



การออกแบบอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนสำหรับปัญหาแรงลมต่ออาคารหอสูง

DESIGN OF TUNED MASS DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL OF WIND-INDUCED MOTION OF A TALL TOWER

ณัฐนิชา อัครเดชปิยพงศ์¹, อมรเทพ จิรศักดิ์จามรอนศรี^{2*} และนคร ภูวโรดม³

¹ นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² อาจารย์ ดร., สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³ ศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-Mail: amorntep@tu.ac.th

บทคัดย่อ

การสั่นสะเทือนของอาคารเนื่องจากแรงลมอาจทำให้เกิดปัญหาด้านการใช้งานต่อผู้อยู่อาศัยหากค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนเกินระดับความสะดวกสบายของมนุษย์ ปัญหาดังกล่าวมักเกิดขึ้น โดยเฉพาะกับการออกแบบอาคารสูง การแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนด้วยการเพิ่ม stiffness ด้านข้างของโครงสร้างมักทำให้องค์อาคารมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งแนวทางการลดการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือน เช่น อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล (Tuned Mass Damper, TMD) หรืออุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลหลายชุด (Multiple Tuned Mass Damper, MTMD) มีประสิทธิภาพดีกว่า บทความนี้นำเสนอการออกแบบ MTMD ที่จำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไป สำหรับตัวอย่างอาคารหอสูง ที่มีความสูง 140 เมตร ความถี่พื้นฐานประมาณ 0.26 เฮิรตซ์ มีความหน่วงน้อยมาก และพบว่าเกิดการสั่นสะเทือนสูงเกินระดับการรับรู้ของผู้ใช้อาคารบ่อยครั้ง ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MTMD จากการวิเคราะห์แบบจำลองพลศาสตร์ ภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์มอนิก แล้วทำการศึกษาประสิทธิภาพของ MTMD จากแรงจำลองที่ทำให้เกิดการตอบสนองของอาคารเทียบกับผลการตรวจวัดในระดับรุนแรงที่เกิดกับอาคารจริง รวมถึงศึกษาการออกแบบส่วนประกอบของอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลเพื่อเสนอรูปแบบการใช้งาน

คำสำคัญ: การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงลม; อาคารหอสูง; การควบคุมการสั่นสะเทือน; อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล

ABSTRACT

Wind-induced vibrations of building can lead to serviceability problem for occupants if the acceleration exceeds the level of human comfort. This problem often occurs, especially in the design of tall buildings. To mitigate vibration problems, increasing the lateral stiffness of the structure is commonly employed, often resulting in significantly larger building elements. The alternative approach, which has proven to be more effective, is the implementation of vibration control devices such as Tuned

Natnicha Auckaradetepiyapong¹, Amorntep Jirasakjamroonsri^{2*} and Nakhorn Poovarodom³

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand.

² Lecturer, Department of Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Thailand.

³ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand.

Mass Dampers (TMD) or Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD). This article presents the design of an MTMD system, which can be modelled and analyzed using a general structural analysis software, for a 140-meter-tall tower with a fundamental frequency of approximately 0.26 Hz and very low damping. The tower has occasionally experienced excessive vibrations that exceed the threshold of occupant perception. This study determines the optimal parameters of the MTMD system through a dynamic analysis of the tower under harmonic excitation. The effectiveness of the MTMD system is evaluated from the response of the tower subjected to the force simulated from the response from measurements taken under severe vibration conditions. Additionally, the design of the MTMD components is studied to demonstrate the application.

KEYWORDS: Wind-induced vibration; Tower; Vibration control; Tuned Mass Damper

1. บทนำ

อาคารสูงมักเป็นโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากแรงลมอยู่บ่อยครั้ง เนื่องจากโครงสร้างลักษณะหอคอยที่มีกำลังต้านทานแรงด้านข้างต่ำ ผลกระทบจากแรงลมอาจทำให้เกิดการสั่นไหวที่รุนแรง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง หรือผู้อยู่อาศัยอาจมีความรู้สึกไม่สะดวกสบายในขณะที่ใช้งานอาคารได้ แนวทางการลดระดับการสั่นไหวสามารถดำเนินการได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบให้หน้าตัดขององค์อาคารใหญ่เพียงพอ ซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนของการก่อสร้างสูงขึ้นมาก สำหรับการแก้ปัญหาอีกแนวทางที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันของอาคารสูงที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว คือ การติดตั้งระบบควบคุมการสั่นสะเทือน เช่น อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล หรืออุปกรณ์หน่วงแบบใช้ของเหลว โดยหลักการสำคัญของระบบควบคุมการสั่นสะเทือน คือ การออกแบบอุปกรณ์หน่วงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สามารถสร้างแรงเฉื่อยจากมวลของอุปกรณ์ และเกิดแรงหน่วงขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ทำให้เกิดการสลายพลังงานจลน์ ส่งผลให้ระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างและระยะเวลาการสั่นสะเทือนลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวในประเทศไทยยังไม่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากขาดตัวอย่างการใช้งานจริง อีกทั้งการคำนวณออกแบบต้องใช้หลักพลศาสตร์โครงสร้างที่มีความซับซ้อน ซึ่งต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบและติดตั้ง การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ TMD สำหรับอาคารสูงภายใต้แรงลม โดยการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไป เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับอาคารอื่นได้อย่างเหมาะสม และแสดงตัวอย่างส่วนประกอบของ TMD เพื่อเสนอรูปแบบการใช้งาน โดยตัวอย่างที่ใช้ศึกษาเป็นอาคารสูงมีลักษณะเป็นหอคอยสูง 140 เมตร อาคารนี้มีการโยกตัวที่รุนแรงอยู่บ่อยครั้งทำให้ผู้อยู่อาศัยรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งการศึกษานี้ นำค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารจากการตรวจวัดจริงมาใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างให้มีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดจริง นอกจากนี้ ได้นำค่าผลตอบแทนจากเครื่องมือตรวจวัดที่ติดตั้งไว้ชั้นบนของอาคารจริงในช่วงที่อาคารมีการโยกตัวในระดับที่รุนแรงมาคำนวณเป็นแรงที่กระทำอาคารเพื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนของแบบจำลองที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำดังกล่าว และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการลดระดับการสั่นสะเทือนของ TMD การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) แสดงการสร้างแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของการใช้งาน โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง (2) การออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ TMD ที่มีจำนวนแตกต่างกัน ภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์มอนิกและแรงที่สร้างจากผลตอบแทนจากการตรวจวัดจริง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ TMD รูปแบบต่าง ๆ และ (3) การออกแบบ TMD ด้วยระบบ Multi-Stage Steel Laminated Rubber Bearing รวมถึงเสนอแนะรูปแบบที่เหมาะสมต่อการนำไปติดตั้งบนอาคารตัวอย่าง

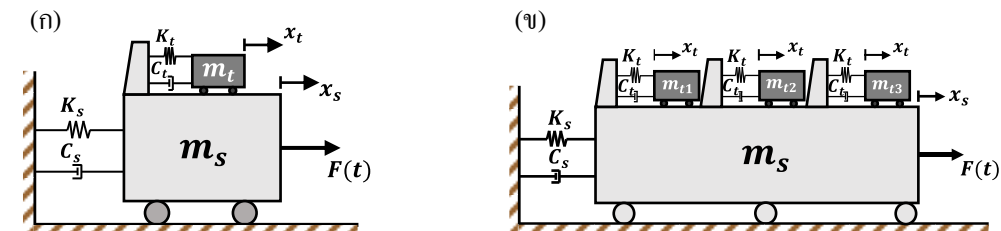
2. อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล (Tuned Mass Damper, TMD)

2.1 อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลชุดเดียว (Single Tuned Mass Damper, STMD)

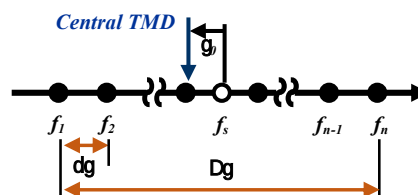
อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้างเพื่อสลายพลังงานการสั่นสะเทือน มีองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ มวล (m_t) ตัวหน่วง (c_t) และสปริง (k_t) ดังรูปที่ 1 (ก) ซึ่งโดยทั่วไปมวลของ TMD ที่ใช้จะมีค่าประมาณ 0.5%-5.0% ของมวลที่ใช้วิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างหลัก และติดตั้งไว้ส่วนบนของโครงสร้างเพื่อให้ TMD ทำหน้าที่ลดการสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

2.2 อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลหลายชุด (Multiple Tuned Mass Damper, MTMD)

อุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลแบบหลายชุดประกอบด้วยมวลหน่วงมากกว่า 1 ชุด ซึ่งมีคุณลักษณะเชิงพลศาสตร์แตกต่างกัน โดยเฉพาะค่าความถี่ธรรมชาติของ MTMD ที่ถูกกระจายให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง [2] โดยอาจกำหนดระยะห่างความถี่ของ TMD แต่ละชุดให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองของระบบได้ดังรูปที่ 1 (ข) และแบบจำลองตัวอย่างการกระจายความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลแบบหลายชุดแสดงดังรูปที่ 2 โดยที่ f_s คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง, η คือค่าความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างกับความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์หน่วงกลางของระบบ, $\Delta\eta$ คือความกว้างของช่วงความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลแบบหลายชุด, $\delta\eta$ คือ ค่าความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์หน่วงแต่ละชุด



รูปที่ 1 แบบจำลองกลไกการทำงานของระบบอุปกรณ์หน่วง (ก) ใช้มวลชุดเดียว (ข) ใช้มวลหลายชุด



รูปที่ 2 แบบจำลองการกระจายความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลแบบหลายชุด

2.3 ขั้นตอนในการออกแบบอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล

1) ออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimum Parameters) ของ TMD ซึ่งสามารถออกแบบได้โดยการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์หรือหาได้จากค่าที่แสดงในตารางที่ 1 สำหรับ TMD ชุดเดียว

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำหนดไว้ในตารางของแต่ละกรณี ในงานวิจัยนี้ใช้แรงแบบฮาร์โมนิก มีเป้าหมายคือทำให้ตัวคูณขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Magnification Factor, DMF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนการกระจัดของโครงสร้างที่มี

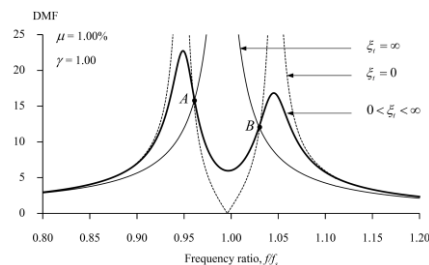
แรงกระทำแบบพลศาสตร์ต่อโครงสร้างที่มีแรงกระทำแบบสถิต (u/u_{static}) มีค่าต่ำที่สุด และความสัมพันธ์ของ DMF กับ อัตราส่วนความถี่ของแรงต่อความถี่ของโครงสร้าง (f/f_s) มีจุดยอดเท่ากัน ดังรูปที่ 3 สามารถสรุปความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- 1.1) เมื่อ $\xi_t = 0$ ค่า DMF แสดงค่าสูงสุดเป็นอันดับ 2 จุด เนื่องจากไม่สามารถสลายพลังงานของโครงสร้างได้
- 1.2) เมื่อ $\xi_t = \infty$ ค่า DMF แสดงค่าสูงสุดเป็นอันดับเมื่อเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) เนื่องจาก TMD ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบสัมพันธ์กับโครงสร้าง จึงไม่สามารถสลายพลังงานของโครงสร้างได้
- 1.3) เมื่อ $0 < \xi_t < \infty$ ค่า DMF แสดงค่าสูงสุดน้อยกว่าอันดับ เนื่องจากโครงสร้างสามารถสลายพลังงานได้ โดยสามารถหาค่าความหน่วงที่เหมาะสมที่สุดจากค่าสูงสุดของค่า DMF ที่มีค่าต่ำที่สุด และมีจุดยอดเท่ากัน
- 2) สร้างเมทริกซ์คุณสมบัติของระบบ ประกอบด้วยเมทริกซ์ของมวล สติฟเนส และสัมประสิทธิ์ความหน่วง
- 3) สร้างแบบจำลองของแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้าง สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง
- 4) วิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขทีละขั้น (Numerical step-by-step integration) เพื่อวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่ (Displacement) และความเร่ง (Acceleration) ของโครงสร้างและ TMD
- 5) ศึกษาประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างแบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้ง TMD และมีการติดตั้ง TMD

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล [3]

Excitation	Free Vibration	Harmonic force	Random force	Random acceleration
Objective	Max Modal damping ratio	Equal and min fixed points of DMF	Max mean square of structural response	Max mean square of structural response
γ_{opt}	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$
$\xi_{t,opt}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{(1+\mu)(1+\mu/2)}}$	$\sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}}$
ξ_{eq}	$\frac{\sqrt{\mu}}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{2+\mu}}$	$\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+3\mu/4}}$	$\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\mu}{(1+\mu)^3(1-\mu/4)}}$

โดยที่ μ คือ อัตราส่วนผลรวมมวลของอุปกรณ์หน่วงต่อมวลของโครงสร้าง, γ คือ อัตราส่วนความถี่ธรรมชาติของ TMD ต่อความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง และ ξ_t คือ ค่าความหน่วงของ TMD



รูปที่ 3 ผลตอบสนองของโครงสร้างที่มีการติดตั้งอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล

3. อาคารตัวอย่างสำหรับการศึกษา

อาคารตัวอย่างที่ศึกษาเป็นอาคารสูง 140 เมตร มีความชะลูด หน้าตัดของอาคารเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 14.4 เมตร โครงสร้างรับแรงด้านข้างและแรงแนวตั้งเป็นวงแหวนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 8.3 เมตร ความหนา 0.7 เมตร และความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของโครงสร้างจากการตรวจวัด (f_s) เท่ากับ 0.26 เฮิรตซ์ และความหน่วงต่ำ

4. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาผลตอบแทนเชิงพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงกระทำจากภายนอกเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ TMD โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างกับวิธีเชิงตัวเลขที่ละชั้นตามหลักพลศาสตร์โครงสร้างของแบบจำลองโครงสร้างที่ไม่มี TMD และมีการติดตั้ง TMD

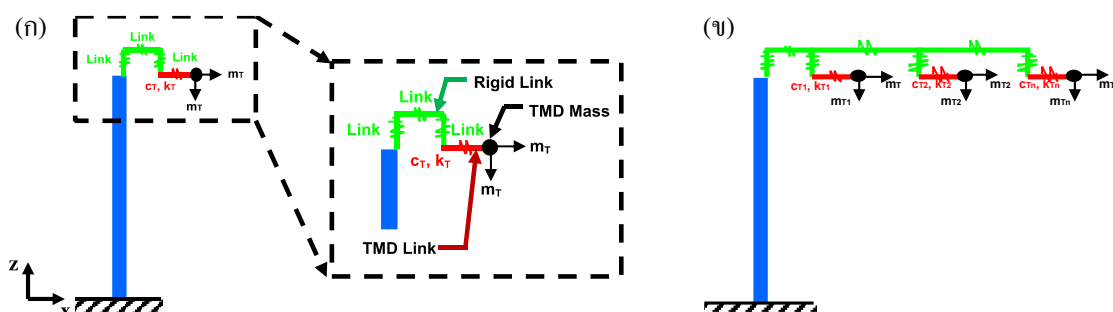
(2) สร้างแรงภายนอกที่กระทำต่อแบบจำลองอาคารตัวอย่าง โดยการศึกษาได้ นำข้อมูลความเร่งของยอดอาคารที่ถูกบันทึกไว้เนื่องจากแรงลมสูง มาทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (1)$$

โดยที่ $\ddot{u}$, $\dot{u}$, u คือ ความเร่ง, ความเร็ว และ การเคลื่อนที่, m คือ มวล, c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง, k คือ สติฟเนสของโครงสร้างที่ประเมินจากข้อมูลการตรวจวัดและแบบโครงสร้าง P คือ แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

(3) คำนวณพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ TMD สำหรับอาคาร ซึ่งในการศึกษานี้พิจารณาจำนวนของ TMD เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 ชุด และใช้ค่าอัตราส่วนมวล (μ) เท่ากับ 0.01 ของมวลโครงสร้าง โดยตำแหน่งที่ติดตั้ง TMD คือชั้นบนสุด

(4) สร้างแบบจำลอง TMD ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างโดยการเพิ่ม Rigid Link ที่ชั้นบนสุดของอาคารเพื่อเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบบจำลองอาคารกับ TMD โดยกำหนดให้คุณสมบัติด้านการเคลื่อนที่ในแนวราบและแนวตั้งเป็นแบบยึดแน่น (Fixed) จากนั้นเชื่อมต่อไปยัง TMD Link ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบ TMD โดยกำหนดคุณสมบัติของค่า k_d และ c_d ในแนวราบเท่านั้นเพื่อเชื่อมต่อไปยัง Additional Mass ซึ่งมีค่าเท่ากับมวลของ TMD ที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 4



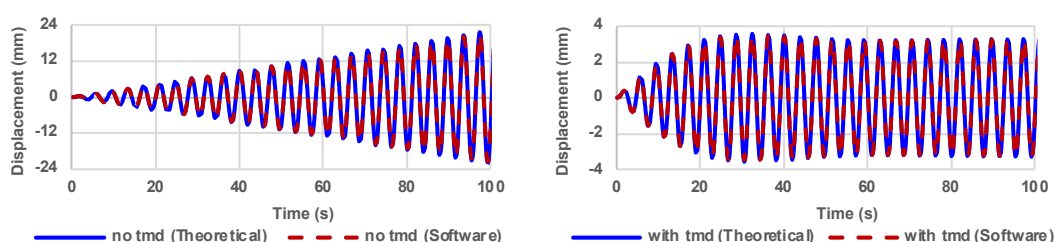
(ก) โครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล (ข) โครงสร้างที่มีการติดตั้งอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล

รูปที่ 4 แบบจำลองอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง (ก) TMD 1 ชุด และ (ข) TMD n ชุด

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

การเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของโครงสร้างระหว่างวิธีเชิงตัวเลขที่ละขั้นกับโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารตัวอย่าง กำหนดให้แบบจำลองไม่มีความหน่วง และใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 27×10^9 นิวตันต่อตารางเมตร กำหนดแรงกระทำพลศาสตร์แบบฮาร์โมนิกที่ยอดของแบบจำลอง ซึ่งความถี่ของแรงตรงกับความถี่ของโครงสร้าง พบว่าผลตอบสนองของแบบจำลองที่วิเคราะห์ได้ระหว่างสองวิธีสำหรับกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้ง TMD มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของโครงสร้างระหว่างวิธีเชิงตัวเลขที่ละขั้นและโปรแกรมคอมพิวเตอร์

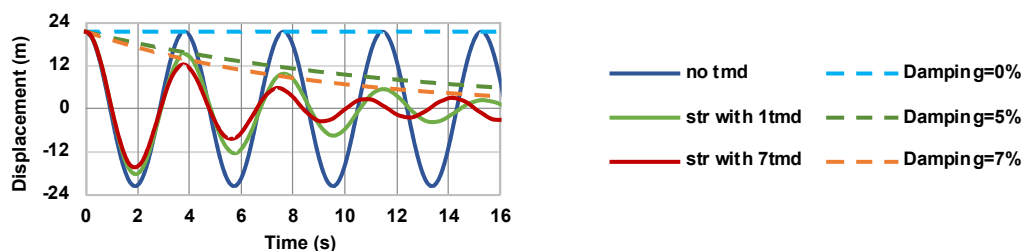
5.2 ผลการออกแบบอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลและประสิทธิภาพของการติดตั้งบนแบบจำลองอาคาร

จากการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MTMD ด้วยการหาค่าที่ทำให้ DMF ต่ำที่สุด ภายใต้แรงฮาร์โมนิก โดยกำหนดช่วงของอัตราส่วนความหน่วงของ TMD และความกว้างของความถี่ธรรมชาติของ MTMD ตั้งแต่ 0.010 – 0.100 จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและหาค่าคุณสมบัติของระบบ TMD ที่มีจำนวน TMD แตกต่างกันได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.01 และคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวล

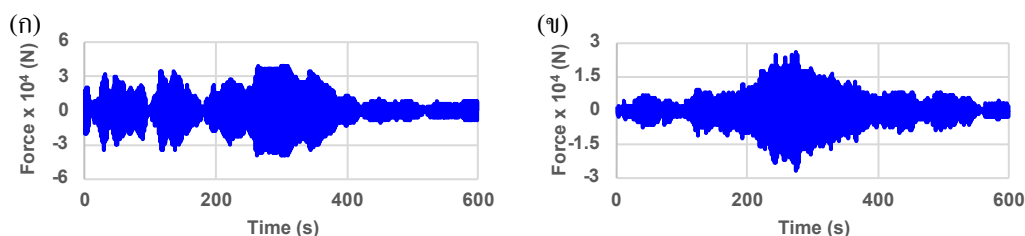
No. TMD	Optimum Parameters			TMD Properties			
	$\Delta\gamma$	ξ_t	Max DMF	TMD Mass (kg)	Damping Coeff. (N-s/m)	K_t (N/m)	f (Hz)
1	-	0.065	14.92	13,600	2,700	36,100	0.259
3	0.025	0.026	12.87	4,000 – 5,000	350 – 410	12,200	0.249 – 0.274
5	0.030	0.025	11.81	2,400 – 3,000	210 – 240	7,300	0.247 – 0.277
7	0.035	0.015	11.77	1,700 – 2,200	90 – 105	5,200	0.244 – 0.279

จากคุณสมบัติของ TMD ในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองแบบจำลองที่มีจำนวน TMD แตกต่างกัน พบว่าเมื่อโครงสร้างเกิดการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) แบบจำลองเกิดความหน่วงในระบบเพิ่มขึ้นประมาณ 5% และ 7% สำหรับ TMD 1 และ 7 ชุด ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความหน่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนของ TMD ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการลดระดับการสั่นสะเทือนและระยะเวลาการสั่นสะเทือนลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 6

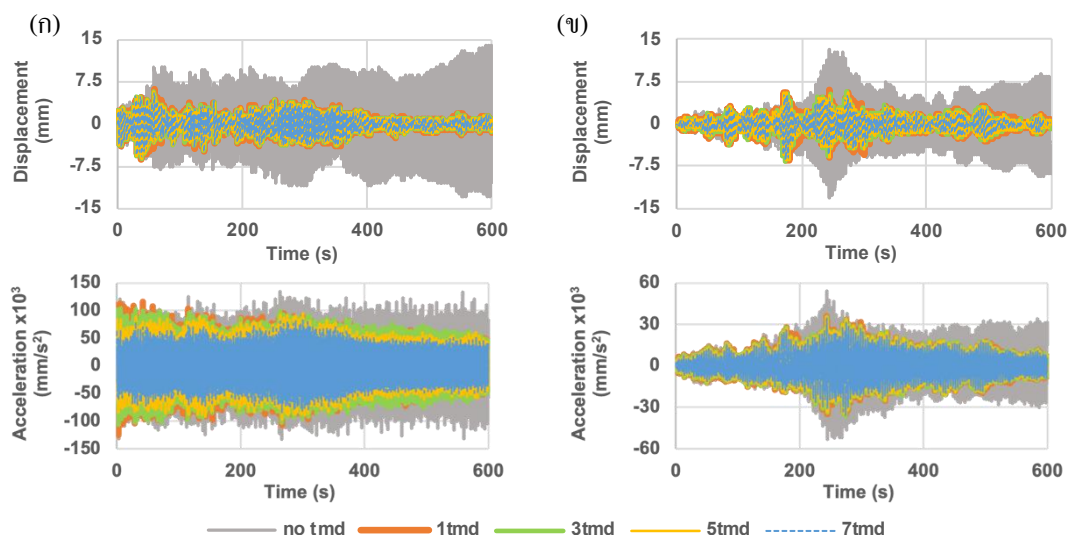


รูปที่ 6 ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อเกิดการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration)

นอกจากนี้ งานวิจัยได้จำลองแรงที่คำนวณจากค่าความเร่งที่บันทึกได้จริงบนอาคารในช่วงที่อาคารเกิดการสั่นสะเทือนรุนแรงจำนวน 2 ชุด ซึ่งมีระยะเวลาการสั่นสะเทือน 600 วินาที ดังรูปที่ 7 เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มี TMD จำนวนแตกต่างกันภายใต้แรงกระทำที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 7 แรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้าง (ก) แรงชุดที่ 1 และ (ข) แรงชุดที่ 2

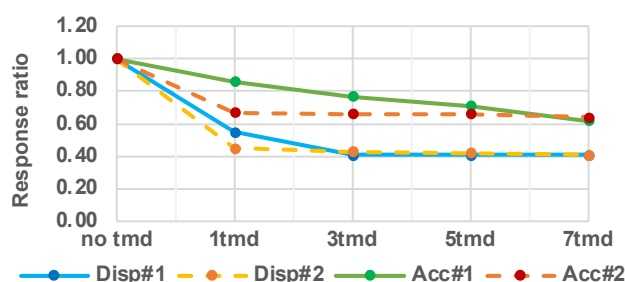


รูปที่ 8 ผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ (ก) แรงชุดที่ 1 และ (ข) แรงชุดที่ 2

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของแบบจำลองที่มี TMD จำนวน 1, 3, 5 และ 7 ชุด เทียบกับอาคารที่ไม่มีการติดตั้ง TMD โดยใช้แรงชุดที่ 1 กระทำที่ยอดของอาคาร พบว่าแบบจำลองที่มีการติดตั้ง TMD จำนวนมากขึ้น มีแนวโน้มของอัตราส่วนการเคลื่อนที่ด้านข้างลดลงตามลำดับ โดยสามารถลดลงประมาณ 55% และอัตราส่วนความเร่งมีค่าลดลงประมาณ 14%, 23%, 29% และ 38%

สำหรับแบบจำลองที่ติดตั้ง TMD จำนวน 1, 3, 5 และ 7 ชุด ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 (ก) และเมื่อใช้แรงชุดที่ 2 พบว่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่ด้านข้างของแบบจำลองที่มีการติดตั้ง TMD ลดลงประมาณ 55%-59% และอัตราส่วนความเร่งลดลงประมาณ 34% ดังรูปที่ 8 (ข)

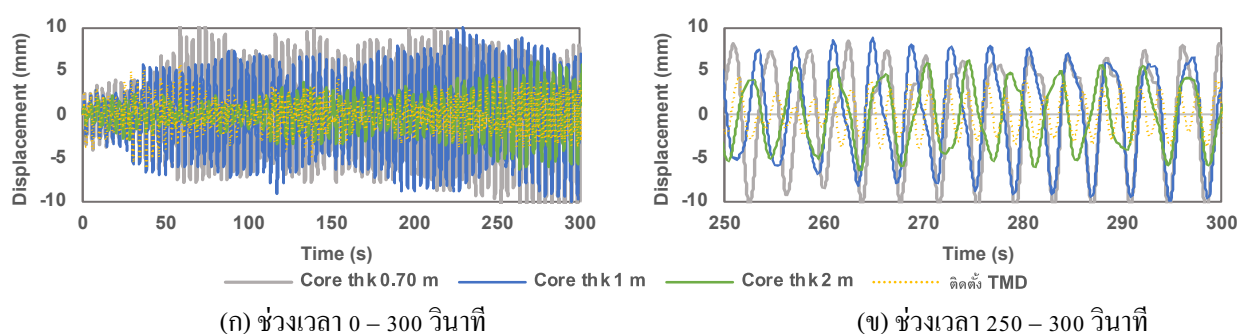
จากผลการตอบสนองของโครงสร้างเมื่อมีแรงกระทำที่ยอดอาคารทั้ง 2 ชุด สามารถแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนผลตอบสนองที่ลดลงของโครงสร้างที่มีการติดตั้ง TMD 1, 3, 5 และ 7 ชุด ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอัตราส่วนผลการตอบสนองที่ลดลงของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำชุดที่ 1 และ 2

5.3 ผลการเปรียบเทียบการลดระดับการสั่นสะเทือนด้วยการเพิ่มสติฟเนสด้านข้างของโครงสร้าง

การศึกษาส่วนนี้ทำการเปรียบเทียบผลการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของแบบจำลองอาคารด้วยการเสริมกำลัง ซึ่งทำการเพิ่มสติฟเนสด้านข้างขององค์อาคาร โดยเพิ่มความหนาจากเดิม 0.7 เมตร เป็น 1 และ 2 เมตร กับแบบจำลองที่ติดตั้ง TMD พบว่าแบบจำลองที่มีความหนา 1 เมตร สามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มความหนาเป็น 2 เมตร จะมีค่าระดับการสั่นสะเทือนใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ติดตั้ง TMD ดังรูปที่ 10 อย่างไรก็ตาม แนวทางการเพิ่มสติฟเนสด้านข้างขององค์อาคาร ส่งผลให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก ซึ่งในทางปฏิบัติอาจดำเนินการได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การแก้ปัญหาด้วย TMD

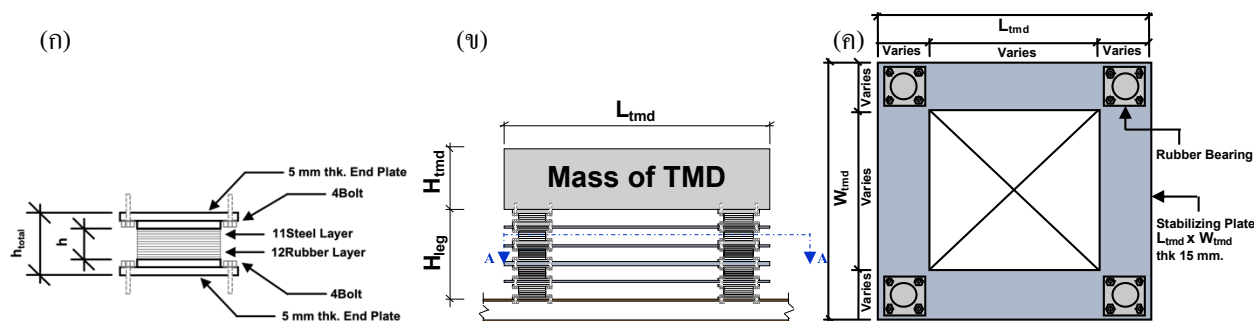


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของโครงสร้างระหว่างแบบจำลองที่ติดตั้ง TMD และแบบจำลองที่เพิ่มสติฟเนสด้านข้าง

5.4 การออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์หน่วงแบบใช้มวลสำหรับอาคารตัวอย่าง

การศึกษานี้ได้เลือกใช้การออกแบบ TMD ระบบ Multi-Stage Steel Laminated Rubber Bearing [4] ซึ่งเป็นระบบที่สามารถติดตั้งได้ง่าย ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ฐาน ทำหน้าที่เป็นสติฟเนสของระบบ โดยนำ Rubber Bearing มาเรียงต่อกันเป็นชั้นและเสริม

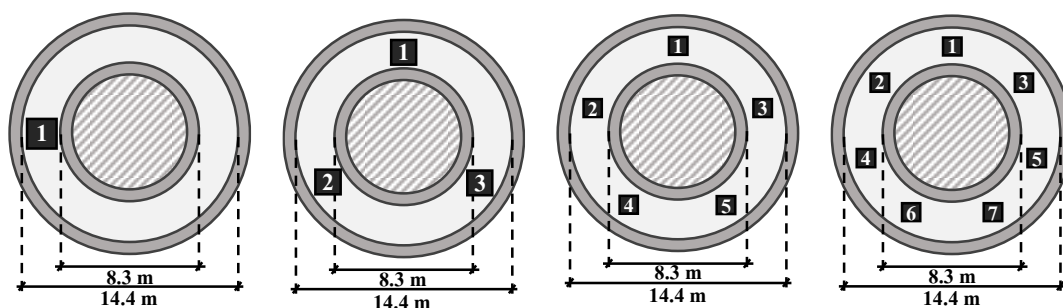
ด้วย Stabilizing Plate เพื่อควบคุมการเสยรูปในแนวราบให้เกิดขึ้นจากการเฉือน อีกทั้งช่วยลดการเกิดการ Buckling จากการหมุนได้ และส่วนของมวลเหล็ก ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ด้วยน้ำหนักของมวลที่วางไว้บนฐาน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 องค์ประกอบของ TMD (ก) ส่วนฐาน (Stage) (ข) ภาพด้านข้างระบบ TMD และ (ค) ภาพตัด A-A [4]

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบระบบ TMD ด้วยระบบ Multi-Stage Steel Laminated Rubber Bearing

No. TMD	Base Height H_{leg} (m)	No. Stage	Shear Modulus (MPa)	Dia (mm)	Rubber Thk. (mm)	Steel Thk. (mm)	Size of TMD (m × m × m) $L_{tmd} \times W_{tmd} \times H_{tmd}$	Mass of TMD (kg)	Stiffness of TMD (N/m)	Damping Ratio	Frequency of TMD (Hz)
1	0.70	14	0.4	100	2	1	$2.0 \times 2.0 \times 0.43$	13,628	37,084	0.061	0.263
3	2.15	43	0.4	100	2	1	$1.5 \times 1.5 \times 0.23-0.28$	4,100-5,000	12,200	0.026	0.249-0.274
5	1.33	35	0.4	50	1	1	$1.0 \times 1.0 \times 0.31-0.39$	2,400-3,000	7,400	0.025	0.248-0.279
7	1.90	50	0.4	50	1	1	$1.0 \times 1.0 \times 0.22-0.28$	1,700-2,200	5,200	0.015	0.244-0.279



รูปที่ 12 ตำแหน่งการติดตั้งของอุปกรณ์หน่วงที่มีจำนวน TMD เท่ากับ (ก) 1 ชุด, (ข) 3 ชุด, (ค) 5 ชุด และ (ง) 7 ชุด

การติดตั้ง TMD และวางตำแหน่งให้มีความสมมาตร เพื่อเป็นการกระจายน้ำหนักของมวล TMD ให้สม่ำเสมอและไม่ส่งผลกระทบของโครงสร้างเดิมมากเกินไป อาคารตัวอย่างสามารถติดตั้ง TMD ได้บริเวณรอบนอก Lift Core ซึ่งมีพื้นที่เพียงพอ ดังรูปที่ 12 และจากการออกแบบ พบว่าการติดตั้ง TMD 1 ชุด ทำให้โครงสร้างรับน้ำหนักมากเกินไปบริเวณเดียว ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างได้ ในขณะที่การติดตั้ง TMD จำนวน 3 5 และ 7 ชุด สามารถกระจายน้ำหนักไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างได้อย่าง

สมมาตร และการใช้ TMD 7 ชุด เหมาะสมที่จะติดตั้งจริงมากกว่า เนื่องจากน้ำหนัก TMD แต่ละชุดที่มีค่าน้อยส่งผลให้การผลิตและการติดตั้งสะดวกกว่า

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของอาคารสูงและแนวทางการออกแบบ MTMD ด้วยระบบ Multi-Stage Steel Laminated Rubber Bearing เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้งาน TMD มากขึ้น ด้วยการลดปัญหาของการวิเคราะห์และออกแบบกลไกของ TMD ที่ซับซ้อน โดยจากตัวอย่างที่เป็นอาคารที่มีระบบโครงสร้างอย่างง่ายซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองที่วิเคราะห์ตามหลักพลศาสตร์โครงสร้างได้ และเสนอการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไป ซึ่งสามารถนำไปใช้ออกแบบ TMD ให้กับแบบจำลองโครงสร้างที่มีคุณสมบัติที่ซับซ้อนได้ต่อไป

ผลการศึกษาอาคารตัวอย่างสูง 140 เมตร ภายใต้แรงฮาร์โมนิกและจากการตรวจวัดจริงบนอาคารเพื่อนำมาออกแบบระบบ MTMD ที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองอาคารตัวอย่างที่มีการติดตั้ง TMD ที่มีอัตราส่วนมวล 1% สามารถลดระดับการเคลื่อนตัวทางข้างได้ถึง 60% และลดระดับความเร่งที่ยอดอาคารได้ถึง 35% การเพิ่มจำนวน TMD ในระบบ MTMD ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ จำนวน TMD ที่มากขึ้นจะทำให้ขนาดและน้ำหนักของ TMD แต่ละชุดจะมีค่าลดลง ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการผลิตและติดตั้ง

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Den Hartog, J. P. *Mechanical Vibrations*, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1956.
- [2] Yamaguchi, H. and Harnpornchai, N. Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22, pp. 51-62.
- [3] Warburton, G.B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1982, 10, pp.381-401.
- [4] Chansukho, P. *Development of a Tuned Mass Damper using multi-stage steel laminated rubber bearings*. Master thesis, Asian Institute of Technology, School of Engineering and Technology, Thailand, 2018.
- [5] Corner, J. *Introduction to Structural Motion Control*. Prentice Hall, Incorporated, 2003, pp.261-338.
- [6] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. *การประชุมเผยแพร่ความรู้ โครงการศึกษาและพัฒนาแนวทางการออกแบบและคำนวณ โครงสร้างของอาคารที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration Control) เพื่อสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหวและแรงลม*. โรงแรมเอเชีย (ราชเทวี), กรุงเทพฯ, 3 กันยายน 2563.