

การประยุกต์ใช้ผนังสลายพลังงานสำหรับอาคารสูงในประเทศไทย Application of Wall Dampers for Tall Buildings in Thailand

ภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา^{1*} ทศพล ปิ่นแก้ว²

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

*Corresponding author; E-mail address: 6370222021@student.chula.ac.th, tospol.p@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบโครงสร้างอาคารสูงซึ่งมีความชะลูด มักพบกับปัญหาการออกแบบให้อาคารผ่านเกณฑ์มาตรฐานการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง เพราะอาคารสูงมีความอ่อนไหวต่อแรงด้านข้างมาก โดยปกติการเคลื่อนที่ของอาคารภายใต้แรงลมต้องไม่เกิน 1/500 ของความสูงอาคาร ตาม มยผ. 1311-50 และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวต้องไม่เกิน 0.015 ตาม มยผ. 1301/1302-61 เพื่อให้อาคารมีความมั่นคงแข็งแรงและไม่เกิดการแตกร้าวเสียหายในสภาวะน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ผนังสลายพลังงานช่วยต้านทานแรงด้านข้าง โดยใช้แผ่นเหล็กขนาดใหญ่จมอยู่ในของเหลวหนืด เมื่ออาคารเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างจะเกิดเป็นแรงต้านทานแรงด้านข้าง จากการเสียดสีของเหลวหนืด ผนังสลายพลังงานยังติดตั้งได้สะดวก ไม่กระทบต่อความสวยงามของอาคาร และใช้เป็นการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างได้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ผนังสลายพลังงานสำหรับอาคารสูงในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของการลดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของอาคาร ด้วยวิธีการติดตั้งผนังสลายพลังงานกับการเพิ่มขนาดของโครงสร้างเสาและกำแพงรับแรงเฉือน

คำสำคัญ: ผนังสลายพลังงาน, การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของอาคารสูง, การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา

Abstract

The design of tall buildings with high slenderness often encountered with problems in control of lateral movement within limits due to its flexibility. Normally, roof displacement must not exceed 1/500 of the building's height according to DPT 1311-50 in case of wind load and story drift must not exceed 0.015 according to DPT 1301/1302-61 in case of earthquake load to guarantee the building stability and avoid cracking under service load. Wall dampers have been installed in many countries to resist the wind and earthquake load. A wall damper is a set of steel vane dip in viscous liquid. When the

building moves sideways, the damping force is generated from the shear action between the vane and liquid. It is found to be effective in addition it is convenient to install and does not affect the aesthetics of the building. This research has studied the feasibility and efficiency of wall damper application for tall buildings in Thailand. Nonlinear time history analysis has been used to compare the efficiency and cost effectiveness of reducing lateral movement of the building between the installation of wall dampers and the size enlargement of columns and shear walls.

Keywords: Wall damper, Lateral movement of tall building, Nonlinear time history analysis

1. บทนำ

วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องหาวิธีต่างๆ ในการลดการเคลื่อนตัวของอาคารที่เกินเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อป้องกันความเสียหายรอยร้าวหรือการวิบัติของอาคาร โดยวิธีที่นิยมคือการเพิ่มสติเฟนส์ให้กับอาคาร เช่น การเพิ่มขนาดของเสาและกำแพงรับแรงเฉือน แต่การเพิ่มขนาดของเสาและกำแพงรับแรงเฉือน นอกจากจะเป็นการเพิ่มต้นทุนในการก่อสร้างแล้ว ในแง่ของวัสดุที่ต้องใช้มากขึ้นสำหรับการเพิ่มสติเฟนส์ ยังส่งผลให้ฐานรากต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในบางกรณีอาจติดปัญหาทางด้านสถาปัตยกรรมหรือการใช้สอยอาคารได้ เช่น ขนาดเสาที่ใหญ่เกินไปขวางทางพื้นที่ส่วนกลาง เช่น ทางเดินรถ ที่จอดรถในชั้นจอดรถของอาคารและสระว่ายน้ำ

สำหรับแนวทางในการแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัวของอาคารเนื่องจากแรงด้านข้าง หนึ่งในวิธีที่นิยมในต่างประเทศคือการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานเนื่องจากแรงด้านข้าง แม้ว่าตัวอุปกรณ์สลายพลังงานจะมีราคาสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มขนาดของโครงสร้างโดยตรงแล้วพบว่ามี ความคุ้มค่ามากกว่า แต่สำหรับอาคารสูงในประเทศไทย วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างยังคงนิยมใช้วิธีการเพิ่มขนาดของโครงสร้างเป็นหลัก เพราะความยุ่งยากและขาดข้อมูลเกี่ยวกับการนำอุปกรณ์สลายพลังงานจากต่างประเทศ มาประยุกต์ใช้ ทั้งยังมีมีความเข้าใจว่าอุปกรณ์สลายพลังงานมีราคาแพง และต้องเสียค่าใช้จ่ายมากในการบำรุงรักษา

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาพฤติกรรมของอาคารสูงที่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน เปรียบเทียบกับอาคารที่ออกแบบก่อสร้างตามปกติที่มักใช้วิธีเพิ่มขนาดของเสาหรือผนังรับแรงเฉือน เพื่อดำเนินการทางด้านข้างให้มีการเคลื่อนตัวไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดและมีกำลังที่เพียงพอ รวมถึงศึกษาต้นทุนเชิงเปรียบเทียบของวิธีการทั้งสอง เมื่อพิจารณาก่อนสร้างของอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานคร ทั้งนี้เนื่องจากในปัจจุบันมีอาคารสูงหลายอาคารในต่างประเทศพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานนั้นมีความคุ้มค่า แต่ในประเทศไทยกลับยังไม่พบว่ามีการใช้งานจริง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะระดับของแรงแผ่นดินไหวหรือแรงลมของแต่ละประเทศมีความรุนแรงที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถสรุปได้ถึงข้อดีข้อเสีย ประสิทธิภาพในการต้านทานแรง รวมถึงความคุ้มค่าเชิงการเงินได้อย่างชัดเจน การศึกษาวิจัยนี้จึงจะพิจารณาศึกษาอาคารสูงคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างจริงในเขตกรุงเทพมหานคร โดยพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการติดตั้งผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic wall dampers) เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งในอาคาร และมีรูปแบบที่ไม่กระทบต่อความสวยงาม การใช้สอยอาคารมากนัก และยังสามารถใช้ติดตั้งเพื่อเสริมกำลังให้อาคาร

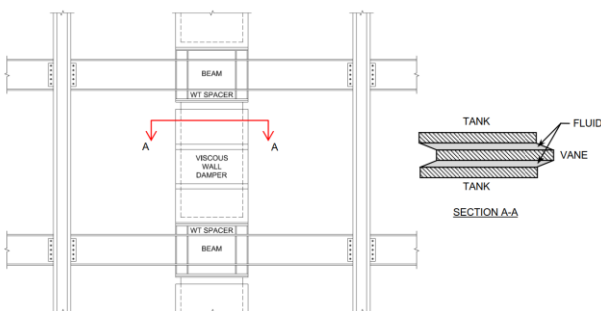
2. ผนังสลายพลังงาน

2.1 การทำงานของผนังสลายพลังงาน

ผนังสลายพลังงานจะเป็นชุดใบพัด (Vane) ติดตั้งที่ระดับด้านบนของชั้น จุ่มอยู่ในของเหลวหนืดที่บรรจุอยู่ในถังที่ติดตั้งที่ระดับพื้นด้านล่าง เมื่ออาคารเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ชุดใบพัด (Vane) จะพยายามเคลื่อนที่ผ่านของเหลวหนืด เกิดเป็นแรงหน่วง (Damping force) จาก Shearing action เพื่อดำเนินการต้านทานข้าง โดยแรงต้านทานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติสตีฟเนสและความหน่วงของของเหลวหนืดที่บรรจุในถัง

2.2 คุณสมบัติของผนังสลายพลังงาน

การหาคุณสมบัติสตีฟเนสและความหน่วงของผนังสลายพลังงาน หาได้จาก การทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยมาตรฐาน ASCE7 โดยให้การเคลื่อนที่ทางด้านข้างแบบวิจัจกร ขนาดของการเคลื่อนที่ที่จะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นจริงจากแรงแผ่นดินไหวและแรงลม โดยทดสอบในอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ เนื่องจากการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความร้อนส่งผลให้คุณสมบัติของของเหลวหนืดเปลี่ยนไป



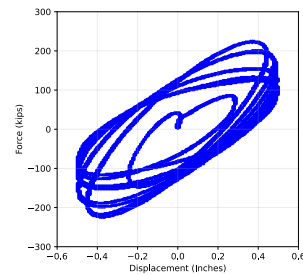
รูปที่ 1 ผนังสลายพลังงาน

สำหรับแรงแผ่นดินไหวทดสอบด้วย Fully reversed sinusoidal cycle ด้วยความถี่ของการทดสอบเท่ากับ $1/(1.5T)$ โดย T คือคาบธรรมชาติหลักของอาคาร ขนาดของการเคลื่อนที่ที่พิจารณาจากผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (MCE) โดยมีจำนวนรอบและขนาดของการเคลื่อนที่ดังนี้

- 10 รอบ ขนาดการเคลื่อนที่ 0.33MCE
- 5 รอบ ขนาดการเคลื่อนที่ 0.67MCE
- 3 รอบ ขนาดการเคลื่อนที่ 1.0MCE

สำหรับแรงลมทดสอบที่ขนาดการเคลื่อนที่ของอาคารที่วิเคราะห์ได้จากแรงลมด้วย Fully reversed sinusoidal cycle ที่จำนวนรอบไม่น้อยกว่า 2,000 รอบ ที่ความถี่เท่ากับ $1/T$ โดย T คือคาบธรรมชาติหลักของอาคาร

เมื่อทดสอบให้การเคลื่อนที่กับผนังสลายพลังงาน จะได้ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่เป็น Hysteresis loop เพื่อนำไปใช้ในการหาคุณสมบัติสตีฟเนสและความหน่วงได้ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2 Hysteresis loop

$$G_I = \frac{F_I h_v}{n_v A_v u_0} \quad (1)$$

$$k_I = \frac{n_v G_I A_v}{h_v} \quad (2)$$

$$c_d = \frac{n_v G_I \eta A_v}{\omega h_v} \quad (3)$$

โดย G_I คือ โมดูลัสสะสม (Storage modulus), F_I คือ แรงขณะเกิดการเคลื่อนที่สูงสุด, n_v คือ จำนวนชั้นของของเหลว, h_v คือ ความหนาของของเหลว, A_v คือ พื้นที่ของของเหลว, u_0 คือ การเคลื่อนที่สูงสุด, k_I คือ สตีฟเนส, c_d คือ ความหน่วง, η คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย และ ω คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่

2.3 แบบจำลองของผนังสลายพลังงาน

Lago, A., et al [1] เสนอแบบจำลองของผนังสลายที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เป็นแบบจำลอง Exponential Maxwell ที่มี ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น เป็นองค์อาคาร NLLINK (Nonlinear link) ที่ประกอบไปด้วย Linear spring ต่ออนุกรมกับ Exponential damper พฤติกรรมของแบบจำลอง Exponential Maxwell อธิบายได้โดยสมการที่ 4

$$F(t) + \frac{F(t)C_D}{K_D} = C_D \dot{u}(t) \quad (4)$$

โดย $F(t)$ คือ แรงที่เกิดขึ้น, C_D คือ ความหน่วง, K_D คือ สติฟเนส และ \dot{u} คือ ความเร็ว

Damper



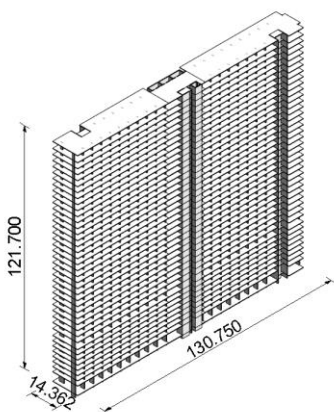
รูปที่ 3 แบบจำลอง Exponential Maxwell

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ผนังสลายพลังงานที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จาก DIS (Dynamic Isolation System) ที่มีการใช้งานในต่างประเทศและได้รับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีคุณสมบัติสติฟเนส (k) เท่ากับ 570 kip/in ความหน่วง (c) เท่ากับ 150 k-(sec/in)^α และเลขชี้กำลังของความหน่วงเท่ากับ 0.5

3. อาคารตัวอย่าง

3.1 ข้อมูลอาคารตัวอย่าง

อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาของงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นอาคารชุดที่พักอาศัย ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ความสูงรวม 126.55 เมตร จำนวน 41 ชั้น โดยแบ่งเป็นชั้น 1 ถึง ชั้น 10 เป็นชั้นที่จอดรถมีความสูงต่อชั้นเท่ากับ 2.6 เมตร ชั้น 11 ถึง ชั้น 41 เป็นชั้นพักอาศัยมีความสูงต่อชั้นเท่ากับ 3 เมตร มีพื้นที่ใช้สอยรวมประมาณ 60,000 ตารางเมตร มีความกว้าง 129.6 เมตร ความลึก 12.9 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อาคารตัวอย่าง

3.2 รูปแบบของอาคารที่ใช้ในการศึกษา

รูปแบบของอาคารที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวและแรงลม รวมไปถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายในการต้านทานแรงด้านข้าง เพื่อเปรียบเทียบหาแนวทางที่คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่

1. โครงสร้างรับแรงแนวตั้ง, Initial structure (1-INS) คือ โครงสร้างเริ่มต้น ขนาดของโครงสร้างเสา, กำแพงรับแรงเฉือนถูกออกแบบให้รองรับเฉพาะแรงในแนวตั้ง (Gravity loading) เท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากการเพิ่มขนาดของโครงสร้างหรือการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานเพื่อต้านทานแรงด้านข้าง

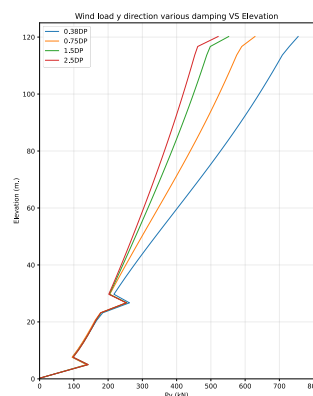
2. โครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน, Size enlargement of columns and shear walls (2-SCS) คือ โครงสร้าง (1-INS) ที่เพิ่มขนาดของเสาและกำแพงรับแรงเฉือน เพื่อให้โครงสร้างมีการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคา (Roof displacement) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story drift) ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

3. โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD) คือ โครงสร้าง (1-INS) ที่ติดตั้งผนังสลายพลังงาน ในตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสม เพื่อให้โครงสร้างมีการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคา (Roof displacement) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story drift) ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

3.3 แรงลม

อาคารตัวอย่างได้วิเคราะห์ผลตอบสนองแรงลมสถิตด้วยแบบจำลองเชิงเส้น โดยมีการทดสอบอุโมงค์ลม (Wind tunnel) เพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ได้แก่ความถี่ธรรมชาติ (Natural period) อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) และแรงกระทำต่อโครงสร้างจากการ

สภาวะใช้งานของโครงสร้างมีอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) เท่ากับ 0.0075 อาคารที่ติดตั้งผนังสลายพลังงานจะทำให้โครงสร้างมีอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ที่มากขึ้น แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างลดลง ส่งผลให้ลดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แรงลมขนาดด้านสั้นของอาคารที่อัตราส่วนความหน่วงต่างๆ

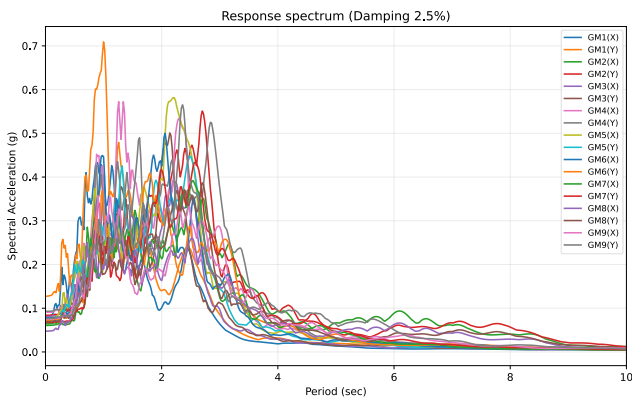
3.4 แรงแผ่นดินไหว

อาคารตัวอย่างได้วิเคราะห์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear History Analysis) ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นด้วยจุดหุนพลาสติก (Lumped plasticity models) สำหรับเสา และแบบจำลองไฟเบอร์ (Fiber Models) สำหรับกำแพงรับแรงเฉือน เลือกใช้คัลลินแผ่นดินไหวจาก มยผ. 1301/1302-61

พื้นที่โซน 5 โดยเลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะให้ผลตอบของโครงสร้างสูงที่สุดจาก Spectral Acceleration Response ของคลื่นแผ่นดินไหว คำนึงจากคาบธรรมชาติและ Mass participation ratio ของแต่ละโหมด รายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 6

ตารางที่ 1 รายละเอียดคลื่นแผ่นดินไหว

ID	Direction	Description	Duration (sec)	PGA (g)
GM1	X	0.5sec_EQ_1	80	0.0781
GM1	Y	0.5sec_EQ_2	80	-0.1275
GM2	X	1.5sec_EQ_1	327.65	-0.0636
GM2	Y	1.5sec_EQ_2	327.65	0.0838
GM3	X	1.5sec_EQ_5	175	-0.0802
GM3	Y	1.5sec_EQ_6	175	0.0668
GM4	X	2.0sec_EQ_1	220	0.0905
GM4	Y	2.0sec_EQ_2	220	0.0926
GM5	X	2.0sec_EQ_3	327.65	0.0758
GM5	Y	2.0sec_EQ_4	327.65	0.0704
GM6	X	2.0sec_EQ_5	327.65	0.0774
GM6	Y	2.0sec_EQ_6	327.65	0.072
GM7	X	2.0sec_EQ_7	327.65	0.0606
GM7	Y	2.0sec_EQ_8	327.65	0.0684
GM8	X	3.0sec_EQ_1	327.65	-0.0471
GM8	Y	3.0sec_EQ_2	327.65	0.0694
GM9	X	3.0sec_EQ_3	327.65	0.0752
GM9	Y	3.0sec_EQ_4	327.65	-0.0761



รูปที่ 6 สเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว

4. โครงสร้างรับแรงแนวตั้ง, Initial structure (1-INS)

4.1 ข้อมูลโครงสร้าง

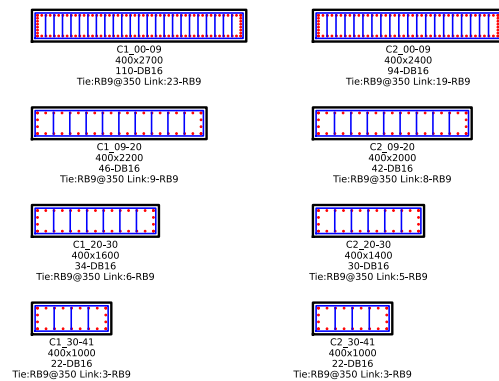
โครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS) อาคารตัวอย่างจะถูกออกแบบขนาดของเสาและกำแพงรับแรงเฉือนรองรับแรงแนวตั้งเท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนของโครงสร้างที่ต้องเพิ่มขึ้นจากการต้านทานแรงด้านข้าง มีระยะจาก

เสาถึงเสาด้านสั้นและด้านยาวเท่ากับ 5.25 เมตร และ 8.9 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 โดยพื้นเป็นระบบโพสเทนชั้นความหนา 24 เซนติเมตร ความหนาของกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 25 เซนติเมตรคงที่ตลอดความสูง ซึ่งจากการออกแบบพบว่าต้องใช้เสาตามตารางที่ 2 และรูปที่ 8



ตารางที่ 2 ขนาดเสาโครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS)

เสา_ช่วงชั้น	ความลึก (มม.)	ความกว้าง (มม.)	เปอร์เซ็นต์เสริมเหล็ก (%)
C1_00-09	2700	400	2.01
C1_09-20	2200	400	1
C1_20-30	1600	400	1
C1_30-41	1000	400	1
C2_00-09	2400	400	1.92
C2_09-20	2000	400	1
C2_20-30	1400	400	1
C2_30-41	1000	400	1



รูปที่ 8 แบบเสาโครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS)

4.2 ผลตอบสนองแรงลม

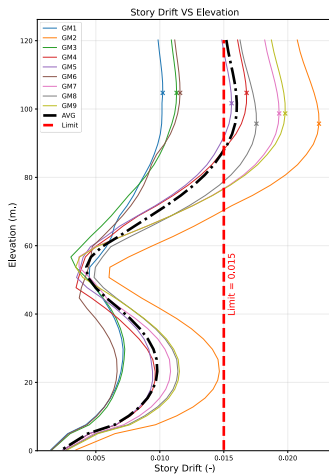
โครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS) มีการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารเท่ากับ 0.382 เมตร คิดเป็นอัตราส่วน 1.59 ของค่าที่ยอมให้ ถือว่าเกินจากค่าที่ยอมให้สูงมาก อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น ผนัง, ฝ้า และงานระบบ หรืออาจก่อให้เกิดรอยร้าว ในส่วนที่เป็นโครงสร้างพื้น เสา และกำแพงรับแรงเฉือนได้ ทั้งนี้ผลวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแรงด้านข้างมีความสำคัญต่อการออกแบบอาคารสูงอย่างมาก

4.3 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว

โครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS) มีคาบธรรมชาติหลักเท่ากับ 9.22 วินาที เกิด Plastic rotation สำหรับเสาและกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 4×10^{-5} และ 3×10^{-3} เรเดียน ตามลำดับ ซึ่งยังอยู่ในระดับระดับสมรรถนะ (Performance level) เข้าใช้งานได้ทันที (Immediate Occupancy Level, IO) มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเท่ากับ 0.0224 และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.0161 คิดเป็นอัตราส่วน 1.07 ของค่าที่ยอมให้ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 9 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 3 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวโครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS)

GM	Base Shear (ton)	Story Drift (-)	Roof Displacement (m.)
GM1	4563	0.0102	0.391
GM2	7812	0.0224	0.824
GM3	4092	0.0113	0.297
GM4	7059	0.0168	0.513
GM5	6307	0.0156	0.418
GM6	3745	0.0116	0.341
GM7	6733	0.0193	0.538
GM8	6331	0.0176	0.635
GM9	6662	0.0198	0.607
MAX	7812	0.0224	0.824
MEAN	5923	0.0161	0.507



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นโครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS)

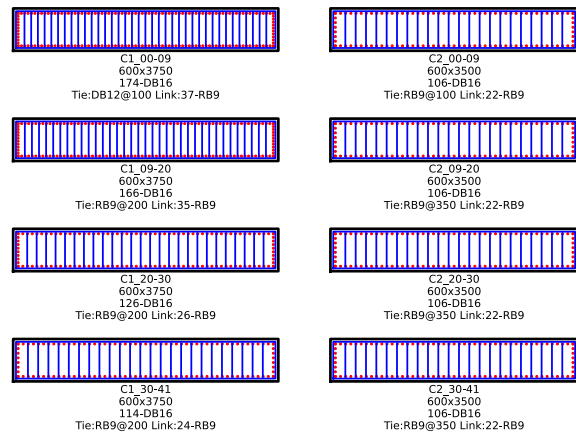
5. โครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน, Size enlargement of columns and shear walls (2-SCS)

5.1 ข้อมูลโครงสร้าง

เนื่องจากโครงสร้างรับแรงแนวตั้ง (1-INS) มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเกินเกณฑ์จากผลของแรงลม วิธีแก้ปัญหาที่นิยมคือการเพิ่มขนาดของโครงสร้างเสาและกำแพงรับแรงเฉือน เพื่อเป็นการเพิ่มสติเฟนส์ต้านทานแรงด้านข้าง เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้โดยง่าย โครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS) จะเพิ่มขนาดของเสาและกำแพงรับแรงเฉือนควบคู่กันเพื่อให้โครงสร้างมีการต้านทานทั้งการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่สูงบริเวณชั้นด้านบนของอาคารจากการเสีรูป Flexural mode ของกำแพงรับแรงเฉือน และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่สูงบริเวณชั้นด้านล่างของอาคารจากการเสีรูป Shear mode พบว่าความหนาของกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 55 เซนติเมตรคงที่ตลอดความสูง และขนาดเสาดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 10

ตารางที่ 4 ขนาดเสา โครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน

เสา_ช่วงชั้น	ความลึก (มม.)	ความกว้าง (มม.)	เปอร์เซ็นต์เสริมเหล็ก (%)
C1_00-09	3750	600	1.54
C1_09-20	3750	600	1.47
C1_20-30	3750	600	1.08
C1_30-41	3750	600	1
C2_00-09	3500	600	1
C2_09-20	3500	600	1
C2_20-30	3500	600	1
C2_30-41	3500	600	1



รูปที่ 10 แบบเสาโครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS)

5.2 ผลตอบสนองแรงลม

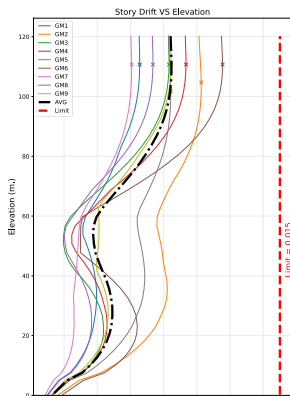
โครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS) มีการเคลื่อนตัวที่ย่ออาคารเท่ากับ 0.243 เมตร คิดเป็นอัตราส่วน 1.01 ของค่าที่ยอมให้

5.3 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว

โครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS) มีความปลอดภัยหลักเท่ากับ 8.13 วินาที เกิด Plastic rotation สำหรับเสาและกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 1.5×10^{-5} และ 1.75×10^{-3} เรเดียน ตามลำดับ ซึ่งยังอยู่ในระดับระดับสมรรถนะ (Performance level) เข้าใช้งานได้ทันที (Immediate Occupancy Level, IO) มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเท่ากับ 0.0115 และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.0085 คิดเป็นอัตราส่วน 0.567 ของค่าที่ยอมให้ ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 11 ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจะลดลง แต่แรงที่กระทำกับโครงสร้างมากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้าง ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระให้กับฐานราก และขนาดที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลกระทบต่อรูปแบบการใช้งานของอาคารอีกด้วย

ตารางที่ 5 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวโครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS)

GM	Base Shear (ton)	Story Drift (-)	Roof Displacement (m.)
GM1	5718	0.0066	0.317
GM2	10318	0.0103	0.713
GM3	6776	0.0083	0.257
GM4	6932	0.0093	0.312
GM5	7236	0.0074	0.281
GM6	8993	0.0115	0.321
GM7	6097	0.0061	0.321
GM8	6749	0.0084	0.558
GM9	6819	0.0084	0.355
MAX	10318	0.0115	0.713
MEAN	7293	0.0085	0.382



รูปที่ 11 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นโครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS)

6. โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD)

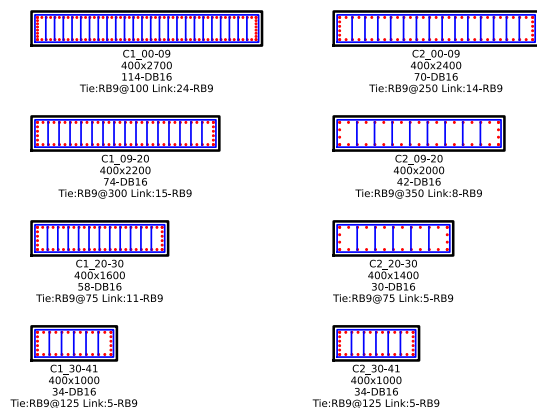
6.1 ข้อมูลโครงสร้าง

โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD) จะทำการติดตั้งผนังสลายพลังงานในตำแหน่งและจำนวนที่เหมาะสมเพื่อให้โครงสร้างผ่านเกณฑ์การเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ย่ออาคารจากแรงลมและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจากแรงแผ่นดินไหว การติดตั้งผนังสลายพลังงานจะมีข้อได้เปรียบมากกว่าการเพิ่มขนาดของโครงสร้างในแง่ของการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เช่น ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีค่าสูงที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของอาคาร เนื่องจากการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของโครงสร้างมีส่วนร่วมจากหลายโหมดของพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ การเพิ่มขนาดเสาหรือกำแพงรับแรงเฉือนเฉพาะบริเวณดังกล่าวเพื่อเพิ่มสติฟเนสเฉพาะบริเวณนั้นเป็นวิธีการที่ไม่นิยมทำ จำเป็นจะต้องเพิ่มขนาดเสาหรือกำแพงรับแรงเฉือนตลอดทั้งความสูงที่อยู่ในระดับต่ำลงไปให้มีขนาดไม่น้อยกว่าขนาดของระดับด้านบน แต่การติดตั้งผนังสลายพลังงานสามารถทำได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งผนังสลายพลังงาน เช่น ติดตั้งเฉพาะบริเวณกึ่งกลางของอาคารเท่านั้น

จากการวิเคราะห์พบว่าความหนาของกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 25 เซนติเมตรคงที่ตลอดความสูง และขนาดเสาดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 12

ตารางที่ 6 ขนาดเสา โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD)

เสา ช่วงชั้น	ความลึก (มม.)	ความกว้าง (มม.)	เปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมหลัก (%)
C1_00-09	2700	400	2.097
C1_09-20	2200	400	1.668
C1_20-30	1600	400	1.703
C1_30-41	1000	400	1.517
C2_00-09	2400	400	1.420
C2_09-20	2000	400	1
C2_20-30	1400	400	1
C2_30-41	1000	400	1.520



รูปที่ 12 แบบเสาโครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD)

6.2 การหาอัตราส่วนความหน่วงที่เพิ่มขึ้น (Additional damping ratio)

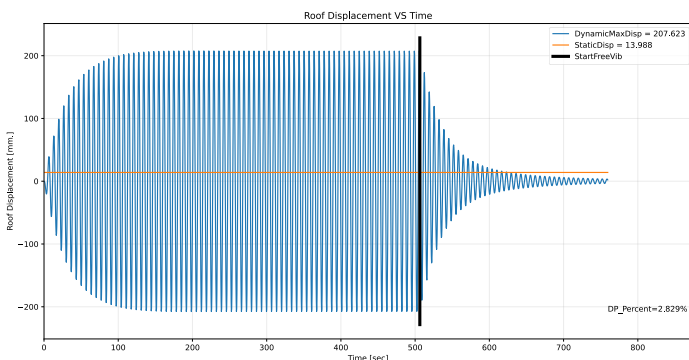
โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD) อาคารจะมีอัตราส่วนความหน่วงที่เพิ่มขึ้น (Additional damping ratio) จากผนังสลายพลังงาน การออกแบบโครงสร้างให้มีการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารผ่านเกณฑ์มาตรฐานจำเป็นต้องทดลองหาอัตราส่วนความหน่วงรวม (Total damping ratio)

จากการทดลองเพิ่มอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) พบว่าอัตราส่วนความหน่วงจากผนังสลายพลังงาน (Additional damping ratio) ที่จะต้องเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.08% เมื่อรวมอัตราส่วนความหน่วงโดยธรรมชาติของอาคาร (Inherent damping ratio) เท่ากับ 0.75% รวมเป็นอัตราส่วนความหน่วงทั้งหมด (Total damping ratio) เท่ากับ 2.83% การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารจึงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

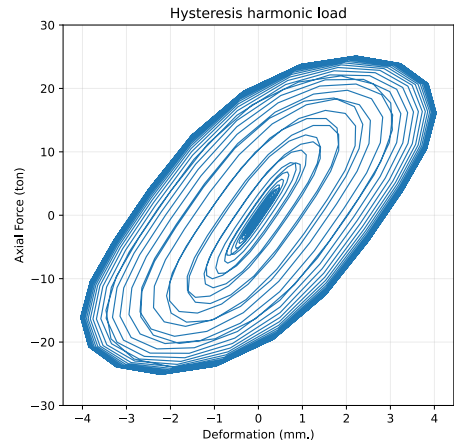
สำหรับอัตราส่วนความหน่วงที่เพิ่มขึ้น (Additional damping ratio) จากอุปกรณ์สลายพลังงานสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาจากสัดส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สลายพลังงานต่อพลังงานภายในระบบของโครงสร้างดังสมการที่ 5 ซึ่งพลังงานภายในระบบของโครงสร้างประกอบไปด้วยพลังงานศักย์ (Potential energy) และพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ภายใต้ 1 รอบของการเคลื่อนที่ที่เสถียรคงตัว (Steady state) ด้วยแรงกระทำแบบฮาร์มอนิก (Harmonic) ที่คาบของแรงกระทำเท่ากับคาบธรรมชาติของอาคารดังรูปที่ 13 และ 14

$$\zeta_{eq} = \frac{I E_D}{4\pi E_S} \quad (5)$$

โดย ζ_{eq} คือ อัตราส่วนความหน่วง, E_D คือ พลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สลายพลังงาน และ E_S คือ พลังงานที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง



รูปที่ 13 การเคลื่อนที่ขึ้นหลังคาภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์มอนิก (Harmonic loading)



รูปที่ 14 การสลายพลังงานของผนังสลายพลังงานภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์มอนิก (Harmonic loading)

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการติดตั้งผนังสลายพลังงานในทุกระดับชั้นก่อน จากนั้นเลือกเฉพาะระดับชั้นที่มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานสูงสุด โดยลดจำนวนผนังสลายพลังงานจนได้อัตราส่วนความหน่วงจากผนังสลายพลังงานเท่ากับ 2.08% ได้ผลลัพธ์คือการใช้ผนังสลายพลังงานจำนวน 28 ตัว ที่ระดับชั้น 17 ถึงชั้น 20 จำนวนชั้นละ 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตำแหน่งของผนังสลายพลังงาน

6.3 ผลตอบสนองแรงลม

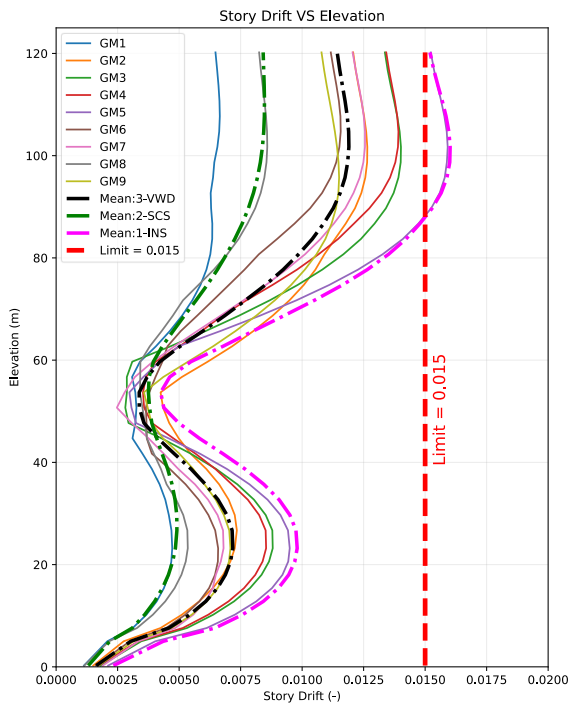
โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD) พบว่ามีการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารเท่ากับ 0.240 เมตร คิดเป็นอัตราส่วน 0.99 ของค่าที่ยอมให้

6.4 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว

โครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD) มีคาบธรรมชาติหลักเท่ากับ 9.20 วินาที ไม่เกิด Plastic rotation สำหรับเสา และเกิด Plastic rotation สูงสุดในกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 2.2×10^{-5} เรเดียน ซึ่งยังอยู่ในระดับสมรรถนะ (Performance level) เข้าใช้งานได้ทันที (Immediate Occupancy Level, IO) มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดเท่ากับ 0.0159 และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.0119 คิดเป็นอัตราส่วน 0.79 ของค่าที่ยอมให้ ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 16

ตารางที่ 7 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวโครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD)

GM	Base Shear (ton)	Story Drift (-)	Roof Displacement (m.)
GM1	3446	0.0067	0.241
GM2	5914	0.0127	0.565
GM3	5763	0.014	0.343
GM4	6319	0.0139	0.345
GM5	7533	0.0159	0.372
GM6	4546	0.0116	0.31
GM7	6955	0.0126	0.422
GM8	4178	0.0086	0.339
GM9	5760	0.0115	0.405
MAX	7533	0.0159	0.565
MEAN	5601	0.0119	0.371



รูปที่ 16 การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นโครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD)

7. สรุปผล

โครงสร้างรับแรงแนวดิ่ง (1-INS) มีต้นทุนของคอนกรีตและเหล็กเสริมของเสาและกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 33.5 ล้านบาท อาคารมีการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคารจากแรงลมเท่ากับ 0.382 เมตร ซึ่งเกินจากค่าที่ยอมให้คือระดับยอดอาคารต่อ 500 เท่ากับ 0.2404 เมตร คิดเป็น Demand capacity ratio เท่ากับ 1.59 ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐาน อาคารอาจเกิดการแตกร้าวเสียหายจากแรงลมในสภาวะใช้งาน

แนวทางของโครงสร้างที่เพิ่มขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (2-SCS) คือการเพิ่มสติฟเนสเพื่อต้านทานแรงด้านข้าง ซึ่งเป็นวิธีที่วิศวกรมักคุ้นเคย เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เมื่อเพิ่มขนาดโครงสร้างเสาและกำแพงรับแรงเฉือนจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานพบว่าต้นทุนของคอนกรีตและเหล็กเสริมของเสาและกำแพงรับแรงเฉือนเท่ากับ 115.9 ล้านบาท ซึ่งคิดเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้นถึง 246% ของส่วนโครงสร้างเสาและกำแพงรับแรงเฉือน

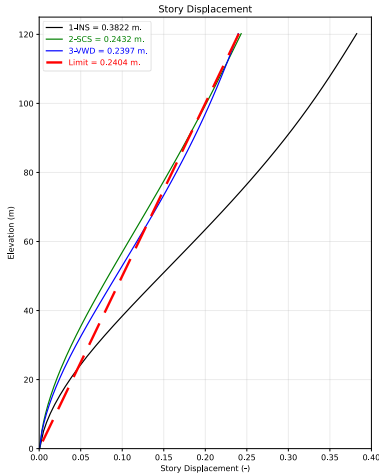
แนวทางของโครงสร้างที่ติดตั้ง Viscous Wall Damper (3-VWD) พบว่าต้องติดตั้งผนังสลายพลังงานทั้งหมด 28 ตัว (ราคาตัวละประมาณ 700,000 บาท) เพื่อให้โครงสร้างมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยติดตั้งชั้นละ 7 ตัว ตั้งแต่ชั้น 17 ถึงชั้น 20 ต้นทุนของคอนกรีตเหล็กเสริมของเสาและกำแพงรับแรงเฉือน รวมกับผนังสลายพลังงานจำนวน 28 ตัว เท่ากับ 77.98 ล้านบาท การสลายพลังงานจะมากในช่วงชั้นที่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นมาก เนื่องจากผนังสลายพลังงานมีการเสียรูปที่สูง ผนังสลายพลังงานสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นการติดตั้งผนังสลายพลังงานควรจะต้องศึกษาพฤติกรรมของอาคารก่อน เพื่อที่จะหาตำแหน่งในการติดตั้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คู่ค้ำกับต้นทุน

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งผนังสลายพลังงานช่วยลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากแรงลมและแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีนัยสำคัญ สามารถเลือกตำแหน่งในการติดตั้งที่เหมาะสมได้ ไม่กระทบกับพื้นที่ใช้สอยและความสวยงามของอาคาร มีความคุ้มค่าในการติดตั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขนาดของโครงสร้างที่กระทบกับพื้นที่ใช้สอยและยังเป็นการเพิ่มภาระน้ำหนักให้กับฐานรากอีกด้วย นอกจากนี้การติดตั้งผนังสลายพลังงานยังสามารถติดตั้งกับอาคารที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ (Retrofit) ที่มีปัญหาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างได้ ซึ่งการเพิ่มขนาดของโครงสร้างเสาและกำแพงรับแรงเฉือนจะทำได้โดยยาก

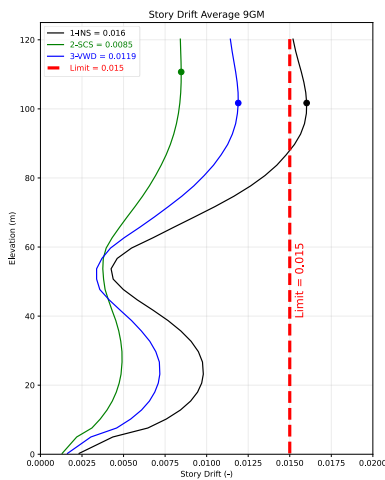
ผลตอบสนองโครงสร้างและต้นทุนเฉพาะคอนกรีตเหล็กเสริมของเสาและกำแพงรับแรงเฉือนของโครงสร้างแต่ละรูปแบบสรุปแสดงดังตารางที่ 8 และรูปที่ 17-18

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบผลลัพธ์โครงสร้างแต่ละรูปแบบ

รายการ	1-INS	2-SS	3-VWD
ปริมาตรคอนกรีต (ลบ.ม.)	6838	17773	6838
น้ำหนักเหล็กเสริม (ลบ.ม.)	10318	0.0103	0.713
ต้นทุนคอนกรีต (ลบ.)	19.7	51.3	19.7
ต้นทุนเหล็กเสริม (ลบ.)	13.8	64.6	38.4
ต้นทุนผนังสลายพลังงาน (ลบ.)	0	0	19.88
ต้นทุนรวม (ลบ.)	33.5	115.9	77.98
การเคลื่อนที่ชั้นหลังจากแรงลม (ม.)	0.382	0.243	0.239
แรงสถิตเทียบเท่ารวมที่ฐานจากแรงลม (กิโลนิวตัน)	14090	14090	12013
แรงเฉือนเฉลี่ยที่ฐานจากแรงแผ่นดินไหว (ตัน)	5923	7293	5601
การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นจากแรงแผ่นดินไหว (-)	0.0160	0.0085	0.0119



รูปที่ 17 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 18 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของโครงสร้างแต่ละรูปแบบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองในโอกาสที่สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ทรงเจริญพระชนมายุ 60 พรรษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alberto Lago, Dario Trabucco and Antony Wood. (2019). *Damping Technologies for Tall Buildings*. Amsterdam: Elsevier.
- [2] Dilsiz, A., et al. (2018). Evaluation of Wall Damper Effectiveness on the Seismic Performance of High-Rise Buildings. *National Conference on Earthquake Engineering*.
- [3] Dynamic Isolation Systems. (2017). *Viscous Wall Damper Modelling Guide*. Nevada: Button Engineering.

- [4] Newell, J., et al. (2011). Seismic design of a 15 story hospital using viscous wall dampers. *Structures Congress 2011*.
- [5] Najam, F. A. (2021). *Nonlinear Modelling and Analysis of RC Buildings using ETABS*. National University of Sciences and Technology (NUST)
- [6] Kamatchi, P., et al. (2019). Performance of frame with Viscoelastic Dampers as an Alternative to Coupled Shear Wall. *NISCAIR-CSIR, India*
- [7] Vijay, U., et al. (2015). Seismic response control of RC structure using viscoelastic dampers. *Indian Journal of science and technology 8(28)*.
- [8] Nasab, M. S. E. and J. Kim (2020). Seismic Retrofit of Structures Using Hybrid Steel Slit-Viscoelastic Dampers. *Journal of Structural Engineering 146(11)*.
- [9] Shen, K., et al. (1995). Seismic behaviour of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers. *Engineering Structures 17(5): 372-380*.
- [10] Yang, P., et al. (2020). Damping Estimation of an Eight-Story Steel Building Equipped with Oil Dampers. *Applied Sciences 10(24)*.
- [11] จิตพิงค์ เจริญสุข (2020). *การพัฒนาผนังสลายพลังงานแบบวิสโคอีลาสติก*. Master Thesis, Chulalongkorn University.
- [12] ณัฐดนัย อมรปฏิเวธ (2011). *การเพิ่มสมรรถนะต้านแผ่นดินไหวของอาคารด้วยผนังสลายพลังงานแบบเสียดทาน*. Master Thesis, Chulalongkorn University.
- [13] นรรฐกานต์ วิบูลย์จันทร์ (2016). *การปรับปรุงสมรรถนะต้านแผ่นดินไหวของอาคารเรียนด้วยผนังสลายพลังงานแบบเสียดทาน*. Master Thesis, Chulalongkorn University.