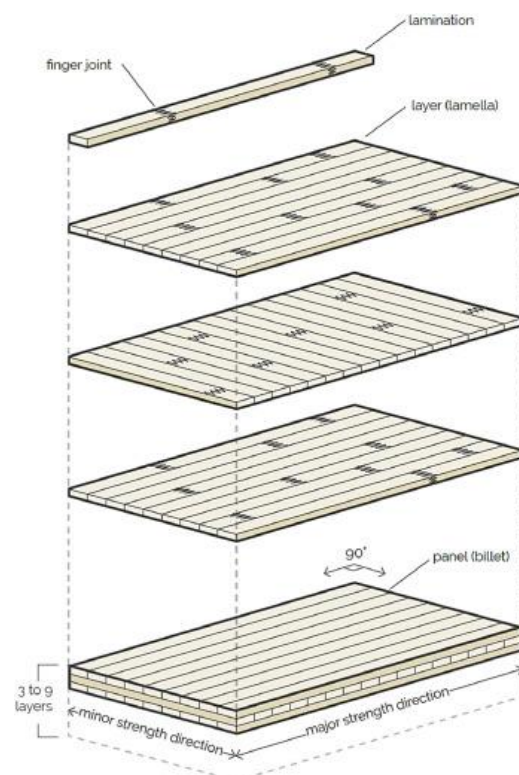
Accurate structural modeling can enhance the understanding of structural behavior while requiring lower budgets compared to laboratory testing. This research aims to develop a computational model for estimating the behavior of Cross-Laminated Timber (CLT) wall structures under cyclic loading. The study presents a modeling methodology capable of predicting the behavior of cross-laminated timber walls and their connections. Furthermore, the research compares the numerical results with the experimental results from the laboratory. The findings indicate that the developed model can efficiently predict the behavior of cross-laminated timber wall structures under cyclic loading, providing guidance for future applications in the design of buildings utilizing cross-laminated timber wall structures.

Keywords: Cross-Laminated Timber, cyclic loading, computational model, structural behavior

1. คำนำ

โครงสร้างไม้กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในงานก่อสร้างที่อยู่อาศัยและไม้ที่อยู่อาศัยในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา แม้ในประเทศที่ไม่ค่อย

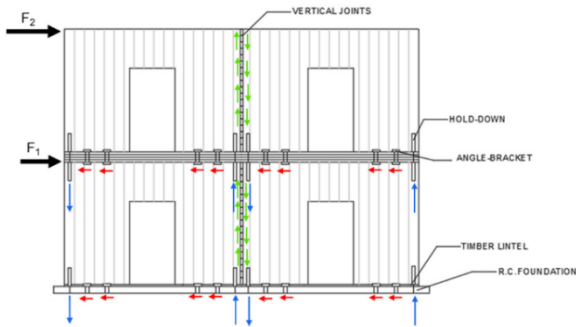
นิยมใช้ไม้ก็มีแนวโน้มที่จะใช้ไม้มากขึ้นเช่นกัน การพัฒนานี้ ส่วนใหญ่เกิดจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม้วิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพสูงและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น เช่น Glue-Lam, cross-laminated timber (CLT) และไม้ประเภท Laminated Veneer Lumber (LVL) [1] ไม้เหล่านี้ทำให้งานก่อสร้างอาคารมีความแข็งแรงและหลากหลายมากในปัจจุบัน



รูปที่ 1 การจัดเรียงตัวเป็นชั้นของไม้แผ่นไขว้ [1]

ไม้แผ่นไขว้ (Cross-Laminated Timber: CLT) เป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีความหนาแน่นที่ยั่งยืนสูงและกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในการก่อสร้าง ไม้แผ่นไขว้นี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างที่หลากหลายเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ เช่น ผนัง หรือ พื้น เป็นต้น ข้อดีของการใช้วัสดุไม้แผ่นไขว้นี้ คือการได้เปรียบทางด้านรอยเท้าคาร์บอนที่ต่ำ (low carbon footprint), ยกประกอบที่หน้างานได้ง่าย และใช้เวลาการก่อสร้างที่ต่ำ นอกจากนี้ อัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต หรือ เหล็ก [2] ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้ ไม้แผ่นไขว้ กลายเป็นทางเลือกที่ดึงดูดใจสำหรับงานก่อสร้างอาคารระดับกลางและสูงทั่วโลก

ไม้แผ่นไขว้ สร้างขึ้นจากส่วนของไม้ขนาดเล็กที่ถูกติดกาวและเรียงซ้อนกันในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน (รูปที่ 1) ทำให้มีความแข็งแรงและความคงตัวในแนวนอนสูง สามารถนำมาใช้งานเป็นโครงสร้างในระบบต้านแรงทางด้านข้าง (lateral resistant system) ในโครงสร้างหลัก เช่น โครงสร้างรับแรงลม แรงแผ่นดินไหวได้ [1,3] อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงด้านข้างของอาคารที่ใช้ไม้แผ่นไขว้ ยังไม่มีการศึกษามากนัก นอกจากนี้ เนื่องจากวัสดุไม้ มีความแข็งแรงแปรปรวน การออกแบบที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการวิบัติของอาคารที่ไม่พึงประสงค์ได้ จึงมีการนำข้อต่อเหล็กมาใช้ในบริเวณจุดต่อต่างๆของระบบโครงสร้างไม้ เพื่อเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงานของโครงสร้างในกรณีที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่รุนแรง เช่น แผ่นดินไหว ได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 2 การถ่ายแรงด้านข้างของกำแพงไม้แผ่นไขว้ [2]

จนถึงปัจจุบัน มีการศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองการพฤติกรรมของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้มากขึ้นเรื่อยๆ [4-6] ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ภายใต้แรงสลับทิศทาง พลังงานที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายนอกจะถูกสลายผ่านการเสียดสีของข้อต่อเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่แผ่นกำแพงไม้ยังคงเสียดสีอยู่ในช่วงยืดหยุ่น หลักฐานจากการทดลองยังชี้ให้เห็นถึงการปฏิสัมพันธ์กันที่ซับซ้อนระหว่างการแกว่งตัวและการเลื่อนของผนังกำแพงไม้ภายใต้แรงด้านข้าง อันเนื่องมาจากการถูกรัดให้แน่น (pinching) แรงเสียดทาน (friction) ในโครงสร้างเอง ดังแสดงดังรูปที่ 2 อย่างไรก็ตาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แบบไขว้ ในลักษณะโครงสร้างขนาดใหญ่หรือ อาคารสูงนั้นทำได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านสถานที่และทรัพยากร แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จึงเข้ามามีบทบาทในการประมาณค่าพฤติกรรมที่ซับซ้อนดังกล่าว แต่ปัจจุบัน ยังมีองค์ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองของกำแพงไม้แผ่นไขว้ในประเทศไทยน้อยมาก จึงนำมาสู่การพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ ในบทความนี้

บทความนี้ นำเสนอวิธีการพัฒนาแบบจำลอง 2 มิติ สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกด้านข้างแบบสลับทิศทาง โดยแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ กำแพงไม้แบบแผ่นไขว้และข้อต่อเหล็กที่ใช้เชื่อมประกอบแผ่นไม้ ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในบทความนี้ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ไม้แผ่นไขว้

แผ่นไม้ไขว้ หรือ cross-laminated timber (CLT) คือ แผ่นไม้ที่มีความหนาและใหญ่ที่ประกอบจากไม้ขนาดเล็กเรียงตัวเป็นชั้นๆ ไม้เหล่านี้

ทำขึ้นจากแผ่นไม้หรือแผ่นซูปเคลือบในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกันและยึดด้วยการติดกันเป็นชั้นๆ

วัตถุดิบที่ใช้สำหรับประกอบเป็นแผ่นไม้ไขว้จะเป็นไม้ที่ได้รับการจัดการความแข็งแรงตามมาตรฐาน เช่น EN-14081-1 ในยุโรป สำหรับหน้าตัดของแผ่นไม้ไขว้โดยทั่วไปประกอบด้วยแผ่นไม้ที่มีความแข็งแรงเท่ากันในสองทิศทางหลักที่ตั้งฉากกัน เพื่อให้เกิดประโยชน์จากความแข็งแรงของแผ่นให้มากที่สุด สำหรับแผ่นไม้ไขว้ มักนิยมใช้ไม้เนื้ออ่อนเป็นหลัก หรือบางครั้งจะใช้ไม้ที่ช่วยให้แผ่นมีความทนทานมากขึ้น โดยไม้ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าสามารถนำมาใช้ในทิศการรับน้ำหนักในโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ดี ส่วนการจัดเรียงแผ่นไม้ก็อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ [1]

ลักษณะการซ้อนกันของชั้นไม้ให้คุณสมบัติทางโครงสร้างที่ดี ส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันกับวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมอื่น ๆ ที่ใช้ในอาคารระดับกลางและสูงได้ ข้อดีหลักของแผ่นไม้ไขว้ ได้แก่ น้ำหนักเบาแต่มีความสามารถในการรองรับน้ำหนักได้ดี ความสามารถในการรับแรงทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น ได้ดี มีความสามารถในการเก็บกักความชื้นและพลังงานความร้อน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถประยุกต์ในการออกแบบสถาปัตยกรรมได้หลากหลาย เนื่องจากสามารถผลิตให้มีขนาดใหญ่ได้ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการใช้งานแผ่นไม้ไขว้อย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูล และมาตรฐานการออกแบบในระดับชาติหรือระดับนานาชาติ ยังมีอยู่อย่างจำกัด ปัจจุบัน วิศวกรและผู้ออกแบบจำเป็นต้องออกแบบอาคารไม้เหล่านี้ตามหนังสือหรือคู่มือที่ออกโดยกลุ่มวิจัยฯ ซึ่งให้คำแนะนำตามผลการทดลองและผลเชิงตัวเลข

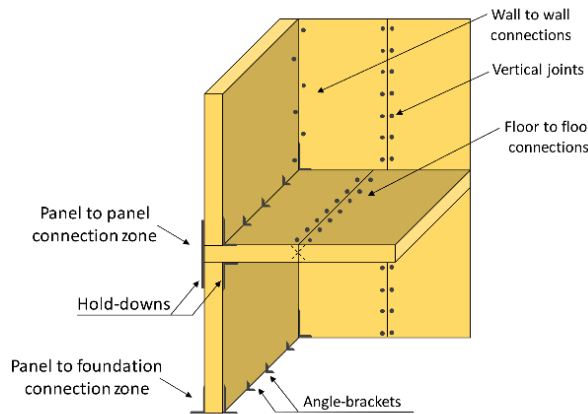
2.2 โครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้

อาคารที่ใช้ระบบโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้ ส่วนมากจะอยู่ในระดับอาคารต่ำถึงปานกลาง สร้างขึ้นด้วยแผ่นไม้ไขว้ที่ใช้เป็นผนังรับแรงเฉือนในแนวตั้งและพื้นในแนวนอน แผ่นไม้ไขว้นี้ถูกผลิตล่วงหน้าออกสถานที่ก่อสร้างและถูกเชื่อมต่อกันที่หน้างานก่อสร้างโดยใช้ข้อต่อโลหะ เช่น hold-downs, angle brackets, สกรู และตะปู เป็นต้น การเชื่อมต่อระหว่างแผ่นกับแผ่นและระหว่างแผ่นกับฐานราก ประกอบด้วยการต่อระหว่างเหล็กกับไม้ด้วยแผ่นเหล็กบางชิ้นรูปเย็นโดยทั่วไปคือ hold-downs และ angle brackets ซึ่งถูกติดต่อกับแผ่นไม้ด้วยตะปูก้านวงแหวนหรือสกรู และยึดด้วยสลักเกลียวกับฐานราก

อาคารที่ใช้ระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ จะมีพฤติกรรมแบบกล่องที่เอื้อประโยชน์ภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวร่วมกับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง เมื่อพิจารณาเฉพาะรูปแบบของน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง ไม่จำเป็นต้องมีข้อควรระวังพิเศษในระบบการเชื่อมต่อ ในทางตรงกันข้าม แรงกระทำด้านข้างจาก แรงลม หรือแผ่นดินไหวก่อให้เกิดการกระจายแรงในระบบโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อเชิงกลในบริเวณการสัมผัสระหว่างแผ่นต่อแผ่นและแผ่นต่อฐานราก รวมถึงการสัมผัสระหว่างไม้กับไม้และการถ่ายโอนแรงกดเนื่องจากการกระทำในแนวนอนที่รอยต่อระหว่างแผ่นต่อแผ่นหรือแผ่นต่อฐานราก

2.3 ข้อต่อเหล็กในระบบโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้

การเชื่อมต่อในโครงสร้างกำแพงไม้แผ่นไขว้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก คือข้อต่อที่ใช้ป้องกันการแกว่งและการเลื่อนของแผ่นแนวตั้ง กลุ่มที่สองรวมถึงตัวยึดโลหะขนาดเล็ก ซึ่งใช้สำหรับรอยต่อแนวตั้งในผนังหรือสำหรับการเชื่อมต่อแผ่นต่อแผ่นในพื้น หรือสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างพื้นกับผนังไม้แผ่นไขว้



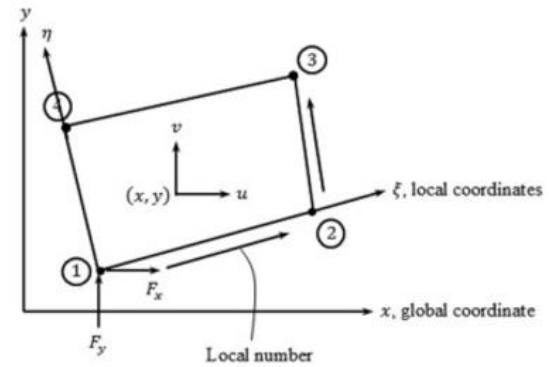
รูปที่ 3 การประกอบโครงสร้าง กำแพง-พื้น ในระบบกำแพงไม่แผ่ไขว้ [1]

ปัจจุบัน มีเพียงข้อต่อ hold-down และ angle bracket ที่ติดตั้งในบริเวณการเชื่อมต่อแผ่นต่อแผ่นและแผ่นต่อฐานราก ที่ทำหน้าที่ดูดซับแรงสั่นสะเทือนได้ในกรณีของแรงสั่นรับแผ่นดินไหว มีโครงการวิจัยจำนวนหนึ่งที่มุ่งศึกษาพฤติกรรมแบบสลับทิศทางของข้อต่อเหล็ก เช่น โครงการ SOFIE [10] และ SERIES โดย Gavric et al. [6,11] ได้ศึกษาพฤติกรรมแบบสลับทิศทางของข้อต่อภายใต้การแรงที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า hold-down ที่ทดสอบภายใต้แรงดึงมีความแข็งแรงในทิศทางตามแนวแกนเป็นหลัก (แรงดึง) ในขณะที่ในทิศทางเฉือนจะไม่สามารถให้ความแข็งแรงได้เนื่องจากการพับตัวของแผ่นเหล็ก ส่วน angle bracket นั้นมีความแข็งแรงในทั้งสองทิศทาง พฤติกรรมการตอบสนองแบบหมุนเวียนของ hold-down มีลักษณะเป็นวงจรร (loop) ที่กว้างในทิศทางแรงดึงและเป็นศูนย์ในทิศทางแรงอัด ในขณะที่ angle bracket มีผลตอบสนองมีการบีบอัด (pinching) เนื่องจากการเลื่อนของตัวยึดในรูฝังของไม้ นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบอื่น ๆ ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมของข้อต่อที่ใช้ในอาคารความสูงต่ำและปานกลางในงานวิจัย [12,13] ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน

3. การพัฒนาแบบจำลอง

3.1 การจำลองไม้แผ่ไขว้

การศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรม OpenseesPy โดยแบบจำลองสำหรับผนังไม้แผ่ไขว้ ถูกพัฒนาขึ้นจากชิ้นส่วนที่เรียกว่า 4-node Quad Element [7]) และ จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า การเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นส่วนใหญ่ในระบบโครงสร้างประเภทนี้ ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างเกิดขึ้นที่ข้อต่อเหล็ก ขณะที่ผนังไม้ไขว้เองจะยังคงเสียรูปอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเป็นส่วนใหญ่ [2,3] ผนังไม้ไขว้จึงถูกกำหนดพฤติกรรมของวัสดุให้มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic material) โดยในการศึกษานี้ ค่าความแข็งแรงของแผ่นไม้ไขว้จะถูกใช้ที่ 10^8 N/mm ตามข้อมูลจากการศึกษาที่ผ่านมา [2,14] เนื่องจากแผ่นไม้จะมีความแข็งแรงเมื่อเทียบกับข้อต่อเหล็ก

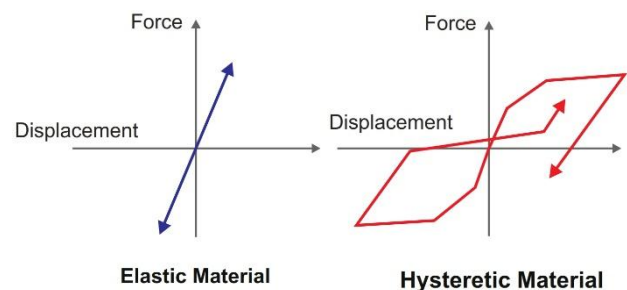


รูปที่ 4 ชิ้นส่วน 4-node Quad Element [2]

3.2 การจำลองข้อต่อเหล็ก

ในกรณีของข้อต่อเหล็ก การศึกษานี้ใช้ชิ้นส่วน ลิงก์แบบสองโหนดไร้ความยาว (two-noded zero length element [7]) ซึ่งถูกใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมของข้อต่อเหล็กหลักทั้งสองประเภท ได้แก่ hold-downs และ shear brackets ชิ้นส่วนลิงก์สำหรับ hold-downs โดยทั่วไปจะถูกจัดวางที่มุมของแผ่น ในขณะที่ shear brackets จะวางกระจายไปตลอดความยาวของกำแพงไม้ในทิศทางราบ

เนื่องจากการเสียรูปและการสลายพลังงานส่วนใหญ่เกิดขึ้นในข้อต่อเหล็ก (angle brackets and hold-downs) เราจึงกำหนดให้พฤติกรรมของแบบจำลองนี้มีลักษณะเป็น วัสดุแบบไม่ยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (nonlinear inelastic material) ที่มีฮิสเทอรีซิส (Hysteretic responses) แบบแกนเดียว ในการจำลองพฤติกรรมของข้อต่อ ตัวแปรค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ได้รับการปรับเทียบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อแสดงค่าความเสื่อมของความแข็งแรง (degradation) และการถูกรัดให้แน่น (pinching) โดยในการศึกษานี้ ข้อต่อแบบ angle brackets จะถูกกำหนดค่าการเสื่อมสภาพของความแข็งแรงและความคงตัวสำหรับ pinching ที่ 0.7 และ 0.3 สำหรับความเครียดและความเค้นตามลำดับ ในขณะที่ ข้อต่อแบบ hold-downs จะกำหนดค่าปัจจัย pinching ที่ 0.9 (ความเครียด) และ 0.2 (ความเค้น)

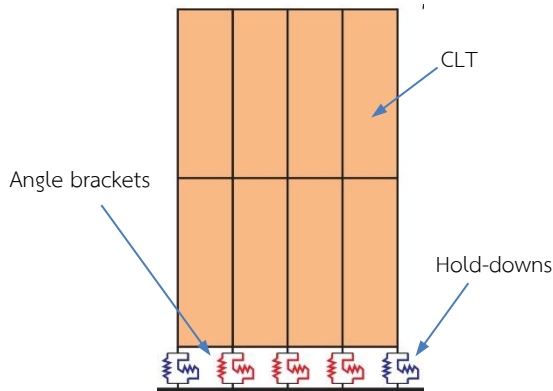


รูปที่ 5 พฤติกรรมที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง

3.3 การจำลองระบบกำแพงไม้แผ่ไขว้

กำแพงไม้แผ่ไขว้เกิดจากการนำไม้แผ่ไขว้ที่มามาเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นกำแพงและพื้นไม้ในระบบโครงสร้าง โดยที่จะทำการเชื่อมประกอบแผ่นไม้เข้าด้วยกันด้วยข้อต่อเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยรูปนี้แสดงการใช้ชิ้นส่วนในแบบจำลองเพื่อแทนที่แผ่นไม้และข้อต่อเหล็กในโครงสร้าง ชิ้นส่วนลิงก์สำหรับ hold-downs (แสดงด้วยสปริงสีน้ำเงิน) ซึ่ง

จะถูกจัดวางไว้ที่มุมของแผ่นไม้ให้สอดคล้องกับการจัดวางของโครงสร้าง
จริง ในขณะที่ shear brackets ถูกวางตัวกระจายไปตลอดความยาวของ
แผ่นในทิศทางแนวราบ (แสดงด้วยสปริงสีแดง)



รูปที่ 6 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

การศึกษานี้กำหนดให้ลิงก์ที่ใช้เชื่อมประกอบกำแพงไม้สามด้านทานแรง
ได้ทั้งสองแกน คือ (ตามแนวแกนและแรงเฉือนของชิ้นส่วน) การกำหนด
พฤติกรรมแบบนี้จะทำให้การแบบจำลองมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับ
โครงสร้างจริงมากขึ้น ซึ่งแนวทางการจำลองนี้จะไม่เหมือนกับการศึกษาที่
ผ่านมา ซึ่งส่วนใหญ่จะละเลยความสามารถในการรับแรงตามของ hold-
downs [1] อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ผู้ใช้อาจลดความซับซ้อนของการ
จำลองโครงสร้างได้ด้วยการไม่พิจารณาความสามารถในการต้านแรงเฉือน
ของข้อต่อ hold-downs

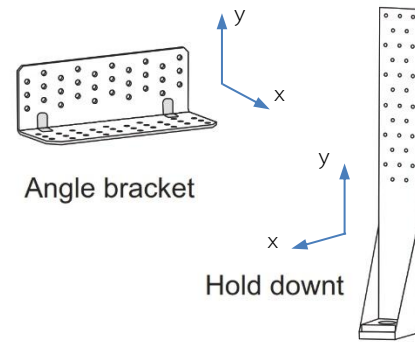
4. ผลการศึกษา

แบบจำลองที่อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้านี้ โดยผลการศึกษาจะ
ประกอบด้วยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแม่นยำกับผลการ
ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในบทความนี้จะทำการตรวจสอบความ
แม่นยำสองระดับ ได้แก่ ระดับความแม่นยำของชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น ข้อ
ต่อเหล็กชนิดต่างๆ และความแม่นยำของทั้งระบบโครงสร้างกำแพงไม้
ภายใต้แรงดันข้างแบบสลับทิศทาง ขั้นตอนแรกเป็นการผลการ
เปรียบเทียบการจำลองพฤติกรรมของข้อต่อเหล็ก ได้แก่ ข้อต่อชนิด Hold-
down และ angle bracket ในการนี้ ผู้ประพันธ์ได้ใช้ตัวอย่างการทดสอบ
และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากการศึกษาของ [4] รายละเอียด
และมิติต่างๆของข้อต่อแต่ละชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดและมิติของข้อต่อเหล็ก

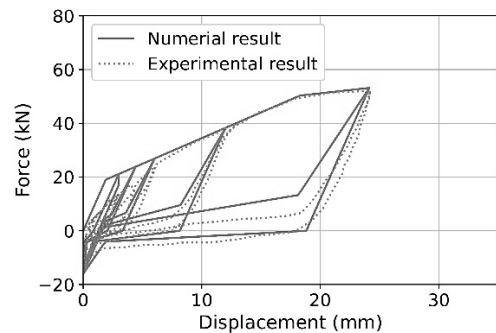
ลำดับ	ชนิดข้อต่อ	มิติของข้อต่อ
1	Angle bracket	BMF 90x116x48x3
2	Hold-down	WHT 540

ข้อต่อทั้งสองชนิดได้รับการทดสอบภายใต้แรงสลับทิศทางทั้งสองแกน
ของข้อต่อ ได้แก่ แรงตามแนวแกน และแรงเฉือนตามแนวขวางของแกน ดัง
แสดงในภาพที่ 7 โดยจากภาพ จะแสดงทิศทางแนวแกนของชิ้นส่วนทั้งสอง
ด้วย y (แกน y) และแสดงทิศทางแนวเฉือนตามขวางด้วย x (แกน x)

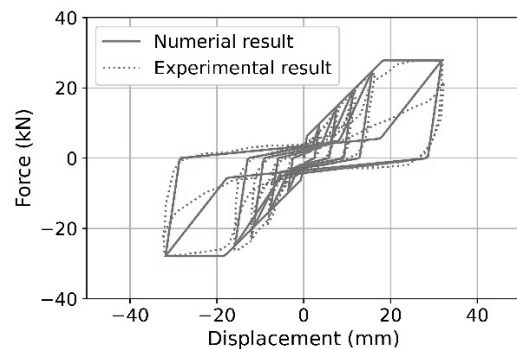


รูปที่ 7 การกำหนดทิศทางและแกนของข้อต่อ

ผลการจำลองพฤติกรรมของข้อต่อทั้งสองชนิดภายใต้แรงสลับทิศทาง
ดังที่แสดงในรูปที่ 8 – 9 โดยที่ รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรม
ของข้อต่อแบบ hold-down ระหว่างแบบจำลองกับผลการทดสอบใน
ห้องปฏิบัติการในทิศทางตามแนวแกน ขณะที่ รูปที่ 9 แสดงการ
เปรียบเทียบพฤติกรรมของข้อต่อแบบ angle bracket ในทิศทางตามขวาง
แกน ระหว่างแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในทิศทางตาม
แนวแกน ทั้งนี้ เส้นต่อเนื่อง แสดงผลการจำลองของแบบจำลอง
ที่พัฒนาขึ้น ส่วน เส้นประ แสดงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 8 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 9 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

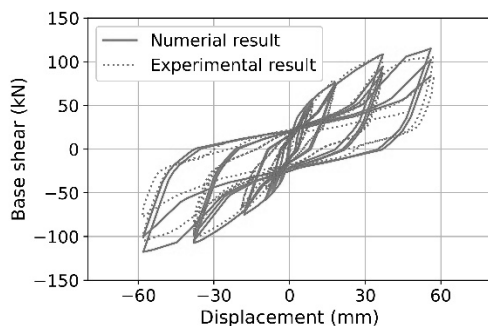
จากผลการเปรียบเทียบ จะเห็นว่า แบบจำลองข้อต่อที่พัฒนาขึ้น
จากการศึกษานี้สามารถจำลองพฤติกรรมและลักษณะสำคัญของการ
ตอบสนองของข้อต่อในแง่ต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสังเกตจากการ

ซ้อนทับ สอดคล้องกันของเส้นกราฟผลการจำลองฯ กับผลการทดสอบตลอดช่วงของแรงสลับทิศทางที่ทำการทดสอบ ทั้งค่ากำลังของข้อต่อความแข็งแรงในช่วงต่างๆ การสลายพลังงาน การเสื่อมถอยของกำลัง และผลของพฤติกรรม pinching ในข้อต่อทั้งสองชนิดได้อย่างดี

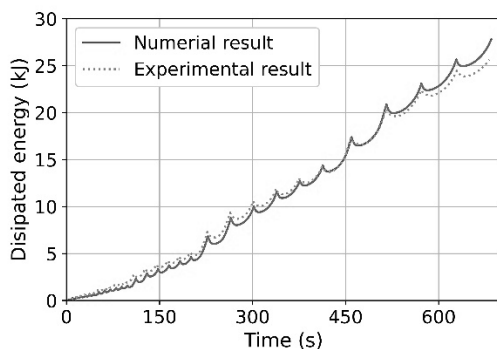
สำหรับผลการศึกษาในส่วนที่ 2 ประกอบด้วยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจำลองพฤติกรรมของทั้งระบบโครงสร้างกำแพงไม้ ในส่วนที่จะเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองพฤติกรรมกับตัวอย่างทดสอบจากเอกสารอ้างอิง [6] ผลการศึกษาสามารถแสดงในรูปที่ 10 และ 11 โดยรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมด้านกำลังและการเสียรูปของทั้งระบบโครงสร้างภายใต้แรงสลับทิศทาง ขณะที่ รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบการสลายพลังงานของกำแพงไม้ตัวอย่าง เส้นทึบและเส้นประในรูปแทนผลลัพธ์จากแบบจำลอง และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามลำดับ ทั้งนี้ค่าการสลายพลังงานของกำแพงไม้แผ่นไขว้มี คำนวณจากการอินทิเกรตพื้นที่ระหว่างแรงกับการเสียรูปของกำแพงไม้ ดังสมการที่ (1)

$$\int_0^{u_{max}} f(u)du \quad (1)$$

โดยที่ $f(u)$ แทนฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของแรงกับการเสียรูปของกำแพง และ u แสดงค่าการเสียรูปตามแนวราบของกำแพงฯตั้งแต่เริ่มทดสอบจนโครงสร้างเกิดการวิบัติ



รูปที่ 10 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 11 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 10 สามารถสังเกตได้ว่าแบบจำลองกำแพงไม้ที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาสามารถจำลองพฤติกรรมตอบสนองภายใต้แรงสลับทิศทางของทั้งระบบกำแพงไม้แผ่นไขว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแม่นยำ ทั้งในแง่ของ

กำลังต้านทานแรงของกำแพง ความแข็งแรงของกำแพง การสลายพลังงาน การเสื่อมถอยของกำลัง รวมถึงพฤติกรรม pinching ของระบบโครงสร้างนี้

5. สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

การศึกษานี้ นำเสนอการพัฒนาแบบจำลอง 2 มิติ สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ ภายใต้annahน้กบรรทุกทางด้านข้างแบบสลับทิศทาง โดยแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ กำแพงไม้แบบแผ่นไขว้และข้อต่อเหล็กที่ใช้เชื่อมประกอบแผ่นไม้ ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในบทความนี้ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองพฤติกรรมของระบบโครงสร้างกำแพงไม้แบบแผ่นไขว้ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน และ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ในการสนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

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] Gavric I, Fragiocomo M, Ceccotti A. Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2015;48:1841–57.
- [5] Gavric I, Fragiocomo M, Ceccotti A. Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures 2015:179–91.
- [6] Gavric I, Fragiocomo 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] Zhu M, McKenna F, Scott MH. OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX* 2018;7:6–11.
- [8] Junda E. Seismic assessment models for cross-laminated timber buildings Eknara Junda 2024.
- [9] Demirci C, Málaga-Chuquitaype C, Macorini L. Seismic drift demands in multi-storey cross-laminated timber buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2018;47:1014–31.
- [10] Minowa C, Kawai N. SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building 2013;42:2003–21.
- [11] Aloisio A, Alaggio R, Fragiocomo 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Demirci C. Seismic Response of Multi-Storey Cross-Laminated Timber Buildings. Imperial College London, 2019.