

การประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน Application of Tuned Mass Damper for Bridge Vibration Suppression

ธนกฤต สุปิยะพันธ์¹ พีรตนย์ ลอออรรดพงษ์² และ ทศพล ปิ่นแก้ว³

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

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพานภายใต้ขอบเขตของการปล่อยให้สะพานสั่นอย่างอิสระ โดยไม่มีแรงภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้งานมวลหน่วงปรับค่าทั้งก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพานที่มีอยู่จริงในกรุงเทพมหานคร ในที่นี้คือ สะพานข้ามแยกบางกะปิ (ลาดพร้าว-เสรีไทย) ซึ่งเป็นสะพานที่อยู่ในช่วงระหว่างทำการก่อสร้างควบคู่ไปกับการก่อสร้างทางวิ่งของรถไฟฟ้าสายสีเหลือง เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นของสะพานในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดจนอธิบายถึงทฤษฎีและหลักการของการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ออกแบบมวลหน่วงปรับค่า รวมถึงขั้นตอนในการตรวจสอบต่าง ๆ ให้คนทั่วไปสามารถเข้าถึงและศึกษาทำความเข้าใจได้ง่าย ผลการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองของสะพานตัวอย่าง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าที่ออกแบบให้มีอัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.022 และมีอัตราส่วนมวลในแบบจำลองเท่ากับ 0.018 ซึ่งสามารถลดการสั่นไหวของสะพานได้จริงอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็นประสิทธิภาพของการลดเวลาในการสั่นไหวเท่ากับ 40% ในกรณีของการสั่นอิสระในแนวตั้ง และประสิทธิภาพของการลดการกระจัดเท่ากับ 85% ในกรณีของการสั่นพ้องในแนวตั้ง

คำสำคัญ: มวลหน่วงปรับค่า, ระบบควบคุมแบบเชิงรับ, การออกแบบมวลหน่วงปรับค่า, การลดการสั่นไหวของโครงสร้าง

Abstract

This project studies applying a tuned mass damper to reduce the vibration of the bridge under the scope of allowing the bridge to vibrate freely without external forces involved. This project aims to study the efficiency of using the tuned mass damper before and after installing the tuned mass damper. This project analyzes a model of a bridge that exists in Bangkok. The

bridge is over the Bang Kapi intersection (Lat Phrao - Seri Thai) and is under construction along with the construction of the runway of the MRT Yellow Line. This project analyzes the vibrational behavior of the bridge in various forms and explains the theory and principles of applying various parameters to design the tuned mass damper, including auditing procedures for the general public to access and understand easily. The study's results with the model of the example bridge show the efficiency of the tuned mass damper designed with a mass ratio of 0.022 and a mass ratio in the model of 0.018, which can significantly reduce the actual vibration of the bridge. The flicker is 40% in the case of free vertical oscillation, and the efficiency of displacement reduction is 85% in the case of vertical resonance.

Keywords: Tuned Mass Damper, Vibration, TMD, Vibration Control System

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

กรุงเทพมหานคร มีแผนการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีเหลืองจากเส้นทางลาดพร้าวไปสำโรง พบปัญหาบริเวณหน้าห้างสรรพสินค้าเดอะมอลล์บางกะปิ เสาดม่อของรถไฟฟ้าสายสีเหลืองมีการก่อสร้างทับซ้อนกับสะพานยกระดับลาดพร้าว ทำให้ต้องรื้อสะพานเดิมออกและแยกช่องทางการเดินรถออกเป็นสองฝั่งเพื่อให้สามารถวางเสาดม่อไว้ตรงกลางระหว่างช่องทางการเดินรถได้และในเมื่อต้องรื้อสะพานอยู่แล้ว กรุงเทพมหานครจึงให้ยกระดับความสูงของสะพานขึ้นไปเพื่อที่จะสามารถก่อสร้างทางเดินได้ สถานีรถไฟฟ้า หรือสกายวอล์ค (skywalk) ของเส้นทางเดินรถไฟฟ้าสายสีเหลือง ซึ่งตัดผ่านด้านใต้ของสะพานยกระดับ เพื่อช่วยให้ผู้คนสามารถเข้ามาใช้งานรถไฟฟ้าได้อย่างสะดวก นอกจากนั้นยังมีแผนจะจัดสกายวอล์คบริเวณสามแยกบางกะปิเป็นลานกิจกรรม ทำให้ต้องตัดเสาดม่อใต้สะพาน

ยกระดับออกมีผลให้ช่วงความยาวของสะพานมีความยาวมากขึ้นจากเดิม ส่งผลให้เกิดความกังวลเรื่องของการสั่นไหวของตัวสะพาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน และนำผลของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้มาทำการปรับค่าความถี่ของตัวมวลหน่วงปรับค่าที่จะทำการติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางช่วงด้านใต้ของสะพานข้ามแยกบางกอกปีให้เหมาะสม เพื่อลดการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของสะพาน

2. เนื้อความหลัก

2.1 ระบบควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง

ระบบควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง (Structural Control System) จึงเป็นระบบที่เพิ่มความหน่วงเข้าไปในระบบโครงสร้างหลักเพื่อใช้ในการควบคุมและลดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างหลักที่เกิดจากแรงพลวัต เช่น แรงแลม แรงแผ่นดินไหว และแรงที่เกิดจากปริมาณการจราจร เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ระบบหลัก ๆ ตามกลไกการทำงานของระบบคือ ระบบควบคุมเชิงรุก (Active Control System) ระบบควบคุมแบบกึ่งเชิงรุก (Semi-Active Control System) ระบบควบคุมเชิงรับ (Passive Control System) และระบบควบคุมแบบผสม (Hybrid)

2.2 ระบบควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบเชิงรับ (Passive Control System)

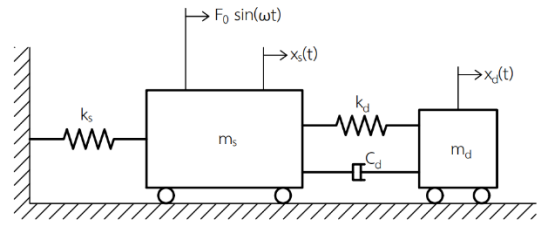
ระบบควบคุมแบบเชิงรับ เป็นระบบที่ใช้พลังงานจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลัก และทำการสลายพลังงานของโครงสร้างหลักที่ได้จากแรงพลวัต แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ อุปกรณ์แยกคลื่นไหวสะเทือน (Seismic Isolation System) และอุปกรณ์สลายพลังงาน (Energy Dissipation Device) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่เรื่องของอุปกรณ์สลายพลังงานเป็นหลัก เช่น ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงพลวัต โดยอาศัยหลักการของการถ่ายเทพลังงานจากโครงสร้างหลักไปยังอุปกรณ์สลายพลังงานที่ติดตั้งไว้กับโครงสร้างหลักและสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ มวลหน่วงปรับค่า หรือ tuned mass dampers (TMDs), tuned liquid dampers (TLDs), และ tuned liquid column dampers (TCLDs) โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพานเป็นหลัก

2.3 มวลหน่วงปรับค่า (Tuned Mass Damper)

มวลหน่วงปรับค่า หรือ TMD คือระบบหรืออุปกรณ์ควบคุมการสั่นชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วย มวล (m_d) สปริง (k_d) และตัวหน่วง (c_d) โดยเมื่อโครงสร้างเกิดการสั่นไหว จะกระตุ้นให้มวลหน่วงปรับค่าเกิดการสั่นตามการสั่นของโครงสร้าง โดยที่พลังงานจลน์ของโครงสร้างจะถูกถ่ายเทให้กับมวลหน่วงปรับค่า และถูกดูดซับด้วยตัวหน่วง (Viscous damper) ที่ติดตั้งภายในระบบของมวลหน่วงปรับค่า

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 พฤติกรรมการตอบสนองของระบบโครงสร้างที่ไม่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วงและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีระดับขั้นความถี่เท่ากับสอง

ระบบโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วงและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกที่กระทำต่อโครงสร้างสามารถเขียนในรูปแบบจำลองการรวมมวล (Lump mass model) ที่มีระดับขั้นเสรีเท่าสอง (2 DOF) ดังรูปที่ 1 และสามารถนำเขียนเป็นสมการของการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$m_s \ddot{x}_s(t) + c_d [\dot{x}_s(t) - \dot{x}_d(t)] + k_d [x_s(t) - x_d(t)] + k_s x_s(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$m_d \ddot{x}_d(t) + c_d [\dot{x}_d(t) - \dot{x}_s(t)] + k_d [x_d(t) - x_s(t)] = 0 \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้

m_s คือ มวลของโครงสร้างหลัก (Main structure mass)

m_d คือ มวลของมวลหน่วงปรับค่า (TMD mass)

c_s คือ ความหน่วงของโครงสร้างหลัก (Main structure damping)

c_d คือ ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า (TMD damping)

k_s คือ สติฟเนสของโครงสร้างหลัก (Main structure stiffness)

k_d คือ สติฟเนสของมวลหน่วงปรับค่า (TMD stiffness)

$\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}$ คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหลัก

(Natural frequency of main system)

$\omega_d = \sqrt{k_d/m_d}$ คือ ความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วงปรับค่า

(Natural frequency of TMD)

$i = \sqrt{-1}$ คือ จำนวนเชิงซ้อน (Complex number)

$\zeta_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s}$ คือ อัตราส่วนการหน่วงของโครงสร้างหลัก

(Damping ratio of main system)

$\zeta_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d}$ คือ อัตราส่วนการหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า

(Damping ratio of TMD)

$\mu = \frac{m_d}{m_s}$ คือ อัตราส่วนของมวลหน่วงปรับค่าและมวลของ

โครงสร้างหลัก (Mass ratio)

$\alpha = \frac{\omega_d}{\omega_s}$ คือ อัตราส่วนปรับค่าความถี่

(Frequency or tuning ratio)

$\beta = \frac{\omega}{\omega_s}$ คือ อัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้น

(Forcing frequency ratio)

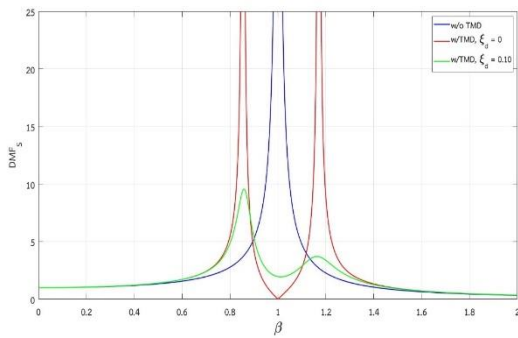
$X_{st} = \frac{F_0}{k_s}$ คือ การกระจัดเชิงสถิตของโครงสร้าง

(Static displacement of structure)

นำสมการ (1) และ (2) มาจัดรูปและแก้สมการทางคณิตศาสตร์ จะได้ผลตอบสนองของการขจัดสูงสุดที่เป็นอัตราส่วนแบบไร้หน่วย (Normalized response) หรือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamic magnification factor: DMF) ซึ่งค่านี้จะแสดงถึงจำนวนเท่าของการขจัดเชิงพลศาสตร์เทียบกับการขจัดเชิงสถิตของโครงสร้างและมวลหน่วยปรับค่า ได้ว่า

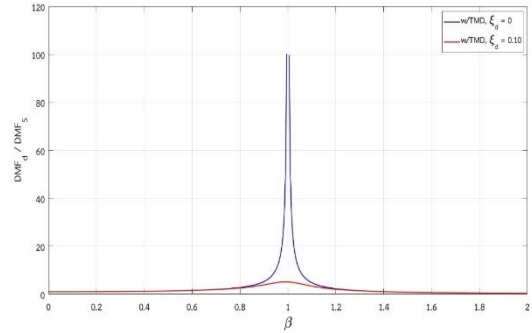
$$DMF_s = \left| \frac{X_s}{X_{st}} \right| = \left[\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_d \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \mu \alpha^2 \beta^2]^2 + [2\zeta_d \alpha \beta (1 - \beta^2 - \mu \beta^2)]^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$DMF_d = \left| \frac{X_d}{X_{st}} \right| = \left[\frac{(\alpha^2)^2 + (2\zeta_d \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \mu \alpha^2 \beta^2]^2 + [2\zeta_d \alpha \beta (1 - \beta^2 - \mu \beta^2)]^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองและอัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้น กำหนดให้พารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$, $\mu = 0.10$ และ $\alpha = 1.0$

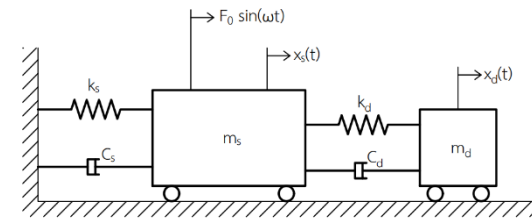
จากรูปที่ 2 กรณีโครงสร้างไม่มีมวลหน่วยปรับค่า (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ $\beta = 1.0$ หรือความถี่ของแรงกระตุ้นมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง (Resonance) จะมีค่าผลตอบสนองต่อการสั่นที่สูงมาก จึงต้องหาวิธีลดผลตอบสนองนี้ลงโดยการติดตั้งมวลหน่วยปรับค่ากับโครงสร้างหลัก ทั้งนี้จะแบ่งเป็นสองกรณี กรณีแรกคือการติดตั้งมวลหน่วยปรับค่าที่ไม่มีมวลหน่วง $\zeta_d = 0$ (เส้นสีแดง) จะเห็นว่าสามารถลดผลตอบสนองของการสั่นได้ทั้งหมด หรือกล่าวได้ว่ามีค่าผลตอบสนองเท่ากับศูนย์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียอยู่คือ เมื่ออัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้นมีค่าเบี่ยงเบนไปจาก 1.0 ($\beta \neq 1.0$) จะทำให้ค่าผลตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและได้ค่าที่สูงมากจึงมีช่วงความถี่ใช้งานค่อนข้างแคบ ทำให้ไม่เหมาะจะเอามาใช้กับโครงสร้างที่ไม่รู้ความถี่ของแรงกระตุ้นที่แน่นอน ในทางตรงกันข้าม กรณีสองคือการติดตั้งมวลหน่วยปรับค่าที่มีความหน่วง $\zeta_d = 0.10$ (เส้นสีเขียว) จะสังเกตเห็นว่าที่ $\beta = 1.0$ ค่าผลตอบสนองจะไม่เท่ากับศูนย์ แต่เมื่ออัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้นมีค่าเบี่ยงเบนไปจาก 1.0 จะมีค่าผลตอบสนองไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่มีมวลหน่วยปรับค่าที่ไม่มีมวลหน่วง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีช่วงความถี่ใช้งานที่กว้างขึ้นและเหมาะสมที่จะนำมาใช้ลดการสั่นไหวของโครงสร้างทั่วไปมากกว่า ดังนั้นมวลหน่วยปรับค่าจึงถูกนำมาใช้งานและพัฒนากันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการขจัดของมวลหน่วยปรับค่ากับโครงสร้างและอัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้น กำหนดให้พารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$, $\mu = 0.10$ และ $\alpha = 1.0$

จากรูปที่ 3 เป็นกราฟที่แสดงพฤติกรรมของการขจัดของมวลหน่วยปรับค่าเทียบกับโครงสร้างหลัก ในกราฟนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าการขจัดสูงสุดของมวลหน่วยปรับค่ามากกว่าของโครงสร้างหลักประมาณ 5 และ 100 เท่า สำหรับกรณีมวลหน่วยปรับค่าที่ใช้ $\zeta_d = 0.10$ และ $\zeta_d = 0$ ตามลำดับ ณ จุดที่เกิดการสั่นพ้อง ($\beta = 1.0$) ซึ่งข้อสังเกตดังกล่าวจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบเพราะสามารถนำไปช่วยผู้ออกแบบพิจารณาพื้นที่ใช้ติดตั้งและพื้นที่ให้มวลหน่วยปรับค่าสามารถสั่นได้อย่างเหมาะสม

2.4.2 พฤติกรรมการตอบสนองของระบบโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วยปรับค่า



รูปที่ 4 แบบจำลองโครงสร้างหลักมีความหน่วงและติดตั้งมวลหน่วยปรับค่าที่มีระดับชั้นความถี่เท่ากับสอง

ในความเป็นจริง ระบบโครงสร้างทั่วไปจะมีความหน่วงอยู่ไม่มากก็น้อย เพื่อช่วยในการสลายพลังงานของแรงกระตุ้นที่ทำให้เกิดการสั่นไหว แต่อย่างไรก็ตามในโครงสร้างที่มีการสั่นไหวได้มากมักมีความหน่วงไม่เพียงพอ จึงต้องติดตั้งมวลหน่วยปรับค่าเพื่อเพิ่มความสามารถการสลายพลังงานจลน์ของระบบ ซึ่งระบบโครงสร้างหลักมีความหน่วงและติดตั้งมวลหน่วยปรับค่าภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกที่กระทำต่อโครงสร้าง สามารถเขียนในรูปแบบจำลองการรวมมวล ที่มีระดับชั้นถี่เท่าสอง ดังรูปที่ 4 และสามารถนำเขียนเป็นสมการของการเคลื่อนที่ไดดังนี้

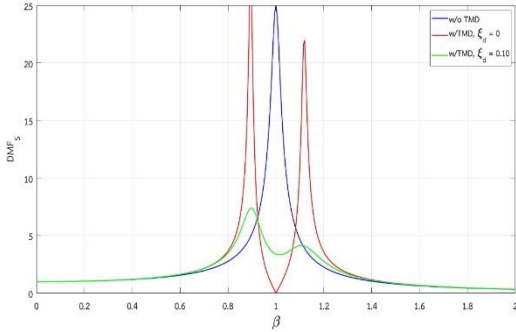
$$m_s \ddot{x}_s(t) + c_s \dot{x}_s(t) + c_d [\dot{x}_s(t) - \dot{x}_d(t)] + k_d [x_s(t) - x_d(t)] + k_s x_s(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$m_d \ddot{x}_d(t) + c_d [\dot{x}_d(t) - \dot{x}_s(t)] + k_d [x_d(t) - x_s(t)] = 0 \quad (6)$$

นำสมการ (5) และ (6) มาจัดรูปและแก้สมการทางคณิตศาสตร์ เหมือนกับกรณีโครงสร้างไม่ได้ติดตั้งมวลห้วงปรับค่า จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ ดังนี้

$$DMF_s = \left| \frac{X_s}{X_{st}} \right| = \left[\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_d \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \mu \alpha^2 \beta^2 - 4\zeta_s \zeta_d \alpha \beta^2]^2 + [2\zeta_d \alpha \beta(1 - \beta^2 - \mu \beta^2) + 2\zeta_s \beta(\alpha^2 - \beta^2)]^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$DMF_d = \left| \frac{X_d}{X_{st}} \right| = \left[\frac{(\alpha^2)^2 + (2\zeta_d \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \mu \alpha^2 \beta^2 - 4\zeta_s \zeta_d \alpha \beta^2]^2 + [2\zeta_d \alpha \beta(1 - \beta^2 - \mu \beta^2) + 2\zeta_s \beta(\alpha^2 - \beta^2)]^2} \right]^{1/2} \quad (8)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองและอัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้น กำหนดให้พารามิเตอร์ $\zeta_s = 0.02$, $\mu = 0.10$ และ $\alpha = 1.0$

จากรูปที่ 5 มีการพิจารณาความหน่วงของโครงสร้างหลัก ซึ่งจะทำให้การสลายพลังงานจลน์ในระบบนั้นดีขึ้น ส่งผลให้ผลตอบสนองของการจัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 2 แต่การอภิปรายผลในส่วนอื่นยังเหมือนกับกรณีโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วง

2.4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลห้วงปรับค่า

การลดความสั่นไหวของโครงสร้างให้ได้มากที่สุดโดยใช้มวลห้วงปรับค่านั้นต้องใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านั้นคือความถี่และความหน่วงของมวลห้วงปรับค่าที่มีแนวคิดมาจาก Den Hartog ที่หาค่าการขจัดน้อยที่สุดสำหรับโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วง (Minimizing displacement of undamped main structure) ภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์มอนิก ซึ่งจะได้สมการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังนี้

$$\text{อัตราส่วนปรับค่าความถี่ที่เหมาะสม, } \alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (9)$$

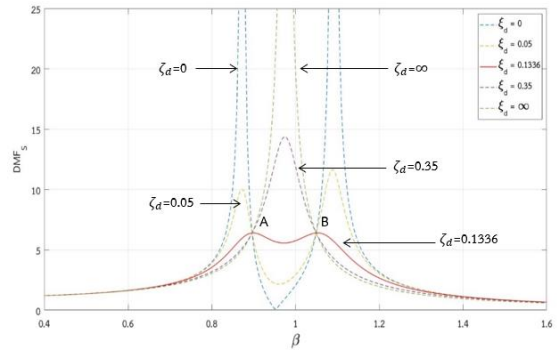
$$\text{อัตราส่วนการหน่วงที่เหมาะสม, } \zeta_{d,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (10)$$

$$\text{อัตราส่วนการหน่วงเทียบเท่า, } \zeta_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}} \quad (11)$$

ดำเนินการแสดงตัวอย่างกราฟผลตอบสนองการขจัดที่ใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสมการ (9) และ (10) กำหนดให้อัตราส่วนมวล $\mu = 0.05$ จะได้

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+0.05} = 0.9524$$

$$\zeta_{d,opt} = \sqrt{\frac{3 \times 0.05}{8(1+0.05)}} = 0.1336$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองและอัตราส่วนความถี่แรงกระตุ้น กำหนดให้พารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$, $\mu = 0.05$, $\alpha_{opt} = 0.9524$ และ ζ_d แตกต่างกันหลายค่า

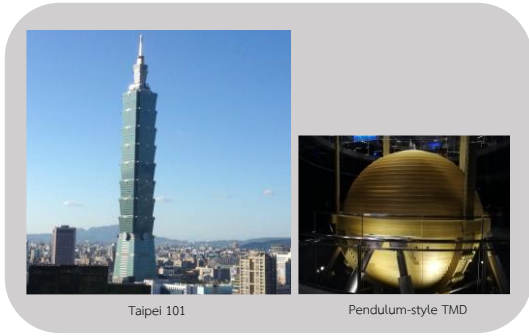
จากรูปที่ 6 จะสังเกตเห็นได้ว่า กรณี $\zeta_{d,opt} = 0.1336$ เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่คำนวณไว้ข้างต้น จะส่งผลให้ค่าผลตอบสนองการขจัดที่มากที่สุดน้อยกว่ากรณี ζ_d อื่น และยังมีค่าเท่ากับที่จุด A และ B ด้วย เนื่องจากหลักการที่ใช้หาสมการนั้นมาจากหลัก Two fixed point ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่คำนวณจากสมการข้างต้นนั้นสามารถทำให้ค่าผลตอบสนองการขจัดมีค่าน้อยที่สุดจริง

2.5 ขั้นตอนในการออกแบบมวลห้วงปรับค่า

ขั้นตอนในการออกแบบมวลห้วงปรับค่าขั้นพื้นฐานสำหรับโครงสร้างที่มีความหน่วงต่ำและมีความยืดหยุ่นสูงโดยยึดรูปแบบขั้นตอนตามงานวิจัย [5] มีดังนี้

- 1.) ระบุคุณสมบัติด้านพลวัตของโครงสร้างหลัก เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ ขนาดของมวลที่เกิดการสั่น อัตราส่วนความหน่วงในโหมดที่ควบคุมโดยมวลห้วงปรับค่า
- 2.) หาค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลห้วงปรับค่า
- 3.) หาค่าอัตราส่วนมวลที่เหมาะสม
- 4.) คำนวณหาค่าอัตราส่วนความถี่ที่เหมาะสมและค่าอัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมจากอัตราส่วนมวล (กำหนดค่า K_T (Stiffness) และ C_T (Damping coefficient) ของมวลห้วงปรับค่า)
- 5.) คำนวณค่าการกระจัดสูงสุดของมวลห้วงปรับค่า ถ้าได้ค่าที่มากเกินไปให้ทำการหาอัตราส่วนมวลในข้อที่ 3.) ใหม่
- 6.) ออกแบบกลไกการทำงานของระบบมวลห้วงปรับค่า รวมถึงวิธีการในการปรับค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของมวลห้วงปรับค่า
- 7.) ทดสอบการทำงานของมวลห้วงปรับค่าด้วยวิธีการต่างๆ
- 8.) ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าที่โครงสร้างหลัก ตรวจสอบพฤติกรรม และปรับแต่งค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของมวลห้วงปรับค่าบริเวณหน้างาน

2.6 ตัวอย่างโครงสร้างที่ประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหว



รูปที่ 7 ตึก Taipei 101, Xinyi dist., Taipei City

ตึกไทเป 101 มีการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่มีลักษณะเหมือนกับ ลูกตุ้มที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก โดยมีน้ำหนักกว่า 660 ตัน เพื่อให้มวลหน่วงปรับค่าชนิดนี้แกว่งไป-มาเพื่อสลายพลังงานที่เกิดจากการสั่นไหวของอาคารในกรณีที่เกิดลมกรรโชกแรง อีกทั้งยังเป็นสถานที่ท่องเที่ยวยอดนิยมของนักท่องเที่ยวอีกด้วย ถึงขนาดมีการทำของฝากที่ชื่อว่า “Damper Baby” ขายให้กับนักท่องเที่ยวที่มาเยี่ยมชม

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

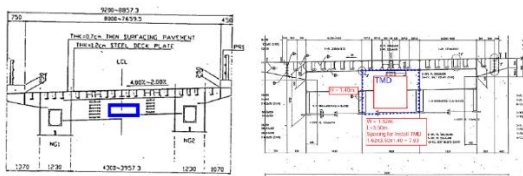
3.1 สะพานข้ามแยกบางกะปิ

สะพานข้ามแยกบางกะปิ (สะพานลาดพร้าว-เสรีไทย) เป็นสะพานขนาด 4 ช่องจราจร ทิศทางละ 2 ช่องจราจร กว้างช่องละ 3.25 เมตร

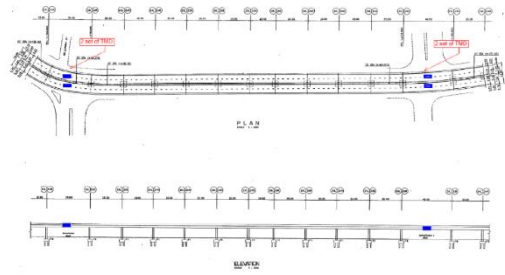


รูปที่ 8 สะพานข้ามแยกบางกะปิ

ตัวสะพาน (Bridge deck) ของสะพานนี้ประกอบด้วย พื้นสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดเทหันทับหน้าที่ยาวพาดอยู่บนคานเหล็กรูปตัว I หรือเรียกวม ๆ ว่าระบบพื้นสะพานแบบคานเหล็กรูปตัวไอ (Steel I-Girder) และมีพื้นที่ในการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า แสดงดังรูปที่ 9 โดยจะทำการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่บริเวณกึ่งกลางช่วงของสะพานในแต่ละทิศทาง บริเวณจุดที่มีความยาวช่วงสะพานยาวมากกว่าปกติดังรูปที่ 10

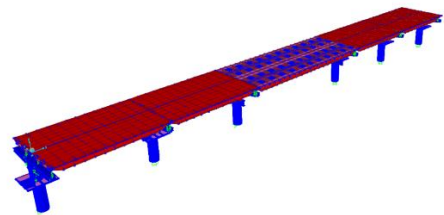


รูปที่ 9 ภาคตัดขวางแสดงลักษณะของตัวสะพานและพื้นที่จำกัดในการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

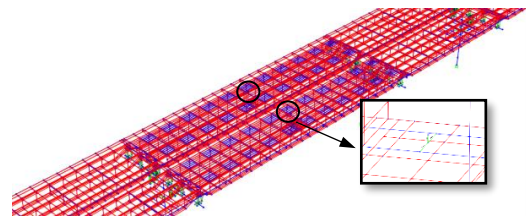


รูปที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าบริเวณกึ่งกลางสะพานของ สะพานข้ามแยกบางกะปิ

3.2 การสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายลักษณะทางพลศาสตร์และพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 11 แบบจำลองสะพานข้ามแยกบางกะปิจากโปรแกรม CSiBridge Design



รูปที่ 12 ระบุตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าในโปรแกรม CSiBridge Design

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UK	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RR
Filter	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Wide	10	0.222096	4.95E-06	5.192E-06	0.00192	0.07942	0.02916	0.19056	0.734E-07
MODAL	Wide	40	0.199127	4.268E-07	4.512E-08	0.00042	0.07966	0.04607	0.31744	0.01008
MODAL	Wide	15	0.237773	2.820E-06	0.00023	0.00413	0.07941	0.02017	0.10339	0.00011
MODAL	Wide	7	0.354487	0.33344	1.079E-10	0.00335	0.06051	0.0026	0.0026	0.264E-10
MODAL	Wide	27	0.218199	2.391E-06	0.00045	0.00199	0.07908	0.02025	0.04274	3.287E-05
MODAL	Wide	43	0.200507	0.544E-06	0.00011	0.00145	0.07997	0.02060	0.00504	0.016E-05
MODAL	Wide	65	0.16068	4.607E-06	3.27E-09	0.00137	0.07910	0.76064	0.576	1.986E-09
MODAL	Wide	42	0.201048	1.081E-06	2.472E-05	0.001	0.07907	0.0204	0.0444	0.134E-10
MODAL	Wide	47	0.198684	0.537E-06	0.13172	0.00081	0.07908	0.77209	0.57199	0.146E-06
MODAL	Wide	20	0.222497	4.205E-07	2.725E-08	0.00076	0.07942	0.02016	0.10008	0.179E-09
MODAL	Wide	45	0.199621	0.747E-06	1.488E-06	0.00069	0.07907	0.02081	0.04682	0.478E-06
MODAL	Wide	61	0.184234	4.062E-07	0.00011	0.00048	0.071	0.79791	0.57424	0.078E-06
MODAL	Wide	60	0.194079	0.637E-07	4.31E-06	0.00044	0.071	0.79791	0.57379	1.271E-06

รูปที่ 13 โหมดการเคลื่อนที่ของสะพานจากโปรแกรม CSiBridge Design เลือก 1st Vertical Mode จะได้ค่าคาบการสั่นของ Mode นี้มา คำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติไปใช้ต่อไป

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.341} = 2.9321 \text{ Hz}$$

มวลของโครงสร้างสะพานจะสามารถหามวลนี้ได้โดยการนำค่า Joint Reaction ที่ยึดระหว่างเสาตอม่อและสะพานมาบวกกัน จะได้

$$m_s = 1089.361 \text{ kN}$$

เพิ่มเติมในส่วนของมวลห้วงปรับค่าจะใช้น้ำหนัก

$$m_d = 20 \text{ kN}$$

นำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดัง

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} = \frac{20}{1089.361} = 0.0184$$

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} = \frac{1}{1 + 0.0184} = 0.9820$$

$$\zeta_{d,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{3 \times 0.0184}{8(1 + 0.0184)}} = 0.0823$$

3.3 การสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่เกิดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีก่อนและหลังการติดตั้งมวลห้วงปรับค่า

3.3.1 กรณีการสั่นไหวแบบอิสระ

การจำลองสะพานให้เกิดการสั่นแบบอิสระ โดยการใส่แรง Point Load ขนาด 500 kN ในทิศทาง Gravity ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และกำหนดให้แรงที่ใส่เข้าไปนั้นกระทำต่อสะพานเป็นเวลาตั้งแต่ 0-1 วินาทีแรก จากนั้นเอาแรงออกทันทีแล้วปล่อยให้สั่นแบบอิสระจนกว่าโครงสร้างสะพานจะหยุดสั่น นอกจากนั้นได้ทำการกำหนดให้อัตราส่วนความหน่วงของสะพานมีค่าเท่ากับ 0.016

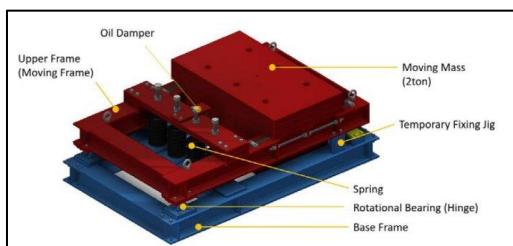
จะได้กราฟ Time-History Function ของโครงสร้างสะพานมาเพื่อใช้เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีก่อนและหลังการติดตั้งมวลห้วงปรับค่า

3.3.2 กรณีการสั่นพ้อง

การจำลองสะพานให้เกิดการสั่นพ้อง โดยการใส่แรง Point Load ขนาด 500 kN ในทิศทาง Gravity ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และกำหนดให้แรงที่กระทำกับสะพานนั้นมีค่าความถี่ตรงกับคาบธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน ซึ่งเท่ากับ 0.341 วินาที และให้สะพานสั่นด้วยความถี่นี้ไปเรื่อย ๆ เป็นเวลา 30 รอบ นอกจากนั้นได้ทำการกำหนดให้อัตราส่วนความหน่วงเฉพาะสะพานมีค่าเท่ากับ 0.016

จะได้กราฟการกระจัดในแนวตั้งของโครงสร้างสะพานมาเพื่อใช้เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีก่อนและหลังการติดตั้งมวลห้วงปรับค่า

3.4 การออกแบบมวลห้วงปรับค่า



รูปที่ 14 ส่วนประกอบของมวลห้วงปรับค่าที่จะนำไปติดตั้งจริงสำหรับสะพานข้ามแยกบางกะปิ

มวลห้วงปรับค่าสำหรับสะพานข้ามแยกบางกะปิจะใช้มวลห้วงปรับค่าชนิดคานยื่น (Cantilever type TMD) มีขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบไม่เกิน 5.670 ตารางเมตร และสูงไม่เกิน 1.400 เมตร ทำให้ได้ขนาดของอุปกรณ์ที่ความกว้าง 1.129 เมตรความยาว 1.834 เมตร และความสูง 0.734 คิดเป็นปริมาตร 1.520 ลูกบาศก์เมตร เพียงพอต่อการใช้งานตามข้อกำหนดด้านคุณสมบัติและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้านทานการสั่นไหว โดยหลักการทำงานจะใช้มวลห้วงเคลื่อนที่ (Moving Mass) ที่มีน้ำหนัก 2 ตัน ตามตารางที่ 14 ข้อกำหนดด้านคุณสมบัติและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้านทานการสั่นไหว แล้วจึงติดตั้งบนคานด้านบน (Upper Frame) ของระบบที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวตั้งได้ คล้ายกับการสั่นกลับไป-กลับมาของลูกตุ้ม Pendulum โดยอาศัยสปริงจำนวน 4 ตัวเป็นตัวกำหนดช่วงของความถี่ปรับค่า ของระบบตามระยะขจัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางมวลของมวลห้วงถึงจุดหมุน (Hinge) รวมถึงมีกระบอกตัวห้วงชนิดน้ำมัน (Oil Damper) ที่สามารถปรับความหนืดได้ผ่านการปรับขนาดของรู (Orifice) ภายในกระบอก ทำให้ได้ค่าความหน่วงที่เหมาะสม (Optimal Damping) เพื่อสลายพลังงานและทำให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเกิดการสั่น

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดด้านคุณสมบัติและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้านทานการสั่นไหว

	Specified Volume	Unit
Moving Mass Per Unit	2,000 (±10%)	kg
TMD Volume	≤1.5	m ³
Maximum Stroke	±50	mm
Motion Direction	Vertical	
Required Tuning Frequency Ratio	1.00f _o ±15%	f _o =2.60 Hz 1 st bridge frequency
Required Additional Damping (1 st Modal damping ratio)	≥0.05	ratio by free vibration test
Warranty Period	5	years

3.5 การตรวจสอบคุณสมบัติของมวลห้วงปรับค่าตามที่ออกแบบ

3.5.1 การตรวจสอบขนาด

ตามมาตรฐาน ISO 13920 [6] ว่าด้วยเรื่องของความคลาดเคลื่อนโดยทั่วไปของโครงสร้างที่ใช้งานเชื่อม เป็นการตรวจสอบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต เพื่อให้การประกอบและติดตั้งแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันเป็นไปอย่างราบรื่น อุปกรณ์มวลห้วงที่จะนำไปติดตั้งจะใช้การตรวจสอบตามแบบ Linear Dimension คือการวัดระยะจริงจากผิวงานด้านหนึ่งถึงผิวงานอีกด้านหนึ่ง

3.5.2 การตรวจสอบน้ำหนัก

การตรวจสอบน้ำหนักไม่มีมาตรฐานที่ตายตัวเหมือนการตรวจสอบขนาดของอุปกรณ์แต่จะกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักในแต่ละ

ชิ้นส่วน รวมถึงหลังประกอบแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน มีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ได้ในขั้นตอนการออกแบบ

3.5.3 การตรวจสอบความหนาของเส้นเคเบิล

การหาเส้นเคเบิลผิวตัวอุปกรณ์มีความสำคัญอย่างมากในการคงสภาพการใช้งานของมวลหน่วงปรับค่าให้ยาวนานขึ้นจากการใช้งานในพื้นที่จริงที่ต้องเผชิญกับอากาศและความชื้น จึงมีการตรวจสอบความหนาของเส้นเคเบิลตามมาตรฐาน ISO 12944 [7]

3.5.4 การทดสอบแรงเสียดทาน

การทดสอบแรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ของมวลหน่วงเคลื่อนที่บนอุปกรณ์ อาศัยการวางก้อนมวลไว้บนมวลหน่วง แล้วจึงค่อยๆวางก้อนมวลเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่มวลหน่วงเริ่มเคลื่อนที่ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (Displacement Sensor) ในการวัด เพื่อตรวจสอบไม่ให้แรงเสียดทานที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลหน่วงมีมากเกินไปจนกระทบกับระบบที่ได้ทำการออกแบบไว้

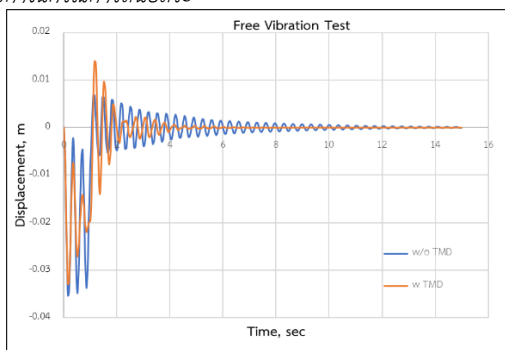
3.5.5 การทดสอบการสั่นอิสระ

การทดสอบการสั่นแบบอิสระของมวลหน่วงปรับค่าเพื่อหาช่วงของความถี่ปรับค่าของมวลหน่วงปรับค่าและความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า โดยการติดตั้งมาตรวัดความเร่ง (Accelerometer) ไว้บนตัวอุปกรณ์ แล้วใช้แรงคนในการกดทดสอบลงบนโครงที่ยึดกับมวลให้เคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระโดยไม่ให้มีสิ่งรบกวนนอกไปรบกวนระบบจนกว่าระบบจะหยุดนิ่งภายใต้สมมติฐานต่างๆในการทดสอบเช่น การใส่ตัวหน่วงและไม่ใส่ตัวหน่วงในระบบ การใช้สปริงขนาดต่างกัน ระยะขจัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางมวลของมวลหน่วงถึงจุดหมุน (Hinge)

4. ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง

4.1.1 ประสิทธิภาพของการลดการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงปรับค่าในกรณีการสั่นอิสระ

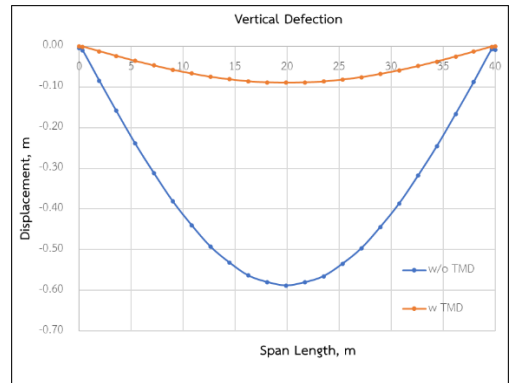


รูปที่ 15 กราฟ Time-History of Vertical Displacement ในช่วงของการสั่นอิสระ

การกระจัดสูงสุดที่ค่าแอมพลิจูดหลังจากการใส่แรงอยู่ที่ 0.0066 เมตร แล้วค่อย ๆ ลดลงด้วยความหน่วงตั้งต้นของสะพานที่ไม่ใส่เข้าไปในโปรแกรมและใช้เวลามากกว่า 15 วินาทีในการสลายพลังงานการสั่นให้การกระจัดลดลงจนเข้าใกล้ 0 ในทางกลับกันกราฟการสั่นของโครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า พบว่ามีค่าการกระจัดสูงสุดในช่วงแรกอยู่ที่ประมาณ 0.015 เมตร จากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วด้วยผลของความหน่วงที่เพิ่มเข้าไปให้กับโครงสร้าง และสลายพลังงานการสั่นจนทำให้การกระจัดลดลงจน

เข้าใกล้ 0 ภายในเวลา 6 วินาที ซึ่งเร็วกว่ากราฟของโครงสร้างที่ไม่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามาก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการลดเวลาในการสั่นไหวของโครงสร้างคิดเป็นร้อยละ 40

4.1.2 ประสิทธิภาพของการลดการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงปรับค่าในกรณีการสั่นพ้อง



รูปที่ 16 การกระจัดแนวตั้งของสะพานกรณีเกิดการสั่นพ้อง

ให้ความถี่ของแรงกระทำตรงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน จะพบว่าการกระจัดสูงสุดที่กึ่งกลางสะพานเท่ากับ 0.5878 เมตร ในส่วนของกราฟการกระจัดแนวตั้งของสะพานที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า จะมีการกระจัดสูงสุดที่กึ่งกลางสะพานเท่ากับ 0.0899 ซึ่งจะเห็นว่าค่าการกระจัดสูงสุดที่กึ่งกลางสะพานจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็นประสิทธิภาพของการลดการกระจัดของการสั่นไหวในกรณีของการสั่นพ้องของโครงสร้างเท่ากับร้อยละ 85

5. อภิปรายและสรุปผลงานวิจัย

จากปัญหาการรื้อสะพานข้ามแยกบางกะปิเพื่อก่อสร้างทางเดินรถไฟสายสีเหลืองจนทำให้มีบางช่วงของสะพานที่มีความยาวช่วงมากกว่าปกติ เป็นสาเหตุให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับปัญหาการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน จนอาจนำไปสู่ผลกระทบต่อผู้ขับขี่ที่สัญจรเข้ามาเพื่อใช้งานเส้นทางดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การทำวิจัยเพื่อที่จะนำนวัตกรรมการปรับปรุงคุณสมบัติในเชิงพลศาสตร์ของสะพานที่ไม่ค่อยพบเห็นมากนักในประเทศไทย มาจัดทำและเผยแพร่ให้กับผู้ที่สนใจได้รู้จักกับนวัตกรรมชนิดนี้ซึ่งก็คือ มวลหน่วงปรับค่า รวมถึงวิธีการออกแบบ ขั้นตอนในการตรวจสอบ การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองการสั่นไหวของสะพานก่อนและหลังติดตั้งเพื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน แล้วจึงนำไปติดตั้งบริเวณกึ่งกลางด้านใต้ท้องของสะพานในที่สุด

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้จัดทำขึ้นด้วยโปรแกรม CSiBridge Design เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของสะพานทั้งก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า โดยใช้ค่าอัตราส่วนมวลที่ 1.84% ภายใต้สภาวะการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกคือการใส่แรงภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาของการใส่แรงที่สั้นที่สุดเพียง 1 วินาที เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวทั้งกรณีของการสั่นอิสระและกรณีของการสั่นพ้อง จะเห็นได้ว่าการใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพานมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากรณีนี้

ไม่ได้ใช้อย่างเห็นได้ชัด โดยลดผลเวลาในการสั่นไหวของสะพานเทียบกับก่อนติดตั้งได้ 40% และลดผลการกระจัดกรณีของการสั่นพ้องของโครงสร้างเทียบกับก่อนติดตั้งได้ 85%

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่อง การประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน ได้รับการสนับสนุนอย่างเต็มที่จากศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว ทั้งในด้านองค์ความรู้เรื่องการทำวิจัย และให้งบประมาณในการทำวิจัย นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากนายฐิติพงศ์ เจริญสุข ในด้านข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างสะพานในโปรแกรม CSiBridge Design และโอกาสในการได้ศึกษาทำความเข้าใจ แล้วนำข้อมูลที่มีมาทำงานวิจัย ซึ่งส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ที่ได้รับจากศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว และนายฐิติพงศ์ เจริญสุข โดยหวังว่าผลการวิจัยนี้จะ เป็นประโยชน์ในการพัฒนาความก้าวหน้าของนวัตกรรม การก่อสร้างไทยต่อไปขอขอบคุณนิตินิตให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพโรจน์ วัฒนานันท์. การลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานด้วยมวลหน่วงปรับค่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010: 26-45.
- [2] Warburton, G. B. Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. Earthqu. Eng. Struct. Dyn. 10(1982): 381-401.
- [3] Chopra, A. K., 2012. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4th Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [4] Den Hartog, J. P., 1956. Mechanical Vibrations. McGraw-Hill Book Company, New York, USA
- [5] HEYDAR BEYGI, 2015. Vibration Control of a High-Speed Railway Bridge Using Multiple Tuned Mass Dampers, Royal Institute of Technology, KTH Department of Civil and Architectural Engineering Division of Structural Engineering and Bridges Stockholm, Sweden, 2015
- [6] EN ISO 13920, Welding; General tolerances for welded constructions, Dimensions for lengths and angles, Shape and position, 1996
- [7] ISO 12944, Paints and Varnishes; Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, 3rd Edition, 2018