

การเพิ่มสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารเรียน
ด้วยผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก
Seismic Performance Improvement of
School Building using Viscoelastic Wall Damper

ณัฐดนัย เลียงประไพพันธ์¹, รัชชานนท์ ช่างมาน², สิริพงศ์ เพ็ชรประดิษฐ์³ และ ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการเพิ่มสมรรถนะการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกที่ติดตั้งแทนผนังอาคารแบบเดิม โดยผนังสลายพลังงานนี้จะนำไปติดตั้งในอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 5 ชั้น ในเขตกรุงเทพมหานคร แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวสมมติจำนวน 9 คลื่น ที่สอดคล้องกับสเปกตรัมออกแบบของกรุงเทพมหานครด้วยโปรแกรม ETABS จากผลการทดสอบพบว่าผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกมีการลดแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการวิบัติของอาคารที่จะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นผนังสลายพลังงานนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการออกแบบอาคารเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก, อาคารเรียน, พลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา

Abstract

This research is to study the efficiency in increasing the silk-earth resistance performance of school buildings equipped with viscoelastic wall damper installed in place of traditional building walls. This energy-dissipating sheet will be installed in a 5-storey reinforced concrete school building in Bangkok. The structure was analyzed by time-history nonlinear dynamics method. Under 9 fictitious seismic waves corresponding to the Bangkok design spectrum using ETABS program, the test results showed

that the viscoelastic energy-dissipating wall panels significantly reduced the forces caused by earthquakes. **significant** It can also prevent building disasters to occur. Therefore, this energy-dissipating wall is an alternative to building design to increase the building's seismic resistance effectively.

Keywords: Viscoelastic Wall Damper, School Building, Time history nonlinear dynamics

1. บทนำ

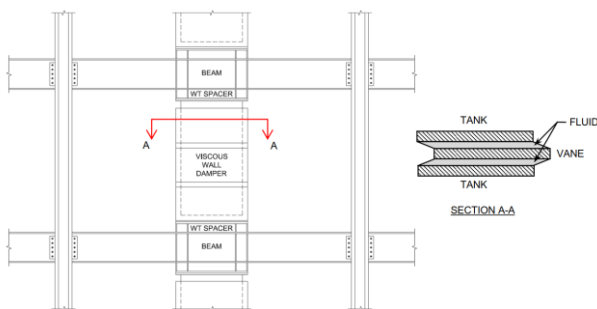
ในปัจจุบันเนื่องจากแผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ไม่สามารถคาดเดาเวลา แล่งที่เกิด และขนาดของความรุนแรงได้ จึงไม่สามารถเตรียมการรับมือ และแจ้งเตือนผู้คนเพื่ออพยพผู้คนเหมือนกับเหตุการณ์ภัยพิบัติอื่น ๆ ได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายหรือความสูญเสียที่เกิดจากแผ่นดินไหว สามารถทำได้โดยการออกแบบอาคารที่มีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้เพียงพอโดยอาคารอาจเกิดความเสียหายแต่ไม่พังทลาย ซึ่งอาคารเรียนตัวอย่างที่นำมาศึกษานี้เป็นอาคารที่ก่อสร้างก่อนปี พ.ศ.2540 ก่อนที่จะมีกฎหมายบังคับให้ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ดังนั้นการติดตั้งตัวหน่วงหรือตัวเสริมกำลังจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการเพิ่มกำลังต้านแผ่นดินไหว โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวหน่วงที่ช่วยสลายพลังงานจากการเกิดแผ่นดินไหวและช่วยลดความเสียหายของอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้นได้ เพราะเป็นทางเลือกที่ประหยัดและเหมาะสมกับแผ่นดินไหวระยะไกล และเมื่อได้ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับผนังสลายพลังงานในอดีตพบว่าตัวหน่วงที่นำเสนออาจมีข้อจำกัดคือ มีขนาดใหญ่และไม่สวยงาม นอกจากนี้ยังไม่นิยมติดตั้งเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย

สำหรับงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาดำรงที่ไม่มีผลกระทบต่อความสวยงามของอาคารสิ่งปลูกสร้าง และมีราคาที่ไม่สูงจนเกินไป คือ ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก โดยผนังจะเป็นชุดใบพัดที่ติดอยู่กับชั้นด้านบนที่ทำการติดตั้ง VWD (Viscoelastic Wall Damper) จุ่มอยู่ในของเหลวที่บรรจุอยู่ในถังที่ติดอยู่กับพื้น และเมื่อเกิดแรงด้านข้างซึ่งก็คือแรงแผ่นดินไหวและแรงลม ชุดใบพัดที่เคลื่อนที่ในของเหลวจะเกิดเป็นแรงหน่วงเพื่อต้านการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง โดยแรงต้านทานจะมาจาก 2 ส่วนคือ สติฟเนส และความหน่วงจากของเหลวที่บรรจุในถัง ซึ่งผนังสลายพลังงานนี้สามารถติดตั้งทดแทนผนังเดิมได้โดยไม่รบกวนการใช้งานของอาคารเดิม โดยทำการจำลองอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 5 ชั้น ที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว แล้วทำการวิเคราะห์แบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติกกับอาคารเดิมที่ไม่มีการติดตั้ง

2. ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก

2.1 ผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก

อุปกรณ์สลายพลังงานแบบ VWD (Viscous Wall Damper) จะมีชุดใบพัด (Vane) ติดอยู่กับชั้นด้านบนของอาคารที่ทำการติดตั้ง VWD จุ่มอยู่ในของเหลวที่บรรจุอยู่ในถังที่อยู่ติดกับระดับพื้นที่ทำการติดตั้ง VWD เมื่ออาคารเกิดการเคลื่อนที่จากแรงด้านข้าง เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวหรือแรงลม ชุดใบพัด (Vane) จะพยายามเคลื่อนที่ในของเหลวจนเกิดเป็นแรงหน่วงขึ้นจาก Shear Action เพื่อต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้าง ปริมาณของแรงหน่วงจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใบพัด (Vane) พยายามเคลื่อนที่ในของเหลว โดยแรงต้านจะมาจากสองส่วน ได้แก่ สติฟเนสและความหน่วงจากของเหลวที่ถูกบรรจุอยู่ในถัง



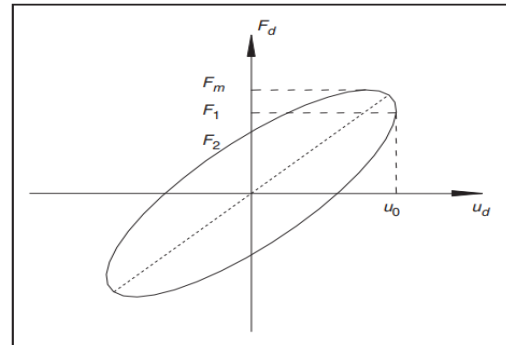
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของ VWD (James Newell, 2011)

2.2 การทดสอบคุณสมบัติของ VWD

อุปกรณ์สลายพลังงานที่จะทำการติดตั้งเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับโครงสร้าง จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASCE7-16 เพื่อทำการหาคุณสมบัติสติฟเนสและความหน่วงของ VWD สำหรับใช้ในแบบจำลอง NLLINK Maxwell ในการวิเคราะห์โครงสร้าง การทดสอบ VWD จะทำโดยการให้การเคลื่อนที่แบบ Loop ขนาดของการเคลื่อนที่ จะขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงจากแรงแผ่นดินไหวและแรงลม เป็นการเคลื่อนที่ทางด้านข้างในแนวเดียวกับ

ระนาบของ VWD เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานประเภทตัวหน่วง VWD ในอาคารที่ต้องรับแรงแบบพลศาสตร์ กล่าวคือแรงมีปริมาณและทิศทางเปลี่ยนแปลงไปอยู่ตลอดเวลาทำให้ของเหลวที่ถูกบรรจุอยู่ในถังเกิดความร้อนเนื่องจาก Shearing Action กับชุดใบพัด ทำให้การทดสอบอุปกรณ์สลายพลังงาน VWD จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ

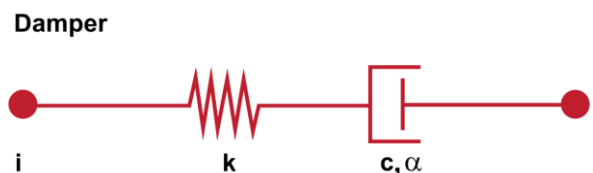
โดยการทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์สลายพลังงาน VWD จะบันทึกแรงที่เกิดขึ้นใน VWD เนื่องจากการเคลื่อนที่ทางด้านข้างในรูปแบบ Hysteresis Loop



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สลายพลังงาน (ฐิติพงศ์ เจริญสุข, 2021)

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวหน่วงสลายพลังงาน VWD

แบบจำลองตัวหน่วงแบบสลายพลังงาน VWD จะมีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 2 อย่าง ได้แก่ สติฟเนส และความหน่วง CSI (2016) ได้นแนะนำว่าแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับ Viscous Wall Damper (VWD) มากที่สุดคือ แบบจำลอง Exponential Maxwell โดยจะมีความสัมพันธ์ของการแรงและการเคลื่อนที่ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) โดยทำการจำลอง VWD เป็นองค์อาคาร NLLINK (Non-linear Link) ที่ประกอบไปด้วย Linear Spring ที่มีการต่ออนุกรมกับ Exponential Damper

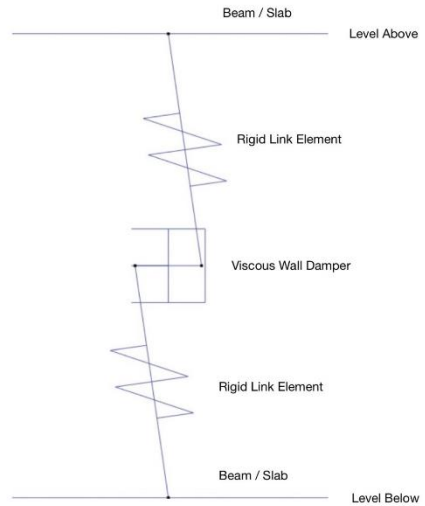


รูปที่ 3 แบบจำลอง Exponential Maxwell ของ VWD (DIS, 2017)

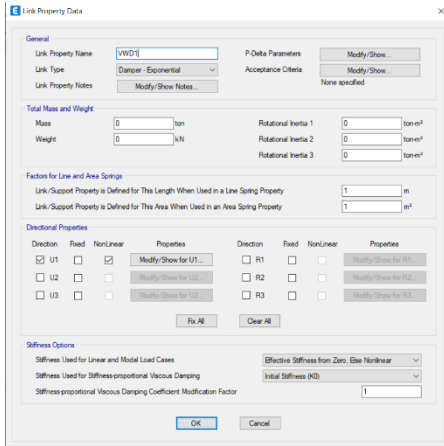
2.4 แบบจำลองตัวหน่วงสลายพลังงานของ VWD ในอาคาร

ในการสร้างแบบจำลองตัวหน่วงสลายพลังงาน VWD ในอาคาร Dynamic Isolation System ได้มีการให้คำแนะนำว่า ให้สร้างแบบจำลองตัวหน่วงสลายพลังงานด้วยองค์อาคารประเภท Non-linear Link โดยใช้เป็นชนิด Damper-Exponential ที่วางตัวอยู่ในแนวอนซึ่งมีความยาวโดยประมาณ 15 เซนติเมตร เพื่อที่จะเป็นตัวแทนของคุณสมบัติ

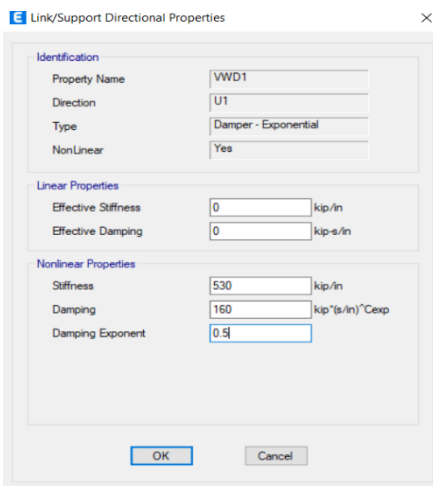
สติฟเนสกับความหน่วง โดยแบบจำลอง VWD นี้ จะมีคุณสมบัติของ สติฟเนสและความหน่วงตามแนวระนาบเท่านั้นและให้สมมติฐานว่าไม่มี คุณสมบัติของสติฟเนสและความหน่วงในด้านนอกระนาบ จากนั้นให้ใช้องค์อาคาร Rigid Link ซึ่งมีคุณสมบัติยึดแน่น (Fixed) ในทุก ๆ ระดับของเสาอิสระ (Degree of Freedom) ยึดโยงองค์อาคาร Non-Linear Link ของ VWD ให้เข้ากับระดับพื้นทั้งชั้นบนและล่าง



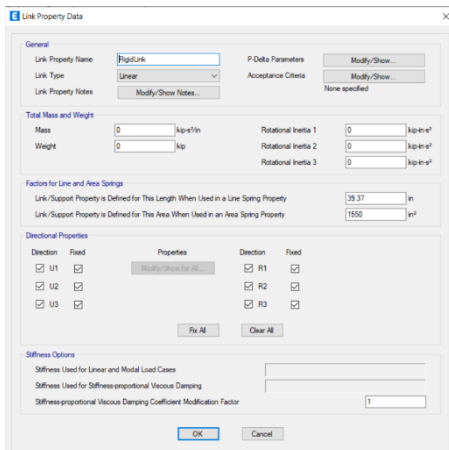
รูปที่ 7 แบบจำลองตัวหน่วงสลายพลังงาน VWD ในอาคาร



รูปที่ 4 ชนิดขององค์อาคาร Nonlinear Link, Damper - Exponential ของ VWD ในโปรแกรม ETABS



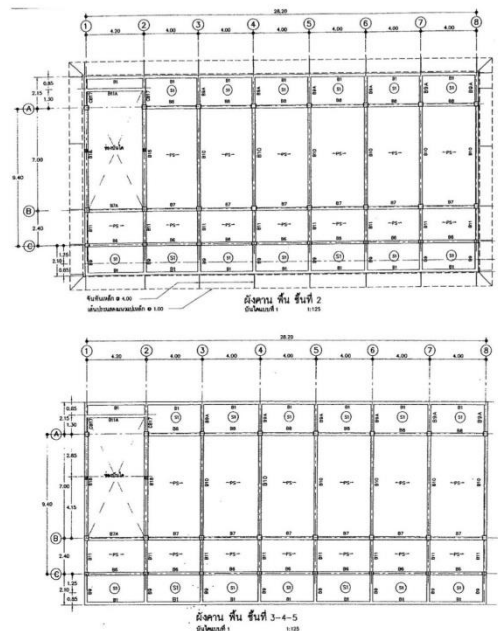
รูปที่ 5 คุณสมบัติ Stiffness และความหน่วงขององค์อาคาร Nonlinear Link, Damper - Exponential ของ VWD



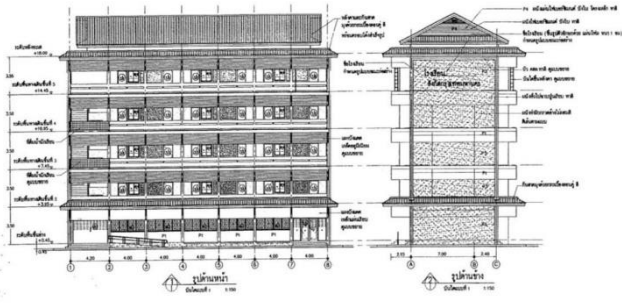
รูปที่ 6 ชนิดขององค์อาคาร Rigid Link ในโปรแกรม ETABS

3. อาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่าง

อาคารที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารเรียนมาตรฐานขนาด 5 ชั้น โดยอาคารถูกออกแบบโดยให้ชั้นแรกเป็นโถงโถงและมีคานกว้าง 4 เมตร ยาว 7 เมตร และสูง 3.5 เมตร ชั้นที่ 2-5 เป็นห้องเรียน ขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 7 เมตร และสูง 3.5 เมตร บริเวณหน้าห้องเรียนถูกออกแบบให้เป็นทางเดิน กว้าง 2.4 เมตร ตัวอาคารเรียนมีขนาดกว้าง 13.65 เมตร และมีความสูง จากพื้นดิน 17.91 เมตร ส่วนความยาวของอาคารจะปรับเปลี่ยนตามพื้นที่ ที่จะทำการสร้างอาคารเรียน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้อาคารเรียนตัวอย่างที่มีความกว้าง 28.2 เมตร แสดงในรูปแบบแปลนของอาคารตามรูปที่ 8 และรูปด้านของอาคารตามรูปที่ 9 โดยอาคารเรียนตัวอย่างหลังนี้ได้ทำการ ออกแบบตามมาตรฐานในปี 2536 ซึ่งยังไม่มีการออกแบบเพื่อต้านทานแรง แผ่นดินไหว สำหรับชั้น 2-5 อาคารออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุก จจร 400 กก/ม² กำหนดกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 210 ksc



รูปที่ 8 รูปแปลนอาคารเรียนตัวอย่าง



รูปที่ 9 รูปด้านข้างของอาคารเรียนตัวอย่าง

4. การประเมินความปลอดภัยของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจากการต้านทานแรงแผ่นดินไหว

วิวัฒน์ เสมาชัย และ วิกรม พนิชการ (2017) ได้ศึกษาความมั่นคงแข็งแรงของอาคารโรงเรียนแม่ลาววิทยาคม จังหวัดเชียงราย ในการรับแรงสั่นไหวเทียบเท่าจากแผ่นดินไหวโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ โปรแกรม ETABS 2015 โดยหนึ่งในประเด็นสำคัญที่ทำการศึกษาคือ การประเมินความเสียหายขององค์อาคาร พิจารณาจากอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ (Interaction Ratio) ขององค์อาคารแบบคาน – เสา (Beam-Column Member) มีสมการ ดังนี้

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{m_x}{M_x} + \frac{m_y}{M_y} \leq 1.00 \quad (1)$$

เมื่อ f_a คือ แรงอัดตามแนวแกนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกและแรงด้านข้าง

F_a คือ กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนขององค์อาคาร

m_x คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกและแรงด้านข้างรอบแกนหลัก

M_x คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดขององค์อาคารรอบแกนหลัก

m_y คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกและแรงด้านข้างรอบแกนรอง

M_y คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดขององค์อาคารรอบแกนรอง

จากอัตราส่วนข้างต้น โปรแกรม ETABS เรียกว่า PMM Ratio หรือ Capacity Ratio จะพิจารณาการเปรียบเทียบระหว่างแรงภายในที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกและแรงด้านข้างกับกำลังขององค์อาคาร โดยให้โปรแกรมใช้การคำนวณตามมาตรฐาน ACI 318-99 ถ้า Capacity Ratio น้อยกว่า 1.00 แสดงว่าองค์อาคารนั้นเกิดแรงภายในต่ำกว่ากำลังที่องค์อาคารรับได้และปลอดภัย แต่ถ้า Capacity Ratio มากกว่า 1.00 แสดงว่าองค์อาคารนั้นเกิดแรงภายในมากกว่ากำลังที่องค์อาคารรับได้และไม่ปลอดภัย ซึ่งโปรแกรม ETABS จะแสดงตำแหน่งองค์อาคารด้วยสีแดง

โดยการประเมินความสามารถการต้านทานแผ่นดินไหวจะตรวจสอบโดยค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) จากโปรแกรม ETABS จะกำหนดเกณฑ์การประเมินตามรูปที่ 10 ซึ่งถ้าค่า DCR มากกว่า 1.00 ชิ้นส่วนที่ปรากฏในโปรแกรม ETABS จะเป็นสีแดง ซึ่งหมายความว่า ชิ้นส่วนไม่ผ่านเกณฑ์ประเมิน ต้องทำการปรับปรุงชิ้นส่วน



รูปที่ 10 การแสดงระดับความปลอดภัยด้วยค่า Demand-Capacity Ratio ในโปรแกรม ETABS

5. การทดสอบ และ ผลการทดสอบ

อุปกรณ์สลายพลังงาน VWD ที่จะใช้ทำการติดตั้งเพื่อเสริมสร้างการป้องกันแรงแผ่นดินไหวให้กับโครงสร้างนั้น มีความจำเป็นที่ต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด โดยใช้มาตรฐาน ASCE7-16 เพื่อที่จะหาคุณสมบัติสตีฟเนสและความหน่วงของ VWD สำหรับใช้ในแบบจำลอง NLLINK Maxwell ในการวิเคราะห์การทดสอบ VWD โดยจะให้การเคลื่อนที่เป็นแบบวัฏจักร

5.1 การทดสอบคุณสมบัติของ VWD ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ภายใต้แรงแผ่นดินไหว ตามมาตรฐาน ASCE7-16 ได้มีการกำหนดให้ทำการทดสอบอุปกรณ์สลายพลังงานที่มีการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง จากแรงแผ่นดินไหวที่มีขนาดมากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (Maximum Credible Earthquake , MCE) สำหรับใช้ในการประเมินคุณสมบัติสตีฟเนสและความหน่วงของอุปกรณ์สลายพลังงานด้วย Fully Reversed Sinusoidal Cycle ที่มีความถี่ของการเคลื่อนที่เท่ากับ $1/(1.5T)$ โดย T คือ คาบธรรมชาติหลักของอาคาร

5.2 การทดสอบคุณสมบัติของ VWD ภายใต้แรงลม

ภายใต้แรงลม ตามมาตรฐาน ASCE7-16 ได้มีการกำหนดให้ทำการทดสอบอุปกรณ์สลายพลังงานที่มีการเคลื่อนที่ทางด้านข้างสูงสุดจากแรงลม น้ำหนักบรรทุกทุกในสภาวะการใช้งาน หรือ Service Load ด้วย Fully Reversed Sinusoidal Cycle โดยมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 2000 รอบ ที่มีความถี่ของคลื่นเท่ากับ $1/T$ โดยที่ T คือความถี่ธรรมชาติของอาคาร

5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงสลายพลังงาน VWD

แบบจำลองตัวหน่วงแบบสลายพลังงาน VWD จะมีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 2 อย่าง ได้แก่ สตีฟเนส และ ความหน่วง CSI (2016) ได้แนะนำว่าแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับ VWD มากที่สุดคือ แบบจำลอง Exponential Maxwell ที่แสดงอยู่ดัง รูปที่ 3 โดยจะมีความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนที่ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น Non-linear โดยทำการจำลอง VWD เป็นองค์อาคาร NLLINK (Non-linear Link) ที่ประกอบไปด้วย Linear Spring ที่มีการต่ออนุกรมกับ Exponential Damper ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของแบบจำลองสามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$f = kd_k = cd_c^{cexp} \quad (2)$$

$$d = d_k + d_c \quad (3)$$

- โดย f คือ แรงที่เกิดขึ้นภายในขององค์อาคาร NLLINK
- k คือ สตีฟเนสของสปริง
- dk คือ การเสียรูปของสปริง
- c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง

- dc คือ ความเร็วของตัวหน่วง
- $cexp$ คือ เลขชี้กำลังของตัวหน่วง
- d คือ การเสียรูปทั้งหมดขององค์อาคาร NLLINK
- dc คือ การเสียรูปทั้งหมดขององค์อาคาร NLLINK

5.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์สลายพลังงาน VWD จาก Dynamic Isolation Systems (DIS)

ภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา (2021) ได้การทดสอบคุณสมบัติของ VWD โดยเลือกใช้ผลทดสอบ VWD จากบริษัท Dynamic Isolation Systems ซึ่งเป็นบริษัทพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ช่วยรับมือกับแรงแผ่นดินไหว ตัวอย่าง VWD จะได้รับการทดสอบการโยกตัวทางด้านข้างในรูปแบบความถี่ จำนวนรอบ และการเคลื่อนตัวที่ต่างกัน โดยทำการทดสอบความถูกต้องของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ที่รองรับ Cyclic Loading หรือ Hysteresis Loop เปรียบเทียบกับแบบจำลอง NLLINK โดยซอฟต์แวร์ ETABS

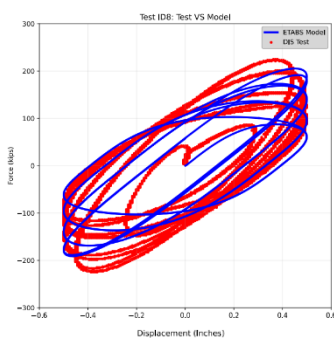


รูปที่ 11 แบบจำลอง VWD ที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการ (ภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา, 2021)

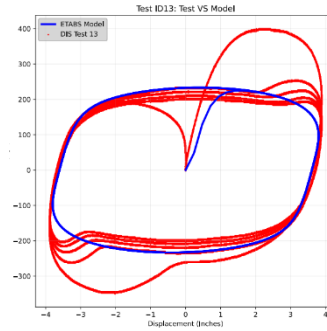
ผลการตอบสนองของ VWD จากซอฟต์แวร์ ETABS แรงภายในแนวแกนและการเสียรูป นำมาสร้างความสัมพันธ์ Hysteresis Loop เปรียบเทียบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีความใกล้เคียงกัน ทำให้ผู้จัดทำสามารถเลือกใช้คุณสมบัติของ VWD จากการทดสอบของ Dynamic Isolation Systems มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 1 ผลตอบสนองแนวแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดและ Hysteresis Area ของแบบจำลองเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการ (ภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา, 2021)

Test ID	Force Max (kips)			Hysteresis Area (kips-inch)		
	Model	Test	Model /Test	Model	Test	Model /Test
8	202	225	0.90	1040	1500	0.70
13	230	250	0.92	14641	15164	0.97



รูปที่ 12 Hysteresis Loop ของการทดสอบ หมายเลข 8 (ภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา, 2021)



รูปที่ 13 Hysteresis Loop ของการทดสอบ หมายเลข 13 (ภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา, 2021)

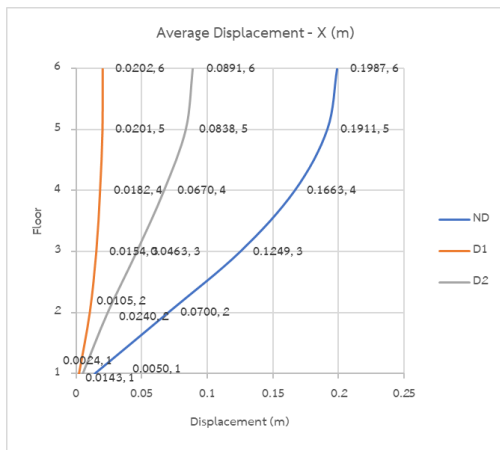
6. ประสิทธิภาพของผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก

งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมของอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก และวิเคราะห์ผลของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกที่มีผลต่อการสลายพลังงานของอาคารเรียนตัวอย่าง โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา (Nonlinear Time History Dynamic Analysis) โดยโปรแกรม ETABS ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวจากมาตรฐานของ มยผ.1301/1302-61 จำนวน 9 คลื่น ซึ่งใช้การวิเคราะห์ที่ความละเอียดขั้นเวลา (Time Step) เท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.02 วินาที ขึ้นกับคลื่นที่มาจากมาตรฐาน มีค่าความเร่งสูงสุดที่พื้นดินของคลื่นแผ่นดินไหวที่ต่างกัน มีการปรับความรุนแรงของแผ่นดินไหวเป็นแบบ Design Basis Earthquake (DBE) โดยคลื่นแผ่นดินไหวกระทำในสองทิศทางของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก และพิจารณาผลของ P-Delta จากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งร่วมด้วย สำหรับงานวิจัยนี้ จะเลือกคุณสมบัติของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกที่จะนำไปใช้ในโปรแกรม ETABS กำหนดให้ผนังมีขนาดกว้าง 8 ฟุต สูง 11 ฟุต ใบบัดที่ใช้เป็นแบบใบบัดคู่ (Double Shear) มีค่าสติฟเนส (K) เท่ากับ 530 kip/in และมีความหน่วงตามแนวราบ (C) เท่ากับ 160 [k-(sec/in/0.5)]

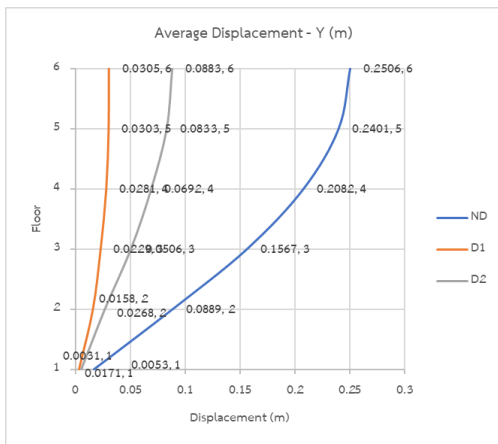
6.1 การเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นของอาคาร

การลดลงของค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นของอาคารเรียนตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 9 คู่คลื่น แสดงไว้ในรูปที่ 14 และ รูปที่ 15 พบว่าการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกส่งผลให้การเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด และอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นต่ำกว่ารูปแบบที่ 2 โดยการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 ให้กับอาคาร พบว่า สามารถลดการเคลื่อนตัวสูงสุดในทางแกน X ของอาคารได้สูงสุด 89.49% ที่บริเวณชั้นที่ 5 และสามารถลดการเคลื่อนตัวสูงสุดในทางแกน Y ของอาคารได้สูงสุด 87.40% ที่บริเวณชั้นที่ 5 เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 ให้กับอาคาร พบว่าสามารถลดการเคลื่อนตัวสูงสุดในทางแกน X ของอาคารได้สูงสุด 65.78% ที่บริเวณชั้นที่ 2 และสามารถลดการเคลื่อนตัวสูงสุดในทางแกน Y ของอาคารได้สูงสุด 69.85% ที่บริเวณชั้นที่ 2

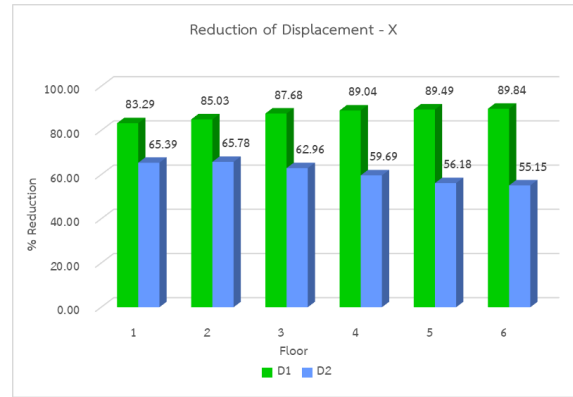
ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสูงสุดที่บริเวณชั้นหลังคา (กำหนดให้ในรูป ชั้นหลังคา คือ Floor ที่ 6) จากคลื่นแผ่นดินไหว 9 คู่คลื่น พบว่าอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกทั้ง 2 รูปแบบ มีการเคลื่อนตัวที่บริเวณชั้นหลังคาน้อยกว่าอาคารเรียนที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก ถึงแม้ว่าอาคารจะไม่มีรังพังหลายเกิดขึ้น แต่จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกจะสามารถทำให้อาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ดีกว่าการไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก เนื่องจากสามารถลดการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้นของอาคารและบริเวณชั้นหลังคาอย่างเห็นได้ชัด



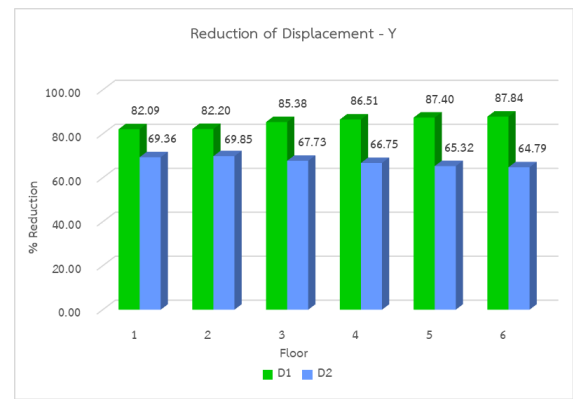
รูปที่ 14 ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นของอาคารตามทิศทางแกน X



รูปที่ 15 ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นของอาคารตามทิศทางแกน Y



รูปที่ 16 ร้อยละการลดลงของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นของอาคารตามทิศทางแกน X เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก



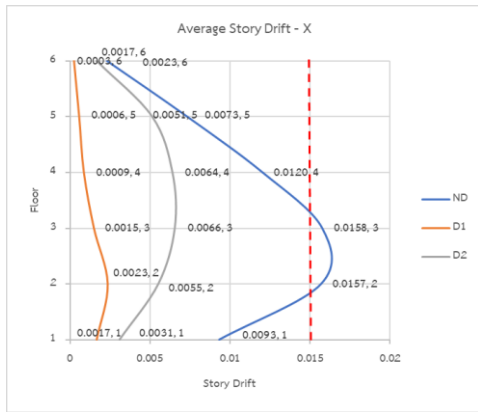
รูปที่ 17 ร้อยละการลดลงของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้นของอาคารตามทิศทางแกน Y เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก

6.2 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคาร

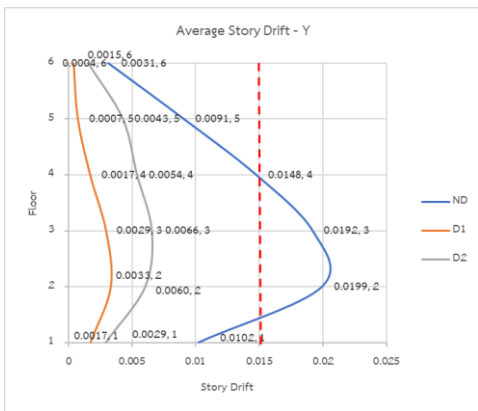
การลดลงของค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดของอาคารที่มีคลื่นแผ่นดินไหว 9 คู่คลื่นกระทำ แสดงไว้ในรูปที่ 18 และ รูปที่ 19 พบว่าการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกส่งผลให้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดของอาคารลดลงอย่างเห็นได้ชัด และอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดต่ำกว่ารูปแบบที่ 2 โดยการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 ให้กับอาคาร พบว่าสามารถลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดในทางแกน X ของอาคารได้สูงสุด 89.84% ที่บริเวณชั้นที่หลังคา และสามารถลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่สุดในทางแกน Y ของอาคารได้สูงสุด 92.26% ที่บริเวณชั้นที่ 5 เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 ให้กับอาคาร พบว่าสามารถลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่สุดในทางแกน X ของอาคารได้สูงสุด 65.78% ที่บริเวณชั้นที่ 2 และสามารถลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่สุดในทางแกน Y ของอาคารได้สูงสุด 71.58% ที่บริเวณชั้นที่ 1

ยิ่งไปกว่านั้น จากรูปที่ 20 และรูปที่ 21 พบว่า เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกในทั้ง 2 รูปแบบ จะสามารถลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นทั้งในแนวแกน X และ แนวแกน Y (ตาม Global Axis)

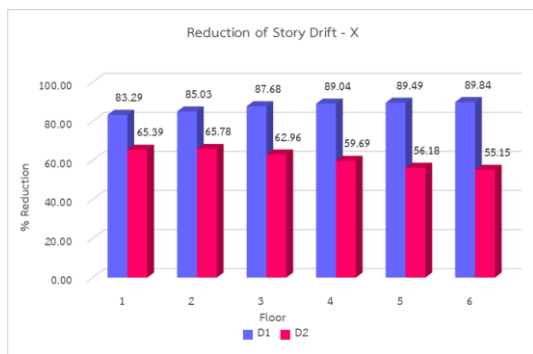
จนเหลือค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานการออกแบบของ มยผ.1301/1302-61 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.015 (กำหนดให้อาคารมีระดับความสำคัญมาก) แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นให้กับอาคารและสามารถนำไปออกแบบจริงได้



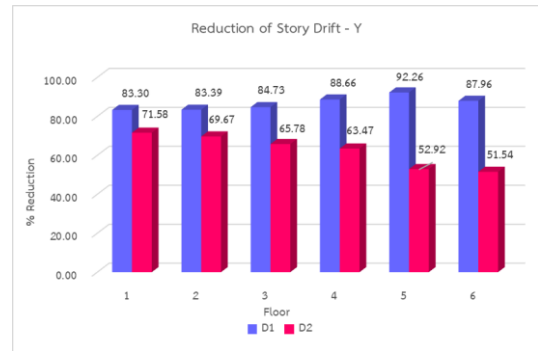
รูปที่ 18 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดของอาคารตามทิศทางแกน X



รูปที่ 19 ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดของอาคารตามทิศทางแกน Y



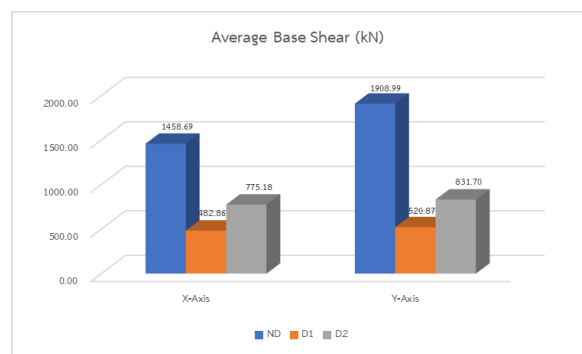
รูปที่ 20 ร้อยละการลดลงของการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดของอาคารตามทิศทางแกน X เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก



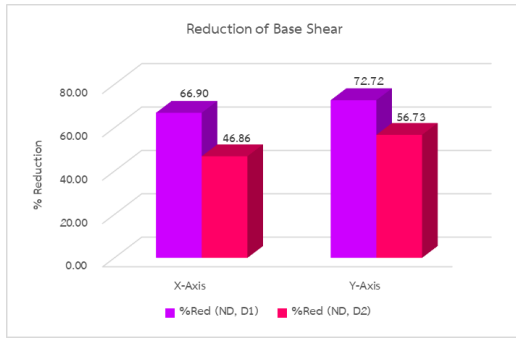
รูปที่ 21 ร้อยละการลดลงของการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นมากที่สุดของอาคารตามทิศทางแกน Y เมื่อติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก

6.3 ค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด

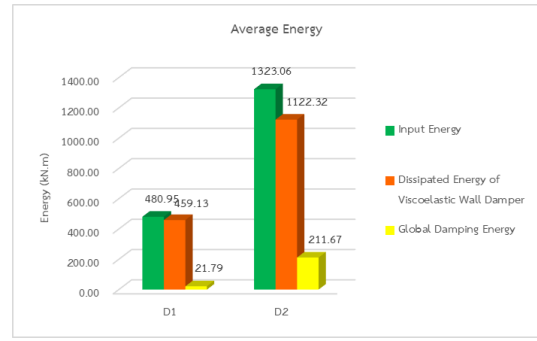
ค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด แสดงไว้ในรูปที่ 22 และร้อยละการลดลงของแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด แสดงไว้ในรูปที่ 23 พบว่าการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกส่งผลให้แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 สามารถลดแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารในทางแกน X ได้เฉลี่ย 66.90% และสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารในทางแกน Y ได้เฉลี่ย 72.72% อาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 สามารถลดแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารในทางแกน X ได้เฉลี่ย 46.86% และสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารในทางแกน Y ได้เฉลี่ย 56.73% เมื่อเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกทั้ง 2 รูปแบบพบว่าอาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 สามารถลดแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารได้มากกว่าอาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 ซึ่งการลดลงของแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดจะส่งผลให้เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำต่ออาคาร แรงเฉือนที่ถูกกระจายเป็นแรงที่กระทำด้านข้างเข้าในทุก ๆ ชั้นของอาคารจะลดลง และโมเมนต์พลิกคว่ำของอาคารลดลงเมื่อเทียบกับโมเมนต์การต้านของอาคารที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อมีการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก



รูปที่ 22 ค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารเรียนตัวอย่าง



รูปที่ 23 ร้อยละของการลดลงของค่าเฉลี่ยแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของอาคารเรียนตัวอย่าง

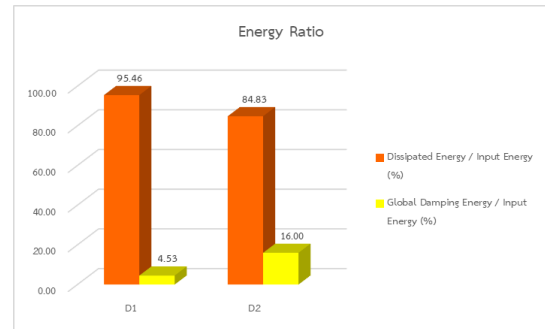


รูปที่ 24 ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในอาคารเรียนตัวอย่าง

6.4 การสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก

การสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกจะพบว่ามีอาคารเกิดการเคลื่อนตัวมากขึ้น เนื่องจากแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคารมีความรุนแรงมากขึ้น จะพบว่าผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกจะสามารถสลายพลังงานที่กระทำต่ออาคารได้สูงขึ้น จากรูปที่ 24 อาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 มีการสลายพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 459.13 kN.m และอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 มีการสลายพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 1122.32 kN.m ในอีกประเด็นหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบการสลายพลังงานของอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกทั้ง 2 รูปแบบ จากรูปที่ 25 พบว่า อาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 จะมีการสลายพลังงานสูงกว่า อันเนื่องมาจากจำนวนการติดตั้งผนังสลายพลังงานที่มากกว่าอาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2

พลังงานที่เกิดขึ้นจากการการสั่นที่เกิดจากความหน่วงของอาคารที่ 5% (Damping Ratio 5%) พบว่าอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 มีพลังงานที่เกิดจากการสั่นจากความหน่วงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 21.79 kN.m และอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 มีพลังงานที่เกิดจากการสั่นจากความหน่วงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 211.67 kN.m เมื่อเปรียบเทียบผลของพลังงานที่เกิดขึ้นกับอาคารหลังเดียวกันในกรณีที่เกิดคลื่นแผ่นดินไหวคลื่นเดียวกันมากระทำพบว่า เมื่อการสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นจากการการสั่นที่เกิดจากความหน่วงของอาคารมีการลดลง เนื่องจากคุณสมบัติทางวัสดุของผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานที่ส่งผลให้อาคารเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 25 สัดส่วนของการสลายพลังงานที่เกิดขึ้นภายในอาคารเรียนตัวอย่าง

6.5 Demand-Capacity Ratio

การรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดของเสาในชั้นที่ 1 พิจารณาโดยค่าเฉลี่ย Demand-Capacity Ratio (DCR) แสดงในตารางที่ 55 และสถานะการพังทลายของเสาทุกต้นในชั้นที่ 1 แสดงในตารางที่ 56 พบว่าอาคารเรียนที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก (ND) จะมีค่า DCR มากกว่า 1.00 เมื่อมีคลื่นแผ่นดินไหวส่วนใหญ่มากระทำ แสดงว่าโดยรวมแล้วอาคารเรียนที่ไม่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกไม่สามารถรับแรงที่กระทำตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด ส่งผลให้อาคารเกิดการถล่ม ในส่วนของอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 (D1) จะมีค่า DCR น้อยกว่า 1.00 เมื่อมีคลื่นแผ่นดินไหวทุกกรณีมากระทำ แสดงว่าอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 1 สามารถรับแรงที่กระทำตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด ในส่วนของอาคารเรียนตัวอย่างที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกรูปแบบที่ 2 (D2) เมื่อมีคลื่นแผ่นดินไหวบางคลื่นมากระทำกับอาคาร ได้แก่ คลื่น Zone5_2.0sec_EQ_1, คลื่น Zone5_2.0sec_EQ_2, คลื่น Zone5_2.0sec_EQ_3 และคลื่น Zone5_2.0sec_EQ_4 จะทำให้ภาพรวมของเสาชั้นที่ 1 ไม่สามารถรับแรงที่กระทำตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด เนื่องจากคลื่นที่มีคาบเวลา 2 วินาที เป็นคาบเวลาที่ใกล้เคียงกับคาบธรรมชาติของอาคาร ซึ่งเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหว ทำให้มีโอกาสเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) กับตัวอาคาร และจะทำให้เสาในอาคารไม่สามารถรับน้ำหนักจนเกิดการถล่มของอาคารได้

ตารางที่ 5.56 สถานะของการรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดของเสาในชั้นที่ 1 ภายใต้อินแรงแผ่นดินไหวต่าง ๆ

No.	Earthquake Name	PGA (g)	Column Status		
			ND	D1	D2
1	Zone5_0.2sec_EQ_1	0.058	Collapse	Safe	Safe
	Zone5_0.2sec_EQ_2	0.092			
2	Zone5_0.2sec_EQ_3	0.134	Safe	Safe	Safe
	Zone5_0.2sec_EQ_4	0.144			
3	Zone5_0.2sec_EQ_5	0.139	Safe	Safe	Safe
	Zone5_0.2sec_EQ_6	0.103			
4	Zone5_2.0sec_EQ_1	0.090	Collapse	Safe	Collapse
	Zone5_2.0sec_EQ_2	0.093			
5	Zone5_2.0sec_EQ_3	0.076	Collapse	Safe	Collapse
	Zone5_2.0sec_EQ_4	0.070			
6	Zone5_2.0sec_EQ_5	0.078	Collapse	Safe	Safe
	Zone5_2.0sec_EQ_6	0.072			
7	Zone5_3.0sec_EQ_1	0.043	Collapse	Safe	Safe
	Zone5_3.0sec_EQ_2	0.069			
8	Zone5_3.0sec_EQ_3	0.075	Collapse	Safe	Safe
	Zone5_3.0sec_EQ_4	0.075			
9	Zone5_3.0sec_EQ_5	0.057	Collapse	Safe	Safe
	Zone5_3.0sec_EQ_6	0.039			

7. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพ และการเพิ่มสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก โดยอาคารตัวอย่างเป็นอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 5 ชั้น ในกรุงเทพมหานครที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว จะศึกษาโดยการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา (Nonlinear Time History Dynamic Analysis) ภายใต้อินแรงแผ่นดินไหวทั้งหมด 9 คู่คลื่น ซึ่งมาจากฐานข้อมูลของ มยผ.1301/1302-61 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีคาบการเกิดแผ่นดินไหว 2475 ปี เป็นแบบแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาในการออกแบบ (Maximum Considered Earthquake, MCE) แล้วนำมาปรับความแรงให้เป็นแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DBE) นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ETABS อาคารเรียนตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอาคารเรียนมาตรฐานของสำนักงานเลขานุการ สำนักงานการศึกษา กรุงเทพมหานคร (สนศ.385) โดยมีการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ อาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกในรูปแบบที่ 1 (D1) จะใช้หลักการติดตั้งเพื่อให้ผลการวิเคราะห์การรับกำลังของเสาสามารถรับกำลังได้ในทุก ๆ เสา อาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกในรูปแบบที่ 2 (D2) จะติดตั้งเพื่อให้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ลดลงเป็นหลัก แต่ไม่ได้พิจารณาการรับกำลังของเสา และในการวิจัยจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของอาคาร 3 รูปแบบ คือ อาคารเรียนที่ไม่ติดตั้ง

ผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก (ND) อาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกในรูปแบบที่ 1 (D1) และอาคารเรียนที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกในรูปแบบที่ 2 (D2)

จากผลการวิเคราะห์ของอาคารที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า มีประสิทธิภาพในการลดเคลื่อนตัวสูงสุดในแต่ละชั้น ลดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุด ลดแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด และเพิ่มการสลายพลังงานเนื่องจากแรงที่กระทำกับอาคาร แต่ในด้านของการรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดของเสาให้ประสิทธิภาพต่างกัน โดยการติดตั้งในรูปแบบที่ 1 สามารถทำให้อาคารต้านแรงแผ่นดินไหวและไม่เกิดการถล่ม แต่การติดตั้งในรูปแบบที่ 2 ไม่สามารถทำให้เสาสามารถรับกำลัง และไม่สามารถทำให้อาคารต้านแรงแผ่นดินไหวได้ และเกิดการถล่มไม่ต่างจากอาคารเรียนตัวอย่างเดิมที่ไม่มีการติดตั้งผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติก

จากผลการศึกษาข้างต้น สามารถสรุปการวิจัยได้ว่าผนังสลายพลังงานชนิดวิสโคอีลาสติกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุก ๆ ประเด็นที่ทำการศึกษ หากมีการติดตั้งในตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มสมรรถนะการต้านทานแผ่นดินไหวให้กับอาคารเรียนในประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Hiranvarodom, "Modeling of Strategy for Photovoltaic Development and Dissemination in Thailand", *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2003, pp. 123-133. (In case of Articles from Conference Proceedings (published))
- [2] J.E. Bowles. *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996, pp. 123-132. (In case of Book)
- [3] S. Thongmune, T. Matsumoto, S. Kobayashi, P. Kitiyodom and K. Kurosawa. "DEM simulations of push-up load tests for sand plug in steel pipe pile". *Soils and Foundations*, 51(5), pp. 959-974, May. 2011. (In case of Journal)
- [4] S. Mack. "Desperate." M.A. thesis, University of Calgary, Canada, 2000. (In case of Dissertation and Theses)
- [5] มนูญกิตติ์ คำทอง, ขวัญชัย กรพันธ์ และ นิชฌานันท์ ห่องสินหลากหลาย, "การเสริมกำลังเสาคอนกรีต", *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7*, พ.ศ.2554, หน้า 100-106. (กรณีบทความในเอกสารประกอบการประชุม)
- [6] มนูญกิตติ์ คำทอง, ขวัญชัย กรพันธ์ และ นิชฌานันท์ ห่องสินหลากหลาย, *การเสริมกำลังเสาคอนกรีต*, สำนักพิมพ์นานมี, พ.ศ.2554, หน้า 100-106. (กรณีหนังสือ)

- [7] มนูญกิตติ์ คำทอง, ขวัญชัย กรพันธ์ และ นิชฌານันท์ ห่องสินหลาก, “การเสริมกำลังเสาคอนกรีต”, *วารสารวิจัย ม.ช.*, ปีที่ 5, พ.ศ.2554, หน้า 100-106. (กรณีบทความในวารสาร)