

การพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก DEVELOPMENT OF VISCOELASTIC WALL DAMPERS

ฐิติพงศ์ เจริญสุข^{1,*} และ ทศพล ปิ่นแก้ว¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: bigosk133@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic wall dampers) ด้วยวัสดุ Asphalt (ยางมะตอย) และ Polyisobutene (PIB) แม้ว่าในปัจจุบันมีอุปกรณ์สลายพลังงานสำหรับอาคารเพื่อด้านทานแผ่นดินไหวและแรงลมวางจำหน่าย แต่อุปกรณ์เหล่านั้นล้วนต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง อีกทั้งส่วนใหญ่มีรูปแบบที่อาจไม่สวยงาม ทั้งมีค่าติดตั้งและค่าบำรุงรักษาที่สูง ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกด้วยวัสดุที่มีราคาที่ไม่แพง และไม่กระทบต่อความสวยงามของอาคารเดิม โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานจากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างขนาดย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ ด้วยการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic testing) ตามมาตรฐาน ASCE 7-16 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PIB มีคุณสมบัติในการสลายพลังงานที่ดี มีเสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากนั้นจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาปรับขนาดเท่าจริง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายพลังงานกับผลิตภัณฑ์ผนังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous Wall Damper) ที่มีจำหน่ายของต่างประเทศ ผลการศึกษาพบว่าผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกที่พัฒนามีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานได้ดีกว่าผนังสลายพลังงานแบบหนืดอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถลดขนาดและจำนวนผนังสลายพลังงานที่ต้องติดตั้งในอาคารได้ ทำให้ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งผนังสลายพลังงานในอาคารลดลง จนอาจประหยัดค่าการเพิ่มขนาดส่วนโครงสร้างให้มีกำลังและสติเฟ้นสูงขึ้นเพื่อด้านทานแรงแผ่นดินไหวและแรงลมได้

คำสำคัญ: ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก, วัสดุวิสโคอีลาสติก, การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา

Abstract

This research objective is to develop the viscoelastic wall dampers using Asphalt and PIB (Polyisobutene). Although there are many types of dampers available for wind and earthquake loadings. They are imported items and are expensive. In addition, their configurations affect the building's aesthetic while their costs for installation and maintenance are rather high. The research therefore considers the possibility of developing a cost effective wall damper which slightly affects the building's aesthetic. Employing the small-scaled wall damper tests under cyclic loading based on ASCE 7-16, a mathematical model of viscoelastic wall damper is derived. The obtained test results indicate that the wall damper using PIB can effectively dissipate the energy with high stability under temperature change. Then the effectiveness of a full-scaled viscoelastic wall damper is estimated from the obtained mathematical model and is compared with those of commercial viscous wall dampers made in abroad. The comparison results reveal that the proposed viscoelastic wall damper can provide better dissipation performance than existing viscous wall dampers. As a consequence, the wall dampers could be made smaller and cheaper. This encourages toward the real application to the building design against the earthquake and wind where the installation of the wall dampers may be more effective than design with higher structural stiffness or capacity.

Keywords: Viscoelastic wall dampers, Viscoelastic materials, wind and earthquake

1. บทนำ

แรงแผ่นดินไหวและแรงลมเป็นแรงด้านข้างที่มีผลต่อการออกแบบระบบโครงสร้างอาคาร อาคารที่มีความสูงหรือความขรุขระมากมักพบกับความยากลำบากในการออกแบบโครงสร้างเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการโก่งตัวทางด้านข้าง ณ ยอดอาคารไม่เกิน 1/500 ของความสูงอาคารตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ในกรณีของแรงลม ซึ่งหากอาคารใดมีค่าการโก่งตัวเกินเกณฑ์วิศวกรรม

ผู้ออกแบบต้องหาทางเพิ่มสติเฟ้นให้กับองค์อาคาร โดยเฉพาะส่วนโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน เพราะมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มสติเฟ้นโดยธรรมชาติของอาคาร แต่การขยายขนาดผนังรับแรงเฉือนหรือเพิ่มจำนวน นอกจากจะเป็นการเพิ่มต้นทุนค่าก่อสร้างแล้ว บางกรณีอาจติดปัญหาด้านสถาปัตยกรรมหรือกระทบการใช้สอยอาคาร สำหรับแรงแผ่นดินไวนั้น แม้ว่าอาคารสูงจะมีค่าการสั่นไหวธรรมชาติยาวขึ้นจนทำให้สัดส่วนของแรงแผ่นดินไหวเทียบกับแรงลมลดลง แต่บาง

กรณียังพบว่าอาคารมีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นเกินเกณฑ์มาตรฐาน และหลายกรณีโมเมนต์ที่ใช้ออกแบบเหล็กเสริมในเสาอาคาร เป็นผลมาจากแรงแผ่นดินไหวเป็นหลัก อีกทั้งโครงสร้างอาคารทั้งหลายยังต้องออกแบบให้ได้ระดับความเหนียวตามกำหนดในมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 ด้วย

เทคโนโลยีหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมและแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารสูงในต่างประเทศ คือการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานสำหรับอาคารเพื่อลดผลกระทบจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหว แม้ตัวอุปกรณ์มักมีราคาแพงแต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนค่าก่อสร้างโดยรวมแล้ว หลายกรณีพบว่ามีความคุ้มค่าและได้เปรียบกว่าการเพิ่มขนาดส่วนโครงสร้างหรือการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามแนวทางการออกแบบปกติ ดังจะเห็นได้จากอาคารสูงและอาคารสำคัญในต่างประเทศจำนวนมากที่เลือกติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้ [1]

สำหรับอาคารสูงในประเทศไทย แม้ปัจจุบันจะมีบางโครงการมีแผนการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงลมและแรงแผ่นดินไหว แต่อาคารสูงส่วนใหญ่ยังคงนิยมแนวทางการออกแบบปกติ โดยพบว่าอุปสรรคสำคัญคือราคาของอุปกรณ์เหล่านี้ที่ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ต้นทุนค่าก่อสร้างโดยรวมของอาคารที่ติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานไม่ได้เปรียบเหมือนในต่างประเทศ

งานวิจัยนี้จะพัฒนามังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic wall dampers) เพื่อใช้ในอาคารสูง เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์สลายพลังงานชนิดอื่นๆ ทั้งมีความสะดวกในการติดตั้งในอาคาร และเป็นรูปแบบที่ไม่กระทบต่อความสวยงามหรือการใช้สอยอาคารมากนัก โดยการพัฒนาจะมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ต้นแบบมังสลายพลังงานที่มีประสิทธิภาพไม่ด้อยกว่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศและราคาไม่แพง

2. ปัญหา

อุปกรณ์สลายพลังงานประเภท Viscoelastic damper นั้นเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนตัวและความเร่งของตัวอาคาร โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนพลังงานกลจากแผ่นดินไหวมาเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก ที่มีความสามารถในการสลายพลังงานที่สูง มีผลทำให้อาคารมีคุณสมบัติด้านการสลายพลังงานโดยรวมเพิ่มมากขึ้น ดังที่แสดงให้เห็นในหลายการศึกษาที่ผ่านมา [2]-[5]

ในอดีตมังสลายพลังงานมักใช้วัสดุประเภทของเหลวหนืด (Viscous fluid) เป็นตัวดูดซับพลังงาน เพราะสามารถผลิตได้ง่ายกว่าวัสดุประเภทวิสโคอีลาสติก ซึ่งแม้จะมีประสิทธิภาพสูงในการสลายพลังงานมากกว่า แต่อาจจะมีผลต่อการเพิ่มแรงภายในระบบโครงสร้าง นอกจากนั้นคุณสมบัติของวัสดุวิสโคอีลาสติกเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อมได้ง่าย เช่น อุณหภูมิ และความถี่ของแรง การออกแบบติดตั้งจึงยุ่งยากซับซ้อนกว่า ประกอบกับวัสดุ

วิสโคอีลาสติกที่นิยมใช้ในต่างประเทศ เช่น ผลิตภัณฑ์ Viscoelastic Damping Polymers ของบริษัท 3M ก็หาซื้อได้ยากและมีราคาแพง

ในการศึกษาวิจัยนี้ จึงพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนา Viscoelastic wall damper ด้วยวัสดุที่มีราคาไม่แพง และไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาบ่อย โดยพิจารณาเลือกศึกษาและทำการทดสอบวัสดุวิสโคอีลาสติก 2 ชนิดคือ ยางมะตอยเกรด AC60/70 และ Polyisobutene (PIB) ซึ่งสำหรับ PIB จะทำการทดสอบวัสดุที่ค่าความหนืดต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ ชนิดความหนืดสูง (PIB-HV) และชนิดความหนืดปานกลาง (PIB-MV)

ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างขนาดย่อส่วนในห้องปฏิบัติการจะถูกนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายพฤติกรรมของวัสดุทั้งสองชนิดภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร แล้วจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาคาดการณ์พฤติกรรมการสลายพลังงานในกรณีที่มีขนาดเท่าจริง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายพลังงานกับผลิตภัณฑ์มังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous Wall Damper) ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา

3. เกณฑ์และวิธีการทดสอบอุปกรณ์ความหน่วง

การทดสอบอุปกรณ์ความหน่วงแบบวิสโคอีลาสติกจะทำการทดสอบแบบวัฏจักร โดยยึดรูปแบบการทดสอบตามมาตรฐานของ ASCE 7-16

ขนาดการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบสามารถหาได้จากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นของอาคารด้วยค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (MCE_E) โดยจะทำการทดสอบด้วย Fully reversed sinusoidal cycle ด้วยความถี่ของการทดสอบเท่ากับ $1/(1.5T)$ โดย T คือคาบของโหมดการเคลื่อนที่หลักของอาคารที่พิจารณา และมีลำดับการทดสอบดังนี้

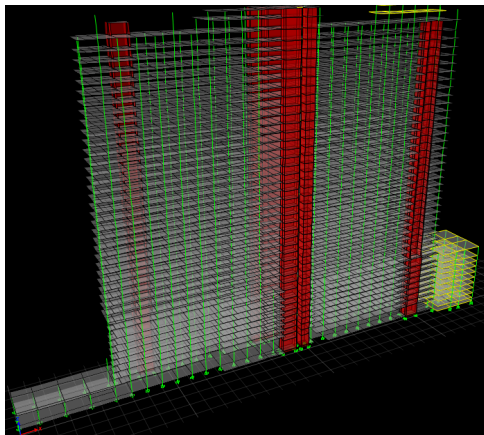
- 10 รอบการเคลื่อนที่ด้วยขนาดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.33 เท่าของ (MCE_E)
- 5 รอบการเคลื่อนที่ด้วยขนาดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.67 เท่าของ (MCE_E)
- 3 รอบการเคลื่อนที่ด้วยขนาดการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.0 เท่าของ (MCE_E)

และในด้านของแรงลม ASCE 7-16 ได้ระบุให้ทดสอบที่ขนาดการเคลื่อนที่ของอาคารที่วิเคราะห์ได้จากแรงลมด้วย Fully reversed sinusoidal cycle ที่จำนวนรอบไม่น้อยกว่า 2,000 รอบ ที่ความถี่เท่ากับ $1/T$ โดยสำหรับอุปกรณ์ความหน่วงต้องทดสอบที่อุณหภูมิต่างกันอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ

4. อาคารตัวอย่างสมมติ

เพื่อให้การศึกษามีความสอดคล้องกับสภาพจริงของอาคารใน

ประเทศไทย จังหวัดลพบุรี ออกแบบผนังสลายพลังงานให้กับอาคารตัวอย่าง ซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตมีเนียบคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 41 ชั้น มีขนาด กว้าง ยาว สูง โดยประมาณ 14, 129 และ 126.3 เมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม ETABS-18 ดังรูปที่ 1 พบว่าโครงสร้างอาคารมีคาบธรรมชาติเท่ากับ 7.7 วินาที มีระยะเคลื่อนที่ระหว่างชั้นสูงสุดประมาณ 2.60 และ 2.40 ซม. ภายใต้แรงแผ่นดินไหวออกแบบและแรงลมใช้งานตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 และ มยผ. 1311-50 ตามลำดับ



รูปที่ 1 แบบจำลองอาคารตัวอย่างด้วยโปรแกรม ETABS-18

5. ตัวอย่างผนังสลายพลังงาน

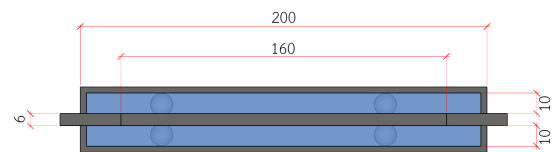
ผนังสลายพลังงานที่ศึกษาพัฒนานี้ เลือกใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก 2 ชนิดได้แก่ ยางมะตอยและ Polyisobutene (PIB) โดยวัสดุชนิดยางมะตอยที่ศึกษาเป็นเกรด AC60/70 ดังรูปที่ 2 ส่วน PIB ที่ศึกษาจะเป็นเกรดความหนืดสูง PIB-HV และความหนืดปานกลาง PIB-MV ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวกึ่งแข็งใสดังรูปที่ 3 ตัวอย่างแผ่นผนังสลายพลังงานที่ใช้ทดสอบเป็นแบบย่อส่วน 30x20x3.2 ซม. บรรจุวัสดุวิสโคอีลาสติกไว้ภายใน และมีแผ่นเหล็กกั้นระหว่างกลางที่สามารถขยับขึ้นลงเพื่อสร้างแรงเสียดทานดังรูปที่ 4 และ 5



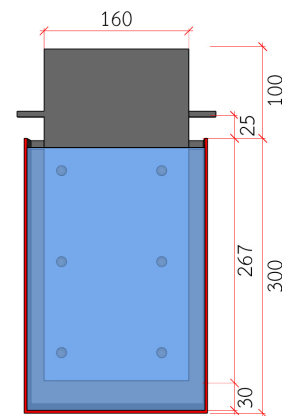
รูปที่ 2 วัสดุยางมะตอยเกรด AC60/70



รูปที่ 3 ภาพตัวอย่างวัสดุ Polyisobutene (PIB)



(a) มุมมองด้านบน



(b) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4 แบบจำลองผนังสลายพลังงานย่อส่วน (unit: mm)

การทดสอบผนังสลายพลังงานย่อส่วนใช้เครื่องทดสอบแบบวัฏจักร (Servopulser) ในการกำหนดค่าการเคลื่อนที่ ความถี่ และจำนวนรอบของการทดสอบตามมาตรฐาน ASCE 7-16 (ดังรูปที่ 6) ทั้งได้ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการทดสอบที่ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส เพื่อคำนึงถึงความเป็นไปได้ของอุณหภูมิใช้งานในร่มภายในอาคารของไทย ทั้งนี้ระหว่างทดสอบจะบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นผนังไปพร้อมกับค่าแรงต้านจากวัสดุวิสโคอีลาสติกที่ทำการทดสอบ เพื่อนำไปใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 5 ภาพถ่ายผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติคย่อยส่วน



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบแบบวิสจักรขนาด 20 ตัน (Servopulser)

6. ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบผนังสลายพลังงานย่อยส่วนในห้องปฏิบัติการจะอิงตามมาตรฐาน ASCE7-16 โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบตามค่าผลตอบสนองของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งจากแบบจำลองอาคารตัวอย่างด้วย ETABS ทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขการทดสอบผนังสลายพลังงานเมื่อพิจารณาตามแผ่นดินไหวและแรงลม ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ ทั้งนี้การทดสอบจะทำที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35°C

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบกรณีแผ่นดินไหว

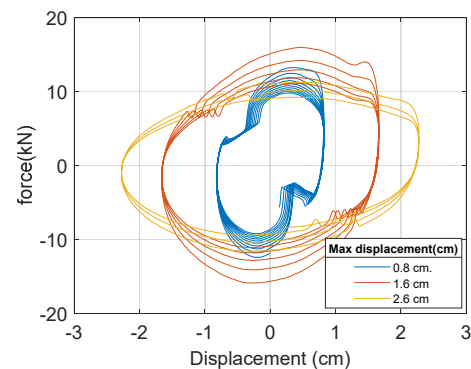
Level	Cycle (N)	Max. Disp. (cm)	Period (seconds)	Freq. (Hz)
33%	10	0.88	11.55	0.087
60%	5	1.78	11.55	0.087
100%	3	2.66	11.55	0.087

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดสอบกรณีแรงลม

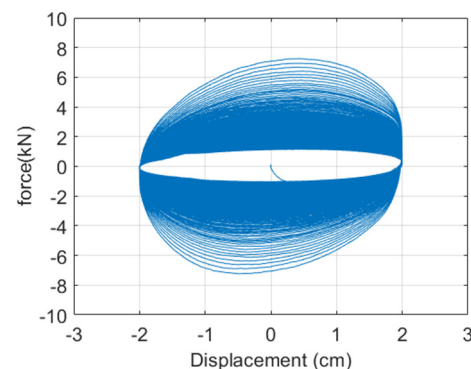
Level	Cycle (N)	Max. Disp. (cm)	Period (seconds)	Freq. (Hz)
100%	2,000	2.4	7.77	0.129

7. ผลการทดสอบ

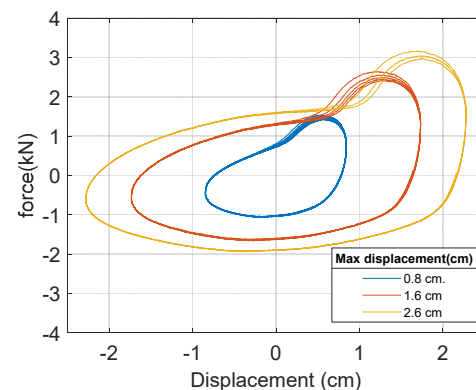
ผลการทดสอบผนังสลายพลังงานย่อยส่วนแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านจากวัสดุวิสโคอีลาสติคกับการเคลื่อนที่ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยขนาดพื้นที่ภายในวงจะสะท้อนถึงอัตราการสลายพลังงานผนังตัวอย่าง รูปที่ 7-12 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 25°C สำหรับกรณีของวัสดุยางมะตอยและ PIB ทั้ง PIB-MV และ PIB-HV ตามเงื่อนไขการทดสอบด้านแผ่นดินไหวและแรงลมตามลำดับ



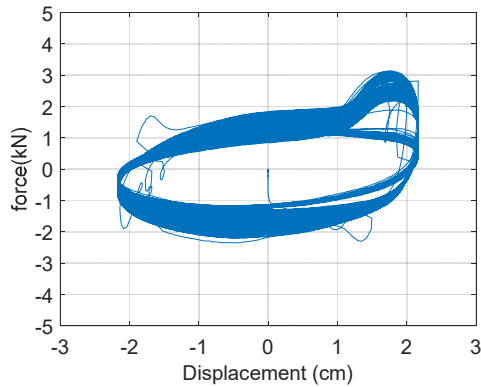
รูปที่ 7 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงแผ่นดินไหว



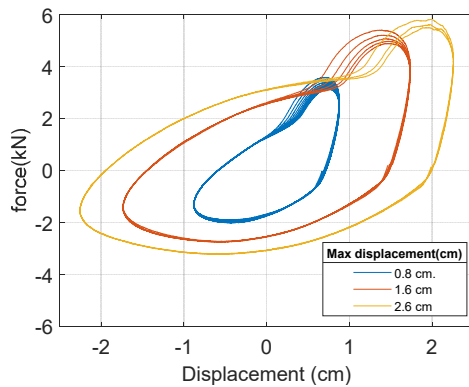
รูปที่ 8 ผลการทดสอบวัสดุยางมะตอย: แรงลม



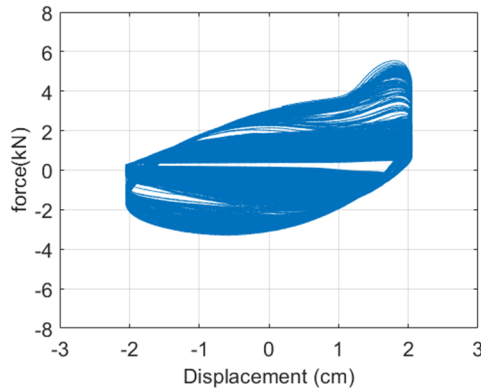
รูปที่ 9 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 10 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-MV: แรงลม



รูปที่ 11 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 12 ผลการทดสอบวัสดุ PIB-HV: แรงลม

8. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงาน

Lago, A., et al [1] เสนอแบบจำลอง Maxwell model ในการจำลองพฤติกรรมสลายพลังงานของวัสดุวิสโคอีลาสติก เนื่องจากวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามความถี่และอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงได้ดังสมการ

$$F(t) + \frac{F(t)c_D}{k_D} = C_D \dot{u}(t) \quad (1)$$

โดยที่ $F(t)$, C_D , K_D , $\dot{u}$ คือแรงต้านจากการเคลื่อนที่,

ความหน่วงเทียบเท่า, สติฟเนสเทียบเท่า, และความเร็วตามลำดับ

Xu et al. [3] กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรี (Hysteresis loop) จากผลการทดสอบนั้น สามารถอธิบายได้ตามความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (2)

$$\left(\frac{F_d - K_{d1}u_d}{\eta K_{d1}u_0} \right)^2 + \left(\frac{u_d}{u_0} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

โดยที่ F_d , K_{d1} , u_d , η และ u_0 คือแรงที่เกิดขึ้น, สติฟเนส-สะสม, การเคลื่อนที่ของผนัง, Loss factor และการเคลื่อนที่ตัวที่มากที่สุดของผนัง

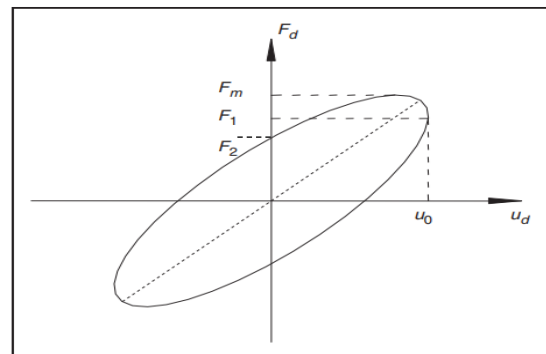
จาก Hysteresis loop สามารถคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่า Storage modulus (G_1), Loss Modulus (G_2) ที่ขนาดการเคลื่อนที่และอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้ดังสมการที่ (3), (4) และ (5)

$$G_1 = \frac{F_1 h_v}{n_v A_v u_0} \quad (3)$$

$$\eta = F_2 / F_1 \quad (4)$$

$$G_2 = \eta G_1 \quad (5)$$

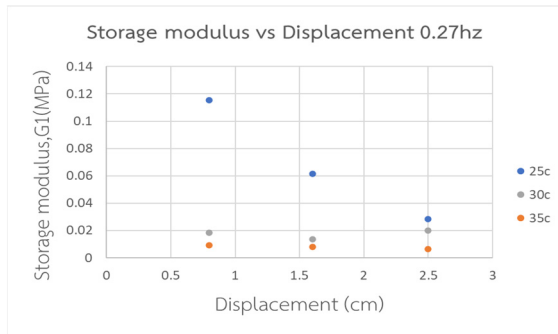
โดยที่ F_1 , F_2 , h_v , n_v และ A_v คือแรงขณะที่เกิดการเคลื่อนที่สูงที่สุด, แรงขณะการเคลื่อนที่เป็นศูนย์, ความหนาของวัสดุวิสโคอีลาสติก, จำนวนชั้นของวัสดุวิสโคอีลาสติก และพื้นที่ผิวของวัสดุวิสโคอีลาสติก ดังรูปที่ 13



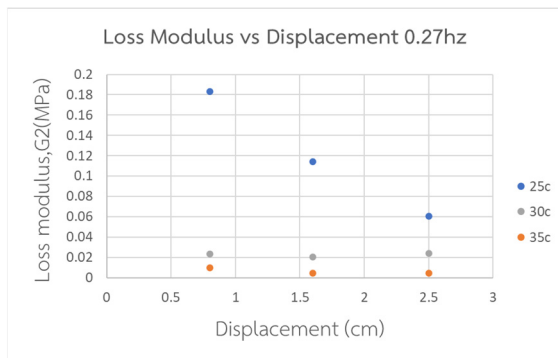
รูปที่ 13 กราฟ hysteresis ของแรงและการเคลื่อนที่

8.1. ยางมะตอย

จากผลการทดสอบผนังสลายพลังงานย่อยส่วนในห้องปฏิบัติการ จะสามารถคำนวณหาค่า Storage modulus (G_1) และ Loss Modulus (G_2) ของผนังที่ใช้วัสดุยางมะตอยได้ดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ



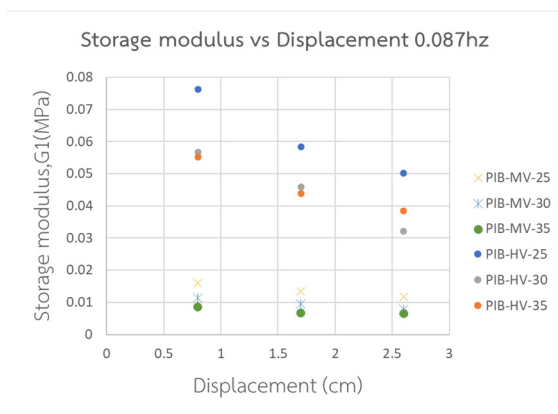
รูปที่ 14 Storage modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของยางมะตอย



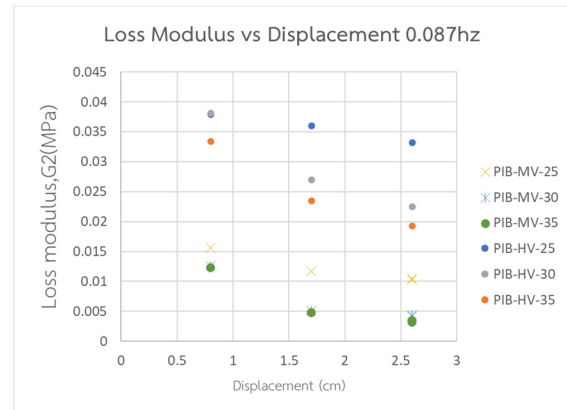
รูปที่ 15 Loss modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของยางมะตอย

8.2. POLYISOBUTENE (PIB)

จากผลการทดสอบผนังสลายพลังงานย่อยส่วนในท้องปฏิบัติการจะสามารถคำนวณหาค่า Storage modulus (G_1) และ Loss Modulus (G_2) ของผนังที่ใช้วัสดุ PIB ได้ดังรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 16 Storage modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของ PIB



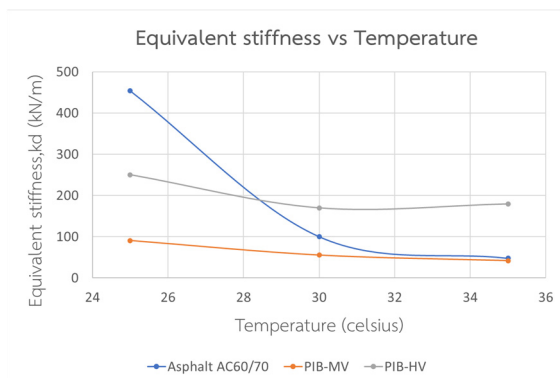
รูปที่ 17 Loss modulus กับระยะการเคลื่อนที่ของ PIB

9. ประสิทธิภาพการสลายพลังงาน

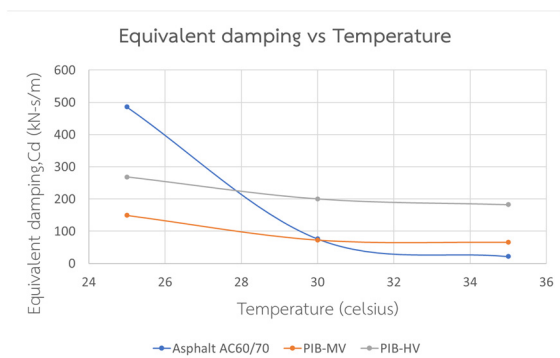
ค่าของ Storage modulus และ Loss modulus ที่ได้จากการทดสอบข้างต้น จะนำมาเฉลี่ยเพื่อนำไปประมาณค่า Equivalent stiffness และ Equivalent damping เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของผนังสลายพลังงานแต่ละประเภท เพราะถือเป็นปัจจัยหลักบ่งบอกถึงคุณสมบัติการต้านทานการเคลื่อนที่ของผนังและความสามารถในการสลายพลังงานให้กับอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ

รูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่าทั้งยางมะตอยและ PIB มีคุณสมบัติเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติกที่ค่อนข้างชัดเจน เพราะมีค่าสตีเฟนส์ที่มีนัยสำคัญ โดยพบว่าค่าสตีเฟนส์เทียบเท่าของยางมะตอยลดลง 500% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 25 °C เป็น 35 °C ในขณะที่ PIB จะมีความเสถียรกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่ามาก

ส่วนคุณสมบัติด้านการสลายพลังงานตามรูปที่ 19 นั้น เห็นได้ว่าถึงแม้ค่า Equivalent damping ที่ได้จากยางมะตอยจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิ 25 °C แต่ก็มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิค่อนข้างมาก โดยพบการลดลงกว่า 500% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 35 °C คล้ายกรณีของสตีเฟนส์ ในขณะที่ PIB นั้นมีเสถียรภาพที่ดีกว่า โดยหากเปรียบเทียบระหว่าง PIB-HV กับ PIB-MV ก็จะพบว่า PIB-HV มีค่า Equivalent damping ที่สูงกว่าทุกอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.80-2.25 เท่า จึงเป็นวัสดุที่ให้ประสิทธิภาพด้านการสลายพลังงานที่ดีที่สุดในการศึกษานี้



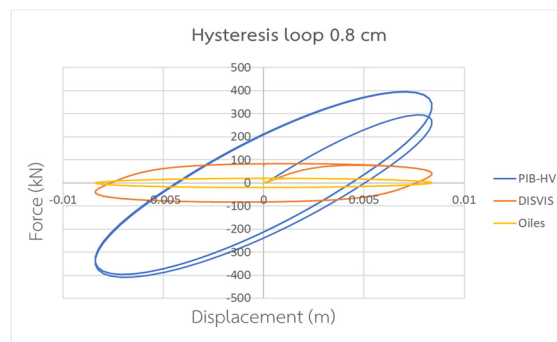
รูปที่ 18 Equivalent stiffness ของผนังสลายพลังงาน



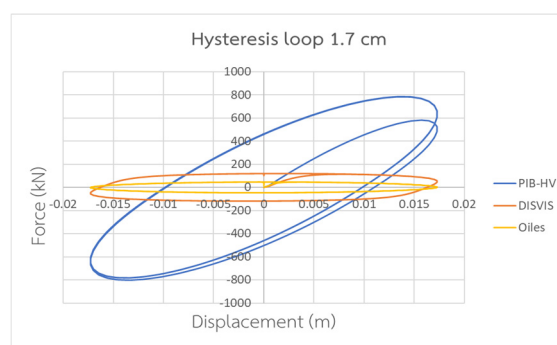
รูปที่ 19 Equivalent damping ของผนังสลายพลังงาน

เมื่อนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานที่ใช้วัสดุ PIB-HV ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการข้างต้น ไปเปรียบเทียบกับผนังสลายพลังงานแบบ Viscous wall damper ที่มีจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกาของบริษัท DIS [6] และในประเทศญี่ปุ่นของบริษัท OILES [7] โดยสมมติให้ผนังสลายพลังงานมีขนาดเท่ากับ 1,800 มม. x 2,100 มม. พบว่าผนังสลายพลังงานที่ใช้วัสดุ PIB-HV จะให้อัตราการสลายพลังงานภายใต้ระยะการเคลื่อนที่เดียวกันสูงกว่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศทั้งสองบริษัทมาก ดังแสดงในรูปที่ 20-22

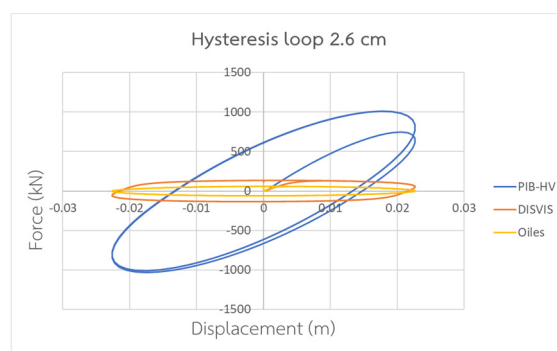
เมื่อนำค่าอัตราการสลายพลังงานในรูปของ Hysteresis area ที่ได้จากผนังทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบกับกันดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า PIB-HV สามารถสลายพลังงานได้ดีกว่า DIS ประมาณ 2.5-4.1 เท่า และดีกว่า OILES ถึงกว่า 10 เท่า โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ DIS พบว่าความได้เปรียบเชิงประสิทธิภาพดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อผนังมีค่าระยะการเคลื่อนที่มากขึ้น



รูปที่ 20 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.8 ซม.



รูปที่ 21 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.7 ซม.



รูปที่ 22 Hysteresis loop เมื่อระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 2.6 ซม.

ตารางที่ 3 การสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานชนิดต่างๆ

Hysteresis area (KN-m)					
Disp.	PIB-HV	DIS	ratio	OILES	ratio
0.8	5.54	2.21	2.51	0.52	10.64
1.7	24.71	6.83	3.62	2.42	10.22
2.6	43.17	10.38	4.16	4.20	10.29

10. สรุปผล

เพื่อพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติคด้วยวัสดุพีเอชไอวีที่ได้ในราคาแพง จึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผนังสลายพลังงานจากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างขนาดย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าวัสดุวิสโคอีลาสติคชนิด PIB-HV มีคุณสมบัติในการสลายพลังงานที่ดี มีเสถียรภาพภายใต้การ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายพลังงานกับผลิตภัณฑ์ผนังสลายพลังงานแบบหนืด (Viscous Wall Damper) ที่มีจำหน่ายของต่างประเทศ พบว่าผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติคมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานได้ดีกว่ามาก จึงสามารถลดขนาดหรือจำนวนผนังสลายพลังงานที่ต้องติดตั้งในอาคารได้ ทำให้ต้นทุนการติดตั้งผนังสลายพลังงานในอาคารลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบางกรณีอาจทำให้ราคาโครงสร้างโดยรวมประหยัดกว่าอาคารที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน

อย่างไรก็ดีการใช้วิสโคอีลาสติคมีผลทำให้ผนังสลายพลังงานที่ได้มีค่าสติฟเนสสูงกว่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ ดังนั้นการออกแบบติดตั้งต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อจัดการแรงภายในอาคารหรือในฐานรากที่อาจเพิ่มมากขึ้นในบางบริเวณอย่างเหมาะสม

11. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] Alberto Lago, Dario Trabucco and Antony Wood. (2019). Damping Technologies for Tall Buildings. Amsterdam: Elsevier.
- [2] Zhao-Dong Xu, Teng Ge2 and Jie Liu. (2020). Experimental and Theoretical Study of High-Energy Dissipation-Viscoelastic Dampers Based on Acrylate-

Rubber Matrix. Journal of Engineering Mechanics **146**. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001802.

- [3] Zhao-Dong Xu, Deng-Xiang Wang and Chun-Fang Shi. (2010). Model, tests and application design for viscoelastic dampers. Journal of Vibration and Control **17**(9), 1359-1370. DOI: 10.1177/107754631-0373617
- [4] C.S. Tsai, Associate Member, ASCE and H.H. LeC. (1993). Application of Viscoelastic Dampers to High-Rise Buildings. Journal of Structural Engineering **119**, 1222-1233.
- [5] Zhao-Dong Xu, Hong-Tie Zhaoc and Ai-Qun Li. (2004). Optimal analysis and experimental study on structures with viscoelastic dampers. Journal of Sound and Vibration **273**, 607-618. DOI:10.1016/S-0022460X(03)00522-4
- [6] Dynamic Isolation Systems. (2017). Viscous Wall Damper Modelling Guide. Nevada: Button Engineering.
- [7] Xilin Lu, Ying Zhou and Feng Yan. (2008). Shaking Table Test and Numerical Analysis of RC Frames with Viscous Wall Dampers. Journal of Structural Engineering **134**, 64-76. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(64)