



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสม
ที่มีตัวหน่วงแบบของเหลว

Suppression of Structural Vibration by the Optimal TMD with Liquid Damper

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม

มิถุนายน 2543



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสม
ที่มีตัวหน่วงแบบของเหลว

Suppression of Structural Vibration by the Optimal TMD with Liquid Damper

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม

มิถุนายน 2543

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสม
ที่มีตัวหน่วงแบบของเหลว

Suppression of Structural Vibration by the Optimal TMD with Liquid Damper

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นคร ภูวโรดม

สังกัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ทูลเลขที่ PDF34/2541 ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูง ที่ได้ทำให้เกิดการวิจัยพัฒนาที่เป็นประโยชน์ต่อประเทศ ต่อผู้วิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย แห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย นักวิจัยที่ปรึกษาของโครงการนี้ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา และความเห็นที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อโครงการ

ขอขอบคุณ นายโสภาค กาญจะโนสถ นายมณฑล รุ่งโรจน์สุวรรณ อดีตนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง และนักศึกษาของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนงานวิจัยนี้ในหลายๆด้าน

นคร ภู่วโรดม

มิถุนายน 2543

บทคัดย่อ

สัญญาเลขที่: PDF34/2541

ชื่อโครงการ: การแก้ไขปัญหการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสมที่มีตัวหน่วงแบบของเหลว

หน่วยงานของหัวหน้าโครงการ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail Address: pnakhorn@engr.tu.ac.th

ช่วงเวลาการดำเนินโครงการ : 1 กรกฎาคม 2541-30 มิถุนายน 2543

วัตถุประสงค์: งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น สำหรับระบบควบคุมการสั่นสะเทือนด้วยมวลหน่วงแบบชุด ซึ่งคุณสมบัติไม่เชิงเส้นของตัวหน่วงมาจากแรงลากที่ด้านการเคลื่อนที่ของวัตถุลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งเคลื่อนที่อยู่ในของเหลว

วิธีการศึกษา: การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาคุณสมบัติของตัวหน่วงที่นำเสนอเพื่อทดสอบลักษณะของการหน่วงแบบไม่เชิงเส้น และค่าคงที่ของการหน่วง จากนั้นประยุกต์เข้ากับระบบมวลหน่วงชุด ทำการศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงชุดโดยวิธีทางตัวเลข และศึกษาคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเมื่อมีความแปรปรวนในค่าที่ใช้ในแบบจำลองสำหรับการศึกษา จากนั้นทำการพัฒนาขั้นตอนการออกแบบระบบมวลหน่วงชุดที่เหมาะสมด้วยวิธีทางตัวเลข และในขั้นสุดท้ายเป็นการผลิตระบบมวลหน่วงชุดขึ้นเพื่อทำการติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพสำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือนเนื่องจากคนเดินบนสะพานลอยคนข้าม

ผลการศึกษา: จากขั้นตอนการศึกษาด้วยวิธีทางตัวเลขพบว่าระบบมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนได้ใกล้เคียงกับระบบมวลหน่วงชุดแบบเชิงเส้น วิธีการออกแบบระบบมวลหน่วงชุดอย่างเหมาะสมด้วยวิธีทางตัวเลขที่พัฒนาขึ้น สามารถช่วยให้การคำนวณสามารถได้ผลอย่างรวดเร็ว และในขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของระบบจริงพบว่า ค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยเฉลี่ยของโครงสร้าง เพิ่มขึ้นจากค่าเดิม 0.005 เป็น 0.036 และค่าความเร่งสูงสุด เนื่องจากคนเดินข้ามลดลงจากก่อนการติดตั้ง 0.80-1.30 เมตร/วินาที² เป็นค่าเมื่อหลังติดตั้ง 0.27-0.40 เมตร/วินาที²

สรุปและวิจารณ์: งานวิจัยนี้นำเสนอหลักการแก้ปัญหการควบคุมการสั่นสะเทือนด้วยตัวหน่วงแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมในด้านการปฏิบัติ และสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาทั่วไป ข้อดีของระบบที่นำเสนอคือ ความไม่ซับซ้อนของระบบ การประหยัด การบำรุงรักษาได้ และระบบนี้สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพเริ่มต้น

ข้อเสนอแนะ: ระบบที่นำเสนอที่น่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการแก้ปัญหการสั่นสะเทือน การประยุกต์ระบบนี้กับปัญหาอื่น ๆ สามารถทำได้โดยสะดวกเพียงการออกแบบรูปทรงใหม่ให้เหมาะสม และทำการทดลองแบบง่ายเพื่อทดสอบคุณสมบัติของระบบ

Keyword: ระบบมวลหน่วงชุด ความหน่วงแบบไม่เชิงเส้น การหาค่าที่เหมาะสม การสั่นสะเทือนเนื่องจากมนุษย์ สะพานลอยคนข้าม

Abstract

Project Code: PDF34/2541

Project Title: Suppression of Structural Vibration by the Optimal TMD with Liquid Damper

Investigators: Faculty of Engineering, Thammasat University

E-mail Address: pnakhorn@engr.tu.ac.th

Project Period: 1 July 1998 – 31 June 2000

Objectives: This research presents the nonlinear damper for the practical Multiple Tuned Mass Damper (MTMD) in which the nonlinear damping force is a drag force from liquid acting on an immersed section.

Methodology: The experiments were done in a simple laboratory set up to investigate nonlinear damping property of many kinds of liquid. Then it was applied into nonlinear MTMD system. The performance were numerically studied and compared to the linear MTMD system. The numerical optimization approach was developed for optimal design. Finally, the real application of this proposed nonlinear MTMD was installed on a pedestrian bridge in order to suppress the vertical vibration from human walking.

Results: From numerical simulations, it was found that the nonlinear MTMD can suppress structural vibration with the similar effectiveness and robustness as the linear MTMD. The developed optimization approach could search for the optimal parameter effectively. In the real MTMD installation, the results from both field measurement and numerical calculation agree quite well and clearly show the effectiveness on vibration reduction. After MTMD installation, the average damping ratio was increased from 0.005 to 0.036 and the range of the maximum acceleration of walking test was reduced from 0.80-1.30 m/s^2 to 0.27-0.40 m/s^2 .

Discussion Conclusion: This research presents the new concept for the effective and practical MTMD system that can be applied in general structural control applications. The outstanding features of this system are simple, economical, maintainable and functionable under wide range of environmental conditions.

Suggestions/ Further Implication/ Implementation: The proposed damper may give promising solution for the application on vibration control purposes. Any other modification for specific problem can be practically done by requiring only new assembly design and simple tests.

Keywords: Multiple Tuned Mass Damper, nonlinear damping, optimization, man-induced vibration, pedestrian bridge

Executive Summary

การสั่นสะเทือนของโครงสร้างเนื่องจากแรงที่มากระทำในสภาวะการใช้งานโดยทั่วไป เป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากขนาดชิ้นส่วนของโครงสร้างที่เล็กลงอันเป็นผลมาจากการพัฒนาต่างๆในทางวิศวกรรมโยธา ทำให้อาจเกิดผลเสียต่อความปลอดภัยหรือความไม่เหมาะสมต่อการใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ ดังนั้นการควบคุมไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนเกินระดับที่ยอมให้จึงมีความสำคัญที่จะนำมาประยุกต์ใช้ การศึกษาการควบคุมการสั่นสะเทือนวิธีหนึ่งที่มีผลดี ในด้านความสะดวกต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูง คือระบบมวลหน่วง (Tuned Mass Dampers, TMD) ซึ่งเป็นระบบย่อยที่สามารถสั่นสะเทือนอย่างสอดคล้องกับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างหลัก และสลายพลังงานของการสั่นสะเทือนของทั้งระบบด้วยตัวหน่วง (Damper) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและความมั่นคงของมวลหน่วง คือการใช้ระบบมวลหน่วงชุด (Multiple Tuned Mass Damper, MTMD) ซึ่งจะประกอบไปด้วยมวลหน่วงหลายตัวที่มีความถี่ธรรมชาติต่างๆ กันไป การประยุกต์ใช้ระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดในปัจจุบันในประเทศไทยยังมีอยู่ไม่มากนัก เนื่องจากปัญหาหลักคือขาดนักวิจัยที่จะประยุกต์การใช้งานจริง และการผลิตในส่วนของตัวหน่วงสำหรับระบบมวลหน่วงค่อนข้างทำได้ยาก และต้องอาศัยสมมุติฐานของความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงหน่วงกับความเร็วของการเคลื่อนที่ ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาและประยุกต์ระบบมวลหน่วงเพื่อให้อาจใช้ได้จริงในปัญหาสำหรับโครงสร้างทั่วไปในประเทศไทย งานวิจัยนี้จะนำเสนอระบบมวลหน่วงที่มีตัวหน่วงที่สามารถผลิตขึ้นได้โดยง่าย โดยที่แรงหน่วงที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหล และมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นกับความเร็วของการเคลื่อนที่

แนวทางในการดำเนินงานวิจัยคือ การเก็บข้อมูลและตรวจวัดโครงสร้างตัวอย่างที่จะแก้ปัญหา การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการคำนวณทางทฤษฎี การทดลองเพื่อทดสอบพฤติกรรมและคุณสมบัติของตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น จากนั้นนำผลไปวิเคราะห์โดยวิธีทางตัวเลขเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงแบบชุดที่มีตัวหน่วงที่นำเสนอ และเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบเบื้องต้น การพัฒนาวิธีสำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีทางตัวเลข และการผลิตระบบมวลหน่วงชุดและนำไปทดสอบกับโครงสร้างจริงเพื่อตรวจสอบและปรับในขั้นสุดท้าย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการลดการสั่นสะเทือนสูงที่สุด

การศึกษาในขั้นตอนแรกได้เลือกโครงสร้างสำหรับตัวอย่างศึกษา คือสะพานลอยคนข้ามบริเวณหน้าองค์การตลาดเพื่อเกษตรกร ถนนกำแพงเพชร เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนามทำให้สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับโครงสร้าง นอกจากนั้น ได้ทำการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการเดินทางของคน เช่น ความเร็ว ความถี่ของการก้าว ความยาวก้าว และ ความน่าจะเป็นของการมาใช้สะพานที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับแรงภายนอกกระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากคนเดิน

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของแบบจำลองตัวหน่วง แบบจำลองตัวหน่วงที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบที่มีดีกรีแห่งความอิสระเท่ากับหนึ่ง ประกอบไปด้วย มวลเหล็กแขวนโดยสปริงที่มุมทุกมุม มีค่าความถี่ธรรมชาติของระบบประมาณเท่ากับค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบมวลหน่วงและมีค่าความหน่วงในสปริงน้อยมาก และชุดหน้าตัดที่เคลื่อนที่ได้ในของเหลวทำให้เกิดแรงหน่วง การทดลองเป็นการสั่นแบบอิสระของระบบ โดยให้ระบบมีค่าการขจัดเริ่มต้นแล้วบันทึกค่าการเคลื่อนที่ของระบบที่เวลาต่างๆ และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีคุณสมบัติความหน่วงแบบต่างๆ ทั้งแบบเชิงเส้น และ ไม่เชิงเส้นโดยใช้วิธีทางตัวเลข Step-by-step Integration ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบพบว่าแรงหน่วงที่เกิดขึ้นในระบบมีความสัมพันธ์กับกำลังสองของความเร็วในการเคลื่อนที่ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงสัมพันธ์กับขนาดของหน้าตัด ความหนาแน่นของของเหลว ค่า Drag coefficient ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Reynold's number ตามทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล และสามารถควบคุมให้ค่าความหน่วงที่ได้จากตัวหน่วงแบบของเหลวนี้นี้มีค่าตามต้องการเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวหน่วงในระบบมวลหน่วงได้ต่อไป

ในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงแบบชุดที่มีตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น ได้ทำการพัฒนาวิธีการหาคำตอบของการเคลื่อนที่ของระบบโดยวิธีทางตัวเลข จากสมมุติฐานและผลการทดลองเบื้องต้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงหน่วงกับความเร็วของการเคลื่อนที่ได้ และสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ จากสมการของการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปเมทริกซ์และมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้นนี้ การหาคำตอบทำได้โดยวิธีทางตัวเลข คือวิธี Step-by-Step Integration ผลจากการศึกษาด้วยแบบจำลองนี้พบว่า ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่น่าเสนออยู่ในช่วงที่ทำจริงได้ และระบบไม่ซับซ้อน ผลการศึกษาด้านประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงพบว่าตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นและตัวหน่วงแบบเชิงเส้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และผลการศึกษาด้านคุณสมบัติด้านความมั่นคงพบว่า ระบบตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นที่น่าเสนอ และระบบตัวหน่วงแบบเชิงเส้น มีปัญหาในด้านประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากความผิดพลาดในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง นอกจากนี้สำหรับระบบตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น ยังต้องพิจารณาผลของความผิดพลาดในการประมาณค่าแรงภายนอกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ระบบมวลหน่วงย่อยหลายๆชุดหรือระบบ MTMD จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความมั่นคงต่อความผิดพลาดในการประมาณค่าใดๆ ได้

จากขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงชุดทำให้สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เหมาะสมได้ด้วยวิธีลองผิดลองถูก แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาการออกแบบระบบมวลหน่วงชุดที่เหมาะสมโดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Optimization) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานดังนี้ การหาคำตอบของระบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธี Perturbation และ วิธี Method of Averaging การหาค่าความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent

Damping) ในรูปแบบของค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น การหาสัดส่วนของแรงภายนอกที่มีผลต่อค่า Damping ของระบบมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้น และการออกแบบระบบ MTMD ที่เหมาะสม โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Optimization) จากระบบที่อยู่ในรูปที่มีความหน่วงเทียบเท่า โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ MTMD ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสม (Objective Function) สำหรับการศึกษาครั้งนี้คือ ลดค่าตัวคูณขยายทางพลวัต (Dynamic Magnification Factor, DMF) ให้มีค่าต่ำที่สุด ผลที่ได้สำหรับขั้นตอนการวิจัยนี้ คือ ชุดของค่ามวล ความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วง ที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ลดปัญหาการสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ผลของการคำนวณจากวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้พบว่าระบบ MTMD มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้มากกว่าหนึ่งคำตอบ ดังนั้น คำตอบที่ได้จากการทำ Optimization จึงค่อนข้างขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การหาคำตอบด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการลองผิดลองถูก และสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วมาก

ในขั้นตอนสุดท้ายคือการออกแบบของแต่ละชิ้นส่วนของระบบ MTMD อย่างละเอียด จากนั้นทำการผลิตโดยประกอบให้เป็นระบบและนำไปติดตั้งกับโครงสร้างตัวอย่างและทำการทดสอบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของ MTMD จริง โดยสามารถมีการปรับแก้ค่าความถี่ธรรมชาติเล็กน้อยในขั้นสุดท้าย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ หลังการประกอบติดตั้งได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงโดยตรวจวัดความเร่งในการสั่นของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็กด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณภาคสนามและวิเคราะห์สัญญาณความเร่งในการสั่นของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆของสะพานลอยเมื่อเกิดการสั่นใน 2 ลักษณะ ได้แก่อัตราส่วนความหน่วงเมื่อเกิดการสั่นแบบอิสระ และความเร่งสูงสุดเมื่อเกิดการสั่นเนื่องจากคนเดินผ่าน และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งของสะพานลอยทั้งในขณะที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งมวลหน่วงชุด เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นในการแก้ปัญหาการสั่นของสะพานลอย และเปรียบเทียบผลการตอบสนองในการสั่นทั้ง 2 ลักษณะของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็กในขณะที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งมวลหน่วงชุดกับแบบจำลองการตอบสนองของโครงสร้างเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานเมื่อมีการสั่นแบบอิสระและค่าความเร่งสูงสุดเฉลี่ยของสะพานเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดินโดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุดเท่ากับ 0.5% และ 0.82 m/s^2 ตามลำดับ หลังการติดตั้งมวลหน่วงชุดกับสะพานพบว่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานเมื่อมีการสั่นแบบอิสระและค่าความเร่งสูงสุดเฉลี่ยของสะพานเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดินมีค่าเท่ากับ 3.6% และ 0.32 m/s^2 ตามลำดับ และจากการเปรียบเทียบสัญญาณการตอบสนองของโครงสร้างสามารถยืนยันความสอดคล้องของผลการทดสอบและผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลของการวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอแนวคิดใหม่สำหรับระบบควบคุมการสัน
สะท้อนด้วยมวลห่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการประยุกต์ใช้จริง
สามารถออกแบบระบบนี้ได้โดยทฤษฎีที่พัฒนาขึ้น และสามารถผลิตระบบขึ้นได้เองโดยใช้วัสดุที่
จัดหาได้ภายในประเทศทั้งหมด ทำให้ช่วยลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และด้วยเหตุ
ผลในด้านความสะดวกในการผลิตนี้ ทำให้การประยุกต์ใช้สามารถทำได้กับปัญหาที่เกิดขึ้นใน
โครงสร้างทั่วไป และสำหรับปัญหาที่มีลักษณะแตกต่างไปจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้
สามารถออกแบบและผลิตระบบมวลห่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นขึ้นได้จากการศึกษาและทดลองใน
ระบบที่ไม่ซับซ้อน

เนื้อหางานวิจัย

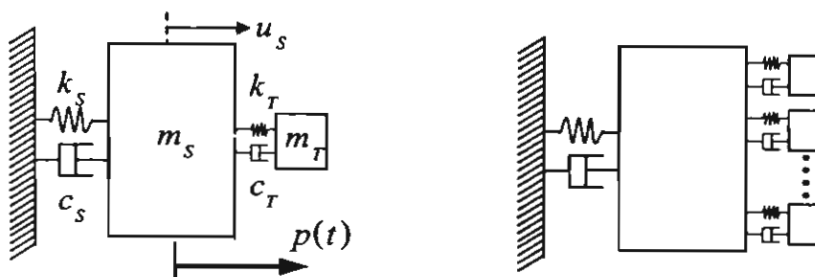
บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาเนื่องจากการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง เป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากขึ้น เช่น การสั่นสะเทือนของสะพานเมื่อรถวิ่งผ่าน การสั่นสะเทือนของสะพานลอยคนข้ามถนนเนื่องจากคนเดิน หรือการสั่นสะเทือนของพื้นในอาคารเป็นต้น ปัญหาเหล่านี้มีสาเหตุเนื่องมาจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการก่อสร้าง และการวิเคราะห์โครงสร้างที่ดีขึ้น ทำให้โครงสร้างมีขนาดเล็กลง หรือการเสื่อมกำลังของโครงสร้างตามอายุการใช้งาน ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงลดลง ผลเสียของการสั่นสะเทือนคือ ด้านความปลอดภัย (Safety) เช่นการวิบัติ (Failure) หรือการล้า (Fatigue) และด้านความสามารถในการใช้งาน (Serviceability) เช่น การเสียรูปที่มากเกินไป หรือความรู้สึก ไม่ปลอดภัยของผู้ใช้โครงสร้าง และหนึ่งในปัญหาที่ชัดเจนในขณะนี้คือ จากข้อมูลจากกรุงเทพมหานคร ทราบว่ามีสะพานลอยคนข้ามถนนประมาณกว่า 30 แห่ง และสะพานลอยสำหรับรถยนต์อีกเป็นจำนวนมากที่มีปัญหาเนื่องจากการสั่นสะเทือนนี้

ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลเสียที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้ จึงควรมีการแก้ไขโดยลดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างลง ซึ่งอาจทำได้โดย การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง หรือลดระดับความรุนแรงของแรงภายนอก อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูง และทำได้ยากในโครงสร้างที่ทำการก่อสร้างเสร็จแล้ว สำหรับอีกทางเลือกหนึ่งคือ การใช้ระบบการควบคุมการสั่นสะเทือน (Vibration control system) เพื่อลดการการสั่นสะเทือนให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ สำหรับการใช้ระบบการควบคุมการสั่นสะเทือนที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาถึง ค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ ความสะดวกในการออกแบบและผลิต รวมทั้งการบำรุงรักษา คือ ระบบมวลหน่วง (Tuned Mass Damper) หรือ TMD

รูปที่ 1 แบบจำลองของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบ TMD และ ระบบ MTMD

รูป ก) แบบจำลองโครงสร้างและระบบ TMD รูป ข) แบบจำลองโครงสร้างและระบบ MTMD



ระบบ TMD ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลักคือ มวล สปริง และตัวหน่วง ดังรูปที่ 1ก โดยทั่วไปแล้ว TMD มีขนาดเล็กกว่าโครงสร้างหลักมาก โดยมีมวลประมาณ 1-5 % ของมวลโครงสร้างหลัก และสามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการทำงานของ TMD คือ เมื่อโครงสร้างหลักเกิดการสั่นสะเทือนและต้องการสลายพลังงานออกจะทำได้โดยการติดตั้งระบบย่อยของ TMD ที่มีการปรับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยการเลือกมวลและค่าคงที่สปริงให้

เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ระบบ TMD มีการสั่นสะเทือนสอดคล้องไปกับโครงสร้างหลัก และพลังงานที่ถ่ายเทมาจากโครงสร้างหลักนี้ จะถูกสลายออกไปในรูปของแรงเสียดทาน หรือพลังงานความร้อนในตัวหน่วง (Damper) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและความมั่นคงของมวลหน่วงคือการใช้ระบบมวลหน่วงชุด (Multiple Tuned Mass Damper, MTMD) ซึ่งจะประกอบไปด้วยมวลหน่วงหลายตัวที่มีความถี่ธรรมชาติต่างๆ กันไป ดังแบบจำลองในรูปที่ 1ข

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์การใช้งานของระบบ TMD และ MTMD ในประเทศไทยมีน้อยมาก และโครงสร้างที่ใช้ระบบนี้จะอยู่ในโครงการขนาดใหญ่ เช่น สะพานพระราม 9 เป็นต้น ซึ่งค่าใช้จ่ายต่อระบบสูงมาก เนื่องจากเทคโนโลยีได้ถูกซื้อเข้ามาโดยตรงจากต่างประเทศ ดังนั้นที่มาของปัญหาของงานวิจัยนี้คือ การขาดผู้วิจัยและประยุกต์ระบบ TMD และ MTMD ให้สามารถใช้ได้จริงกับการแก้ปัญหาในโครงสร้างหลายๆประเภท ในประเทศไทย โดยสาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ ในการผลิตระบบ TMD นี้ ส่วนประกอบที่สำคัญและมีความยุ่งยากในการออกแบบและผลิตที่สุดคือตัวหน่วง โดยที่ต้องมีการออกแบบและผลิตด้วยวัสดุและอุปกรณ์พิเศษที่มีราคาสูง งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ของโครงการคือ

1. เพื่อวิจัยและพัฒนาระบบ MTMD สำหรับการแก้ปัญหการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ที่สามารถออกแบบและผลิตได้ในประเทศ ให้เหมาะสมกับ แต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการต่างๆ
2. เพื่อศึกษาแบบจำลองตัวหน่วงที่ผลิตขึ้นนี้ ถึงคุณสมบัติเชิงกายภาพ และผลต่อประสิทธิภาพรวมของระบบ MTMD
3. เพื่อพัฒนาการทำการออกแบบที่เหมาะสม (Optimum design) ของระบบ MTMD สำหรับปัญหาทั่วไปที่มีสมมุติฐานน้อยลงโดยเฉพาะปัญหาแบบไม่เชิงเส้น

วิธีการศึกษา

สำหรับภาพรวมของขั้นตอนในโครงการทั้งหมด เริ่มจากการเก็บข้อมูลและตรวจวัดโครงสร้างตัวอย่างที่จะแก้ปัญหา จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการคำนวณทางทฤษฎี และทำการทดลองเพื่อทดสอบพฤติกรรมและคุณสมบัติของตัวหุ่นแบบไม่เชิงเส้น จากนั้นนำผลไปวิเคราะห์โดยวิธีทางตัวเลขเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบมวลหุ่นแบบชุดที่มีตัวหุ่นที่นำเสนอ และเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบเบื้องต้น และเพื่อที่จะสามารถออกแบบระบบอย่างเหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงพัฒนาวิธีสำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีทางตัวเลข ในขั้นสุดท้ายคือการผลิตระบบมวลหุ่นชุดและนำไปทดสอบกับโครงสร้างจริงเพื่อตรวจสอบและปรับในขั้นสุดท้าย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการลดการสั่นสะเทือนสูงที่สุด โดยรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการมีดังนี้

1. การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหา

ในขั้นแรกเป็นการเลือกตัวอย่างของโครงสร้างที่มีปัญหาด้านการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง โดยได้ทำการติดต่อประสานงานด้านข้อมูลจาก กรุงเทพมหานคร เพื่อเลือกโครงสร้างตัวอย่าง และได้ทำการเลือกสะพานลอยคนข้ามบริเวณหน้าองค์การตลาดเพื่อเกษตรกร ถนนกำแพงเพชร เขตจตุจักร จากนั้นเดินทางไปทำการตรวจวัดปัญหาการสั่นสะเทือนที่สถานที่จริง เพื่อตรวจสอบถึงระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน ลักษณะการสั่นสะเทือน คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง เช่น มวล ค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วง โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดทางด้านพลศาสตร์ ได้แก่

- 1.) Accelerometer IMV รุ่น VP-7002
- 2.) Dynamic Strain Amplifier IMV รุ่น VM-7002/n
- 3.) Data Acquisition Card NI รุ่น DAQ Card 1200
- 4.) Computer Notebook

นอกจากนั้น ได้ทำการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการเดินทางของคน เช่น ความเร็ว ความถี่ของการก้าว ความยาวก้าว และ ความน่าจะเป็นของการมาใช้สะพานที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อคำนวณและตรวจสอบค่าคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง และสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ เพื่อกำหนดแนวทางในการแก้ไขปัญหา สำหรับขั้นตอนต่อไป

2. การทดสอบคุณสมบัติของระบบตัวหน่วง

ในขั้นตอนนี้ เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของระบบตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น ที่สร้างขึ้นใหม่เพื่อใช้แทนตัวหน่วงแบบเชิงเส้น ที่ใช้ในทฤษฎีการออกแบบของ TMD เนื่องจากตัวหน่วงแบบเชิงเส้น นี้มีราคาแพงมากและผลิตในต่างประเทศเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพยายามประดิษฐ์ระบบทดแทนตัวหน่วงแบบเชิงเส้น โดยใช้ชุดอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยของเหลวชนิดต่างๆ และการเคลื่อนที่ของแผ่นหน้าตัดบางที่มีขนาดต่างๆผ่านของเหลวนั้น โดยทำการทดลองประกอบกับความรู้ทางทฤษฎี Fluid Dynamics เพื่อเลือกรูปปร่างหน้าตัดให้เหมาะสม และหาความสัมพันธ์ของแรงที่ต้านการเคลื่อนที่หรือแรงหน่วงกับความเร็วของอุปกรณ์ชุดที่เลือกใช้นี้ ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบ TMD ที่เหมาะสม ในขั้นต่อไป

การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติและพฤติกรรมของตัวหน่วงโดยทำการทดลองกับตัวหน่วงแบบของเหลวเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ออกแบบมวลหน่วงที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

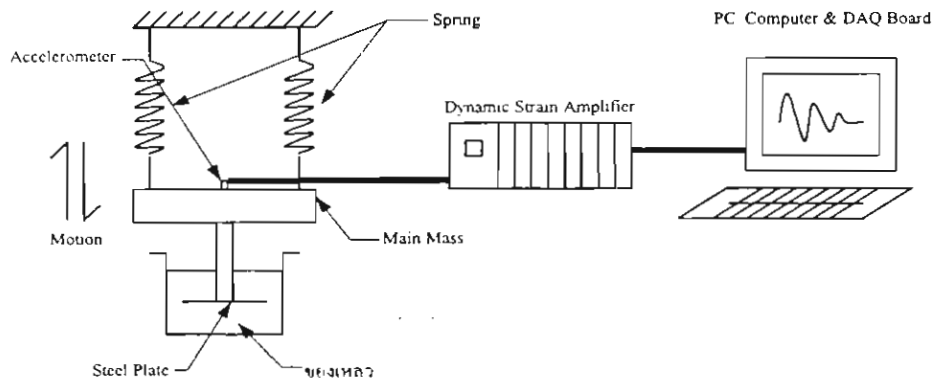
ระบบตัวอย่างที่ใช้ในการทำการทดลองเป็นระบบที่มีดีกรีแห่งความอิสระเท่ากับหนึ่ง (SDOF) แสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วย

- 1.) โครงเหล็กสำหรับยึดระบบ
- 2.) มวลขนาด 9.86 kg
- 3.) สปริงที่มุมทุกมุมซึ่งมีค่าสติฟเนสรวมเท่ากับ 1425 N/m ซึ่งทำให้ระบบมีค่าความถี่ธรรมชาติประมาณ 2 Hz
- 4.) แผ่นเหล็กบางที่มีขนาดหน้าตัดต่างๆ
- 5.) ของเหลวประเภทต่างๆ ได้แก่ น้ำ Glycerin, Silicone Oil Grade 500 และ Silicone Oil Grade 1000

พร้อมทั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) Accelerometer NEC รุ่น GB100B
- 2.) Dynamic Strain Amplifier NEC รุ่น AH1100
- 3.) Data Acquisition Board NI รุ่น BNC-2090
- 4.) Computer

รูปที่ 2
ระบบทดลองและอุปกรณ์การตรวจวัด



ทำการทดลองโดยกำหนดให้ระบบมีการเสียรูปเริ่มต้น ประมาณ 3 cm แล้วปล่อยให้ระบบมีการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) ทำการตรวจวัดสัญญาณความเร่งในการสั่นของระบบที่เวลาต่างๆ และบันทึก จากนั้นแปลงสัญญาณความเร่งเป็นการเสียรูป และเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีคุณสมบัติความหน่วงแบบต่างๆ ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นด้วยวิธีทางตัวเลข (Numerical Method) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหารูปแบบของความไม่เชิงเส้น และค่าความหน่วงแบบไม่เชิงเส้น แล้วทำการทดลองซ้ำอีกโดยเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของแผ่นเหล็กบางและชนิดของของเหลวเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการหน่วงกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วในการสั่น ขนาดหน้าตัดของแผ่นเหล็กบางที่ใช้ในตัวหน่วง และชนิดของของเหลวที่ใช้ในตัวหน่วง

3. การศึกษาประสิทธิภาพของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น

จากแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 1 นำมาใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น ตัวหน่วงที่ได้นำเสนออยู่นั้นอยู่ในรูปแบบที่ง่ายในการผลิตแต่คุณสมบัติไม่เชิงเส้นของตัวหน่วงที่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีของมวลหน่วงที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของระบบมวลหน่วงได้ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองของมวลหน่วงที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจึงต้องใช้วิธีทางตัวเลขแทน จากสมมติฐานและผลการวิจัยในขั้นแรกสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงหน่วง f_D และความเร็วในการเคลื่อนที่ $\dot{u}$ ได้ดังนี้

$$f_D = c_T \dot{u}^2 \quad (1)$$

โดยที่ c_T คือค่าคงที่ของระบบที่ขึ้นกับคุณสมบัติของเหลวและหน้าตัด เมื่อพิจารณาทิศทางของแรงหน่วงด้วยในสภาพสมดุล สมการที่ 1 จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$f_D = c_T |\dot{u}| \dot{u} \quad (2)$$

จากแรงหน่วงแบบไม่เชิงเส้น หากพิจารณาสมดุลแบบพลวัตของระบบมวลหน่วงที่มีระดับของความอิสระเท่ากับหนึ่ง จะได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$m_T \ddot{u}_T(t) + k_T u_T(t) + c_T |\dot{u}_T(t)| \dot{u}_T(t) = p_T(t) \quad (3)$$

โดยที่ m_T คือ มวลของมวลหน่วง และ $\ddot{u}_T(t), \dot{u}_T(t), u_T(t)$ คือ ความเร่ง ความเร็ว และการเสียรูปของระบบมวลหน่วงตามลำดับ $p_T(t)$ คือแรงภายนอกที่กระทำต่อมวลหน่วง จากระบบโครงสร้างที่มีมวล m_S สติฟเนส k_S และความหน่วง c_S ติดตั้งด้วยระบบมวลหน่วง และมวลหน่วงชุด จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ในรูปเมทริกซ์ขนาด $(n+1) \times (n+1)$ โดยที่ n คือ จำนวนของมวลหน่วงชุด ดังนี้

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{C}(t)\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{P}(t) \quad (4)$$

โดยที่ เวกเตอร์ $\mathbf{u}$ คือเวกเตอร์ของการเสียรูปที่ประกอบด้วย การเสียรูปของโครงสร้าง และการเสียรูปของระบบมวลหน่วง u_{Ti} ($i=1,2,\dots,n$) และ เวกเตอร์ $\mathbf{P}(t)$ คือการแรงภายนอก โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูป

$$\mathbf{u} = [u_S, u_{T1}, u_{T2}, \dots, u_{Tn}]^T \quad (5)$$

และ

$$\mathbf{P}(t) = [p(t), 0, 0, \dots, 0]^T \quad (6)$$

เมทริกซ์ของมวล $\mathbf{M}$ สติฟเนส $\mathbf{K}$ และ ความหน่วง $\mathbf{C}(t)$ จะอยู่ในรูป

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_S & & & & \\ & m_{T1} & & & \\ & & m_{T2} & & \\ & & & \dots & \\ & & & & m_{Tn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_S + \sum_{i=1}^n k_{Ti} & -k_{T1} & -k_{T2} & \dots & -k_{Tn} \\ -k_{T1} & k_{T1} & 0 & \dots & 0 \\ -k_{T2} & 0 & k_{T2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -k_{Tn} & 0 & 0 & \dots & k_{Tn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

และ

$$\mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} c_S + \sum_{i=1}^n c_{Ti}|\dot{u}_{Ti} - \dot{u}_S| & -c_{T1}|\dot{u}_{T1} - \dot{u}_S| & -c_{T2}|\dot{u}_{T2} - \dot{u}_S| & \dots & -c_{Tn}|\dot{u}_{Tn} - \dot{u}_S| \\ -c_{T1}|\dot{u}_{T1} - \dot{u}_S| & c_{T1}|\dot{u}_{T1} - \dot{u}_S| & 0 & \dots & 0 \\ -c_{T2}|\dot{u}_{T2} - \dot{u}_S| & 0 & c_{T2}|\dot{u}_{T2} - \dot{u}_S| & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_{Tn}|\dot{u}_{Tn} - \dot{u}_S| & 0 & 0 & \dots & c_{Tn}|\dot{u}_{Tn} - \dot{u}_S| \end{bmatrix} \quad (9)$$

จากสมการการเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ในรูปเมทริกซ์และมีคุณสมบัติไม่เชิงเส้น การหาคำตอบในลักษณะเชิงวิเคราะห์ (Analytical Solution) อาจทำไม่ได้ หรืออยู่ในรูปที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ ดังนั้นจึงใช้การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีทางตัวเลข โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

แบบจำลองของระบบมวลหน่วง

ระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดที่ใช้ศึกษาจะใช้แบบจำลองของตัวหน่วงที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นและแบบจำลองของตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังนี้

$$\mu = \frac{m_T}{m_S} \quad (10)$$

$$\gamma_i = \frac{\omega_{Ti}}{\omega_S} \quad (11)$$

$$\xi_i = \frac{c_{Ti}}{2m_{Ti}\omega_{Ti}} \quad (12)$$

โดยที่ $i = 1$ สำหรับมวลหน่วงแบบตัวเดียว ส่วนมวลหน่วงชุดกำหนดใช้จำนวน 6 ตัว ดังนั้น $i = 1, 2, \dots, 6$ รายละเอียดสำหรับระบบที่ใช้ตัวหน่วงแบบเชิงเส้นมีดังนี้

มวลหน่วงแบบตัวเดียวใช้ $\mu = 0.01$ ส่วนค่า γ และ ξ ใช้ค่าที่เหมาะสมที่จากเกณฑ์การออกแบบมวลหน่วงที่เหมาะสมเมื่ออัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างมีค่าน้อยมาก

ในกรณีของมวลหน่วงชุดนั้นเนื่องจากมีตัวแปรจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องตั้งสมมติฐานเพิ่มเติม คือ ค่าสติฟเนส k_T ของมวลหน่วงแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 4791 N/m สำหรับค่า γ_i กำหนดให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอด้วยช่วงกว้าง $\Delta\gamma$ และมีค่าอัตราส่วนความถี่กลางช่วงเท่ากับ γ_0 และค่าอัตราส่วนความหน่วงของตัวหน่วงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ξ ดังนั้นค่าที่จะใช้วิธีลองผิดลองถูกในการคำนวณหา คือ ค่า $\Delta\gamma$, γ_0 และ ξ ที่เหมาะสม

สำหรับมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นจะใช้ค่าคงที่ c_T แทนการใช้ค่า ξ เพื่อความสะดวกในการคำนวณนอกเหนือจากค่าตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้สมมติฐานและวิธีการคำนวณหาวิธีเดียวกันกับมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบเชิงเส้น

การพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นจะพิจารณาถึงความสามารถในการลดค่าตัวคูณขยายทางพลวัต (DMF) ของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบมวลหน่วง และพิจารณาถึงความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ (Sensitivity) เมื่อมีความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ของโครงสร้างและแรงกระทำภายนอก

และออกแบบมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นให้มีคุณสมบัติและค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งสามารถผลิตได้ง่าย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับมวลหน่วงชุดแบบเชิงเส้นด้วยวิธีการดังกล่าว เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมการใช้งานจริงในขั้นตอนการวิจัยขั้นต่อไป

4. การเลือกระบบ TMD ที่เหมาะสม (Optimal Design)

หลังจากทราบข้อมูลพื้นฐานของปัญหาและคุณสมบัติของระบบตัวหน่วง ที่สร้างขึ้นใหม่นี้ พบว่าขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของระบบมวลหน่วงนั้นเกี่ยวข้องกับตัวแปร 3 ชุด ซึ่งการเลือกค่าที่เหมาะสมจากการลองผิดลองถูกนั้นจะใช้เวลานานมาก ดังนั้นจะทำการออกแบบระบบ TMD ที่เหมาะสมโดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Optimization) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานดังนี้

4.1) การหาค่าตอบของระบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธี Perturbation

ซึ่งในการวิจัยนี้ เลือกวิธีที่เหมาะสมสำหรับปัญหา Nonlinear Damping ภายใต้แรงกระทำแบบ Harmonic นั่นคือวิธี Method of Averaging

ในการศึกษาทฤษฎี The Method of Averaging นี้จะเริ่มต้นจากการกำหนดสมการความสัมพันธ์ของระบบ TMD แบบเชิงเส้นโดยไม่มีแรงภายนอก ในรูปของ

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u = \mathcal{F}(u, \dot{u}) \quad (13)$$

ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการการเคลื่อนที่ที่มีความถี่เชิงมุม ω_0 ภายใต้แรงภายนอก $\mathcal{F}$ ที่เป็นฟังก์ชันกับการจัด u และความเร็ว $\dot{u}$ โดยที่ให้ ε เป็นค่าคงที่ที่มีค่าน้อย ๆ ค่าตอบจะอยู่ในรูปของ

$$u = a \cos(\omega_0 t + \beta) = a \cos \phi \quad (14)$$

เมื่อ a คือแอมพลิจูดของคำตอบ และ $\phi = \omega_0 t + \beta$ แลทำการหาอนุพันธ์สมการ (14) จะได้ว่า

$$\dot{u} = -\omega_0 a \sin \phi \quad (15)$$

เมื่อพิจารณาค่า a และ β แปรผันตามเวลาและทำการหาอนุพันธ์สมการ (14) จะได้ว่า

$$\dot{u} = -\omega_0 a \sin \phi + \dot{a} \cos \phi - a \dot{\beta} \sin \phi \quad (16)$$

เปรียบเทียบสมการ (15) และ (16) จะได้ว่า

$$\dot{a} \cos \phi - a \dot{\beta} \sin \phi = 0 \quad (17)$$

เมื่อพิจารณาค่า a และ β แปรผันตามเวลาและทำการหาอนุพันธ์สมการ (15) จะได้ว่า

$$\ddot{u} = -\omega_0^2 a \cos \phi - \omega_0 \dot{a} \sin \phi - \omega_0 a \dot{\beta} \cos \phi \quad (18)$$

นำค่า $\dot{u}$ และ $\ddot{u}$ จาก สมการ (16) และ (18) แทนลงในสมการ (13) จะได้ว่า

$$\omega_0 \dot{a} \sin \phi + \omega_0 a \dot{\beta} \cos \phi = -\epsilon f(a \cos \phi, -\omega_0 a \sin \phi) \quad (19)$$

จากสมการ (17) และ (19) จะหาความสัมพันธ์ของ $\dot{a}$ และ $\dot{\beta}$ ได้คือ

$$\dot{a} = -\frac{\epsilon}{\omega_0} \sin \phi f(a \cos \phi, -\omega_0 a \sin \phi) \quad (20)$$

$$\dot{\beta} = -\frac{\epsilon}{\omega_0 a} \cos \phi f(a \cos \phi, -\omega_0 a \sin \phi) \quad (21)$$

เมื่อสมมติ $\dot{a}$ และ $\dot{\beta}$ มีค่าน้อยทำให้สามารถแสดงสมการ (20) และ (21) ได้ใหม่ คือ

$$\dot{\alpha} = -\frac{\varepsilon}{2\pi\omega_0} \int_0^{2\pi} \sin \phi f(a \cos \phi, -\omega_0 a \sin \phi) d\phi \quad (22)$$

$$\dot{\beta} = -\frac{\varepsilon}{2\pi\omega_0 a} \int_0^{2\pi} \cos \phi f(a \cos \phi, -\omega_0 a \sin \phi) d\phi \quad (23)$$

จากสมการ (22) และ (23) จะสามารถหาค่าแอมพลิจูดของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำได้ ทำให้สามารถหาค่าความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent Damping) ในรูปแบบของค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น จากนั้นทำการศึกษาระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำแบบ Harmonic โดยอาศัยทฤษฎี The Method of Averaging ต่อไป

4.2) การหาแรงภายนอกที่มีผลต่อค่า Damping ของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น

สำหรับระบบโครงสร้างและระบบ MTMD ที่เป็นระบบ Multi Degree-of-Freedom ภายใต้แรงภายนอกกระทำแบบ Harmonic นั้นเริ่มการพิจารณาเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้นกับระบบ TMD แบบเชิงเส้น จากสมการแสดงค่าแอมพลิจูด ที่สภาวะ Steady-State ของระบบ TMD แบบเชิงเส้น และสมการแสดงค่าแอมพลิจูด ที่สภาวะ Steady-State ของระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้น จากวิธี The Method of Averaging และทำการเปรียบเทียบโดยสมมติว่าแอมพลิจูดของระบบมวลหน่วงแบบเชิงเส้นและ ระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นมีค่าเสมือนเท่ากัน จากการพิจารณาดังกล่าวพบว่าค่า Equivalent Damping ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของ TMD เพียงอย่างเดียวยังมีผลของแรงภายนอกมาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาหาแรงภายนอกที่มีผลต่อค่า Equivalent Damping ของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้นต่อไป

เมื่อทำการศึกษาระบบที่ประกอบด้วยโครงสร้างและ TMD นั้น ในการที่จะหาค่า Equivalent Damping ของ TMD แบบไม่เชิงเส้นนั้น จะต้องทราบขนาดของแรงที่กระทำต่อระบบ TMD ด้วย แต่เนื่องจากไม่สามารถคำนวณหาขนาดของแรงที่แน่นอนได้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการประมาณโดยพิจารณาว่าแรงที่กระทำต่อระบบ TMD นั้นมีค่าเป็นสัดส่วนอย่างไรเมื่อเทียบกับแรงภายนอกที่มากระทำต่อโครงสร้างดังสมการ (24)

$$f_i = a_i p_0 \quad (24)$$

โดยที่ f_i คือสัดส่วนของแรงภายนอกที่มีผลต่อ TMD ตัวที่ i , a_i คือค่าคงที่และ p_0 คือขนาดของแรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ โดยอาศัยการเปรียบเทียบกราฟ DMF ของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งหาได้จากทฤษฎี Step by Step Integration กับกราฟ DMF ที่ได้จากการคำนวณโดยสมการของ Equivalent Damping แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ a_i จน

ได้ค่าที่ทำให้กราฟทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งการทำงานในกระบวนการนี้จะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการหาค่าส่วนประกอบที่เหมาะสม

4.3) ออกแบบระบบ TMD ที่เหมาะสมโดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Optimization)

จากระบบที่อยู่ในรูปที่มีความหน่วงเทียบเท่า จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ MTMD ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสม (Objective Function) สำหรับการศึกษาครั้งนี้คือ ลดค่าตัวคูณขยายทางพลวัต (Dynamic Magnification Factor, DMF) ให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ J_d

ในปัญหาจะจัดรูปแบบพารามิเตอร์ที่สนใจศึกษาให้อยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \quad (25)$$

ซึ่งสำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้ เวกเตอร์ $\mathbf{X}$ คือชุดพารามิเตอร์ของ MTMD ประกอบด้วย ค่ามวลหรือสปริงสติฟเนส และค่าความหน่วง โดยให้ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ อยู่ในรูปของ $f(\mathbf{X})$ เพราะฉะนั้น J_d ของระบบก็คือ ค่า $f(\mathbf{X})$ และทำการหาค่าพารามิเตอร์ $\mathbf{X}$ ที่ทำให้ค่า J_d ต่ำที่สุด ต่อไป

ในการศึกษากระบวนการ Optimization นี้จะอาศัยวิธี Cubic Interpolation Method และ Davidon-Fletcher-Powell Method

ผลที่ได้สำหรับขั้นตอนการวิจัยนี้ คือ ชุดของค่ามวล ความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วง ที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ลดปัญหาการสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

5. การผลิตระบบ TMD และทดสอบประสิทธิภาพ

เมื่อได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีแล้ว จะนำมาใช้ในการออกแบบของแต่ละชิ้นส่วนของระบบ TMD อย่างละเอียดโดยพิจารณาถึงหน้าที่ ลักษณะการทำงานของแต่ละชิ้นส่วน และค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้มาจากผลการวิเคราะห์ในขั้นที่ 3 จากนั้นทำการผลิตโดยประกอบให้เป็นระบบ และนำไปติดตั้งกับโครงสร้างตัวอย่างและทำการทดสอบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของ TMD จริง โดยสามารถมีการปรับแก้ค่าความถี่ธรรมชาติเล็กน้อยในขั้นสุดท้าย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ

ผลการศึกษา

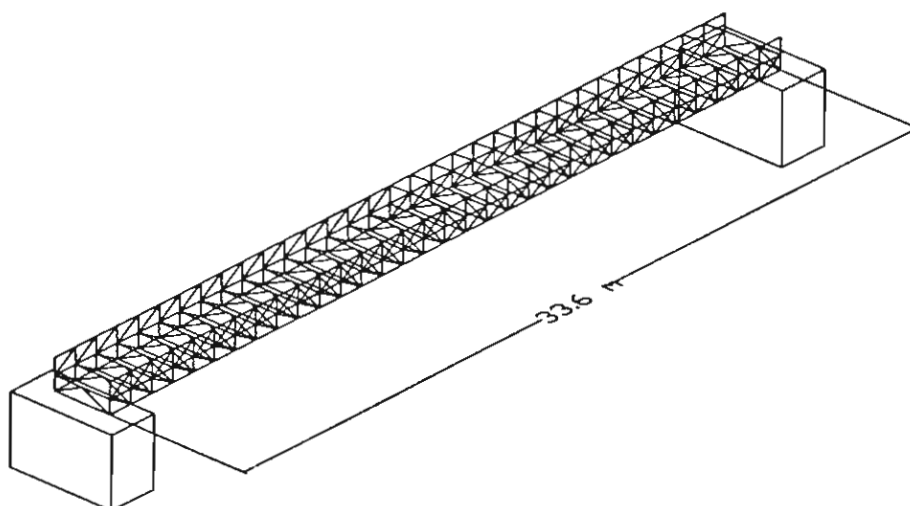
ผลการศึกษาโดยภาพรวมแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ตามขั้นตอนการศึกษา คือ การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหา ได้ทำการตรวจวัดสภาพปัญหาของโครงสร้างของสะพานลอยคนข้ามถนนและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป การทดสอบคุณสมบัติของระบบตัวหน่วง เป็นงานในห้องปฏิบัติการ ได้ดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติของแรงหน่วงโดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบ การศึกษาประสิทธิภาพของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น และการเลือกระบบ TMD ที่เหมาะสม เป็นงานด้านการสร้างแบบจำลองโดยคอมพิวเตอร์ ได้ดำเนินการทำการคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของระบบและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และการผลิตระบบ TMD และทดสอบประสิทธิภาพเป็นงานด้านการปฏิบัติที่หน้างาน และทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบเพื่อการใช้งานจริง

1. การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหา

ได้มีการเลือกโครงสร้างสำหรับตัวอย่างศึกษา โดยทราบในเบื้องต้นว่า สะพานลอยคนข้ามบริเวณหน้าองค์การตลาดเพื่อเกษตรกร ถนนกำแพงเพชร เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร มีปัญหาการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเดินของคนอย่างค่อนข้างรุนแรง จึงได้ทำการตรวจวัดสภาพปัญหาของโครงสร้างดังกล่าว การตรวจวัดการสั่นสะเทือนนี้ใช้เครื่องมือประกอบด้วย Accelerometer, อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Strain Amplifier) และชุดบันทึกข้อมูล ประเภทของการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดนี้คือ การสั่นแบบอิสระ เพื่อเก็บข้อมูลในการวิเคราะห์หาค่าคงที่ของระบบโครงสร้าง และการสั่นเนื่องจากแรงภายนอกของคนเดิน เพื่อตรวจวัดระดับความรุนแรงเพื่อใช้ในการออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของระบบ TMD ต่อไป

จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม การดำเนินการขั้นต่อไป คือการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของสะพาน และลักษณะปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพาน การวิเคราะห์โดยหลักพลศาสตร์โครงสร้าง และจากการคำนวณจากลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างพบว่า สะพานเป็นโครงสร้างเหล็กช่วงเดียว มีความยาวช่วง 33.6 เมตร มวลรวมของสะพานประมาณ 37 ตัน และมวลประจำ Mode พื้นฐานประมาณ 18.5 ตัน ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานเท่ากับ 2.00 Hz. อัตราส่วนความหน่วงมีค่าน้อยมาก ประมาณ 0.005 และคำนวณค่าสตีเฟนส์ได้ประมาณ 2.92 MN/m ซึ่งการวิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับ การคำนวณด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ทาง Finite Element Method ซึ่งมีลักษณะโครงถักหลักสำหรับโครงสร้างของสะพานแสดงดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 โครงถักเหล็กของสะพานลอยคนข้ามบริเวณหน้าองค์การตลาดเพื่อเกษตรกร



ลักษณะของการสั่นสะเทือนเนื่องจากคนเดินข้ามที่ตรวจวัดได้เป็นการสั่นในแนวดิ่ง โดยความถี่ของการสั่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของโครงสร้าง โดยมีระดับความรุนแรงของการสั่นคือ มีค่าความเร่งสูงสุดมากกว่า 0.04 g ซึ่งเกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานสำหรับระดับของความรู้สึกของผู้ใช้

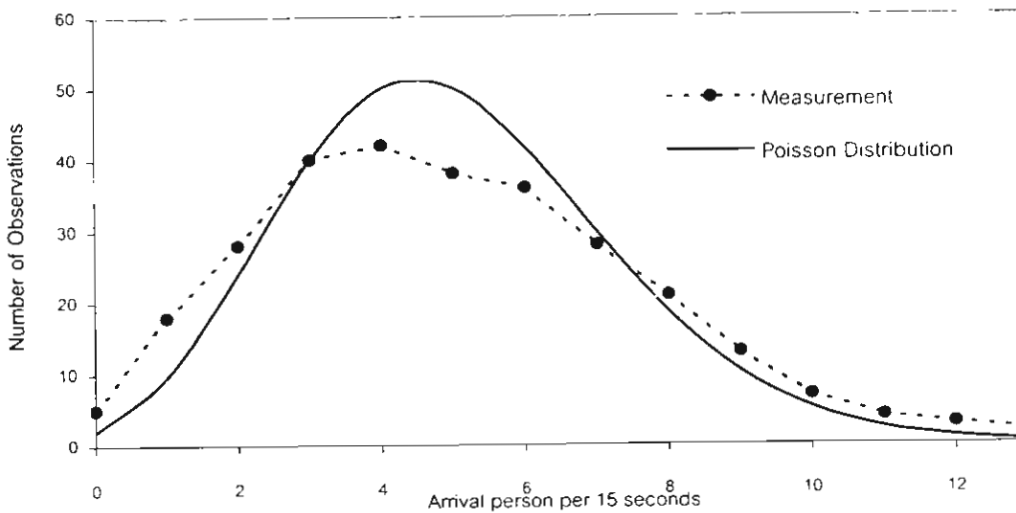
นอกจากนั้น ได้ทำการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการเดินทางของคน เช่น ความเร็ว ความถี่ของการก้าว ความยาวก้าว และ ความน่าจะเป็นของการมาใช้สะพานที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง มีผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พฤติกรรมการเดินของคน

ความเร็ว	1.11 m/s
ความถี่ของการก้าว	1.83 Hz
ความยาวก้าว	0.61 m

สำหรับความน่าจะเป็นของการมาใช้สะพานที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง ได้ทำการตรวจวัดจำนวนของผู้ที่มาใช้สะพานในช่วงเวลา 15 วินาที ผลพบว่า การกระจายตัวของจำนวนของผู้ที่มาใช้สะพานมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบ Poisson ซึ่งเป็นการกระจายตัวที่ใช้อธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยที่ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ใดๆจะไม่ขึ้นกับการเกิดเหตุการณ์อื่นๆ ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 4 และพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนของผู้ที่มาใช้สะพานในช่วงเวลา 15 วินาทีคือ 5 คน

รูปที่ 4 จำนวนของผู้ที่ใช้สะพานในช่วงเวลา 15 วินาที



จากผลการตรวจวัดพฤติกรรมคนเดินของคนที่ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับแรงภายนอก $p(t)$ ตามสมการที่ 6 ของ โดยเริ่มจากการพิจารณาแรงเนื่องจากคนเดิน 1 คน สามารถเขียนอยู่ในรูป Fourier Series ดังนี้

$$p(t) = \sum_{j=1}^N G \alpha_j \sin(2\pi j f_p t - \phi_j) \quad (26)$$

โดยที่ G = น้ำหนักของคน 1 คน (ในการวิจัยนี้ใช้ค่า 600 N)

α_j = Fourier coefficient of the j -th harmonic

f_p = pacing rate (Hz)

ϕ_j = phase lag of the j -th harmonic relative to the 1st harmonic

N = total number of contributing harmonics

หากพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบ Harmonic ลำดับที่ 1 เท่านั้นจะได้ว่า $\alpha_1 = 0.4$ และแบบจำลองของแรงภายนอกที่ทำการรวมผลของคนเดินมากกว่าหนึ่งคน จะสามารถประมาณค่าตัวประกอบที่ใช้คูณเพิ่มนี้ด้วยค่ารากที่สองของจำนวนคนที่มีอยู่บนโครงสร้างสะพาน ณ เวลาขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งในที่นี้สามารถประมาณจากค่า ความยาวของสะพาน ความเร็วในการเดินของคน และค่าเฉลี่ยของจำนวนของผู้ที่ใช้สะพานในช่วงเวลา 15 วินาที ซึ่งจะประมาณได้ว่าจำนวนคนที่มีอยู่บนโครงสร้างสะพาน ณ เวลาขณะใดขณะหนึ่ง เท่ากับ 10 คน จากนั้น พิจารณาตัวประกอบเพื่อความปลอดภัยเพื่อใช้เพิ่มค่าประมาณของแรงขึ้น 20 % ในที่สุด จะได้แบบจำลองของแรงภายนอกดังนี้

$$p(t) = 900 \sin(2\pi f_p t) \text{ N} \quad (27)$$

แรงภายนอกในสมการที่ (27) จะใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป โดยค่าความถี่ของการเดิน f_p จะใช้ช่วงของความถี่ในการเดินปกติคือ $1.6 \text{ Hz} \leq f_p \leq 2.4 \text{ Hz}$

2. การทดสอบคุณสมบัติของระบบตัวหน่วง

จากวิธีการทดลองที่กล่าวในขั้นตอนการศึกษา จะสามารถตรวจวัดและบันทึกสัญญาณความเร่งของระบบที่เวลาต่างๆ และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบกราฟจากผลการทดลองกับกราฟจากการจำลองระบบพบว่าแรงหน่วงที่เกิดขึ้นในระบบมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ยกกำลังสอง ($f_D \propto \dot{u}^2$) อย่างไรก็ตามที่ช่วงเวลาที่มากขึ้นและความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบลดลง จะเกิดความแตกต่างขึ้นในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นในรูปกำลังสอง และความแตกต่างจะยิ่งมากขึ้นเมื่อความเร็วยิ่งลดน้อยลง

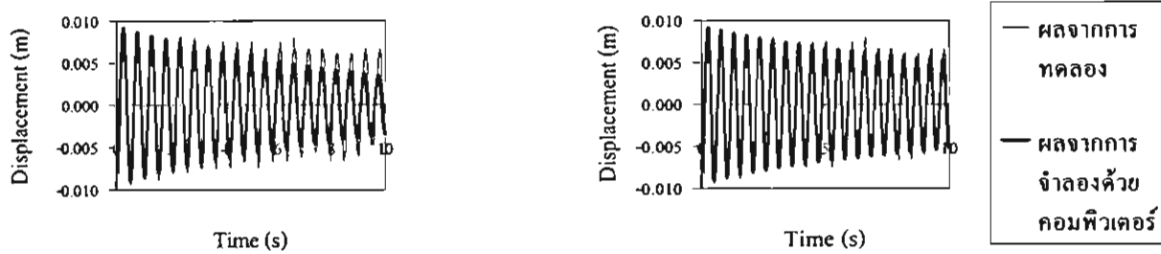
จากการศึกษาทฤษฎีแรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหล พบว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในของไหลจะเกิดแรงต้านซึ่งมีขนาดเท่ากับ

$$f_D = f_d(A, \rho, \dot{u}^2) + f_\mu(a, \mu, \dot{u}) \quad (28)$$

โดย f_D คือแรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหล, $f_d(A, \rho, \dot{u}^2)$ คือแรงต้านในรูปแรงลาก (Drag Force) ที่เป็นผลมาจากความเร็วยกกำลังสอง พื้นที่หน้าตัดของวัตถุและความหนาแน่นของของไหล $f_\mu(a, \mu, \dot{u})$ คือแรงต้านที่มีผลมาจากความเร็วและความหนืดของของไหล A และ a คือคุณสมบัติของหน้าตัดของวัตถุ ρ คือความหนาแน่นของของไหล μ คือความหนืดของของไหล และ $\dot{u}$ คือความเร็วของวัตถุ

รูปที่ 5

การเปรียบเทียบกราฟจากการทดลองกับกราฟจากการจำลองระบบ



(a) การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองตัวหน่วงที่มีคุณสมบัติเชิงเส้น

(b) การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองตัวหน่วงที่มีคุณสมบัติไม่เชิงเส้น

เมื่อพิจารณาหน้าตัดของตัวหน่วงที่เคลื่อนที่ในของเหลวแล้ว หน้าตัดมีลักษณะเป็นแผ่นบางและการเคลื่อนที่ของหน้าตัดของตัวหน่วงเกิดในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด จากสมการที่ 28 และทฤษฎีแรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหล พบว่าแรงต้านที่มีผลจากความเร็วและความหนืดของของเหลว ($f_\mu(a, \mu, \dot{u})$) จะเป็นฟังก์ชันของพื้นที่หน้าตัดในแนวนอนกับการเคลื่อนที่ และแรงลากที่มีผลมาจากความเร็วกำลังสองและความหนาแน่นของของเหลว ($f_d(A, \rho, \dot{u}^2)$) จะเป็นฟังก์ชันของพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการที่ 28 จะลดรูปลงเหลือแรงลากเพียงพจน์เดียวดังสมการที่ 29 และกล่าวได้ว่าแรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของเหลวจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ยกกำลังสอง, ความหนาแน่นของของเหลว และ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

$$f_D = f_d(A, \rho, \dot{u}^2) \quad (29)$$

ดังนั้นแรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของเหลวจะอยู่ในรูป

$$f_D = \frac{1}{2} C_d \rho A \dot{u}^2 \quad (30)$$

โดยที่ C_d คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลาก และสามารถสรุปได้ว่าตัวหน่วงแบบของเหลวจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วในการสั่นเป็นแบบกำลังสองดังนี้

$$f_D = c_T \dot{u}^2 \quad (31)$$

โดยที่

$$c_T = \frac{1}{2} C_d \rho A \quad (32)$$

จากสมการที่ 32 จะเห็นได้ว่ นอกจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c_T) ของตัวหน่วงขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของตัวหน่วงและความหนาแน่นของเหลวแล้ว ยังขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก (C_d) ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วง จึงทำการแปรผันขนาดหน้าตัดของตัวหน่วงและชนิดของของเหลวในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 และเมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง c_T กับ A ของของเหลวชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟไม่เป็นเส้นตรง จึงอาจกล่าวได้ว่า มีตัวแปรอื่นที่มีผลต่อค่า c_T ด้วย นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก (C_d)

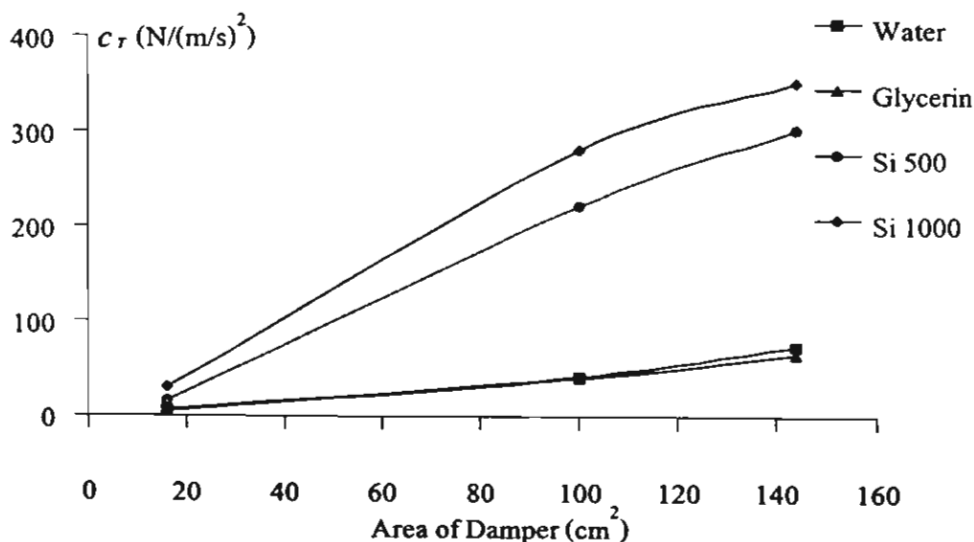
ตารางที่ 2

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเมื่อทำการแปรผันขนาดหน้าตัดและชนิดของของเหลว

ชนิดของเหลว (ความหนาแน่น)	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขนาดหน้าตัด (cm ²)		
	16	100	144
น้ำ (988 kg/m ³)	6	41.5	72.5
Glycerin (1260 kg/m ³)	5.5	40	64.75
Silicon Oil เกรด 500 (971 kg/m ³)	16	220	300
Silicon Oil เกรด 1000 (971 kg/m ³)	30	280	350

รูปที่ 6

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า c_T กับ A ของของเหลวชนิดต่างๆ



จากทฤษฎีแรงที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหล ค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก (C_d) มีความสัมพันธ์กับ Reynolds number (R) โดยที่

$$R = \frac{\dot{U}D}{\nu} \quad (33)$$

โดยที่ $\dot{U}$ คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ, D คือ ขนาดของวัตถุในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ และ ν คือ ค่าความหนืดทางจลน์ ของของไหล

ทำการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแต่ละค่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก (C_d) โดยคิดจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 32 และหา Reynolds number (R) ของแต่ละค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง ด้วยสมการที่ 33 โดยใช้ความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

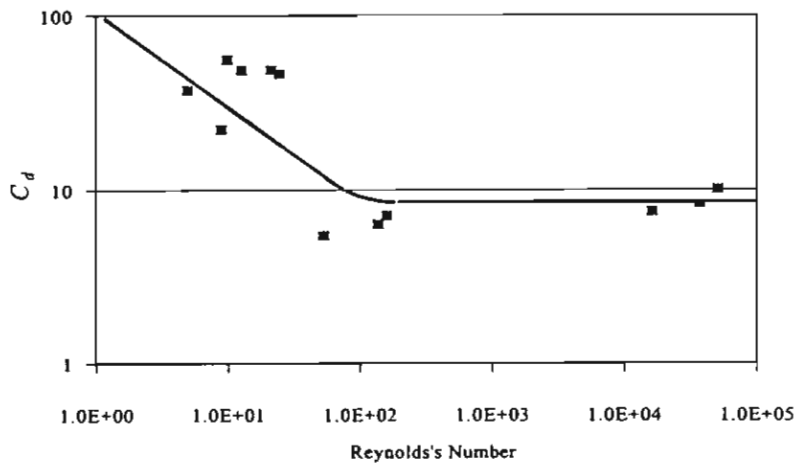
ตารางที่ 3
ค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก และ Reynolds number

Area (cm ²)	Reynolds Number			Damping Coefficient (c_T)			C_d		
	16	100	144	16	100	144	16	100	144
Water	16233.8	37135.3	50830.4	6.0	41.5	72.5	7.5	8.3	10.1
Glycerin	52.7	136.0	158.9	5.5	40.0	64.8	5.5	6.4	7.1
Silicone Oil Grade 500	8.9	21.2	24.5	16.0	220.0	300.0	22.3	49.0	46.4
Silicone Oil Grade 1000	4.9	9.9	12.6	30.0	280.0	350.0	37.6	56.1	48.7

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_d กับ R ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัตถุที่วางอยู่ในของไหล กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_d กับค่า R ซึ่งกล่าวไว้แล้วในทฤษฎีแรงที่กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหล ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่า c_T ของตัวหน่วงแบบของเหลวขึ้นกับขนาดหน้าตัดของตัวหน่วง ของเหลวที่ใช้ในตัวหน่วงและความเร็วสูงสุดในการสั่นซึ่งเป็นผลมาจากค่าการเสียดรูปเริ่มต้นของตัวหน่วงนั่นเอง

รูปที่ 7

ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และ ค่าสัมประสิทธิ์แรงลากของตัวหน่วง



สามารถอธิบายความแตกต่างที่เกิดขึ้นในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่าได้ว่า เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ลดน้อยลงจะส่งผลให้ค่า Reynolds number (R) มีขนาดลดน้อยลงตามไปด้วย และจากรูปที่ 7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก (C_d) เมื่อ R มีค่าน้อย ค่า (C_d) จะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วง (c_T) มีค่าเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นไปด้วย ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า c_T ทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นในการเปรียบเทียบ แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นน้อยมากในช่วงเวลาที่พิจารณา จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวหน่วงแบบของเหลวมีพฤติกรรมการหน่วงแบบไม่เชิงเส้นยกกำลังสอง

3. การศึกษาประสิทธิภาพของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น

จากคุณสมบัติของตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้น แบบจำลองของโครงสร้าง แรงกระทำภายนอก และมวลหน่วงจะสามารถแสดงค่าตัวแปรในการออกแบบระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น และประสิทธิภาพของมวลหน่วงในการแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างได้ดังต่อไปนี้

3.1 ประสิทธิภาพของมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดในการแก้ปัญหการสั่นสะเทือน

ค่าตัวแปรที่เหมาะสมของระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดสำหรับโครงสร้างตัวอย่างสามารถคำนวณได้โดยการใช้วิธี Numerical optimization โดยใช้เงื่อนไขที่ทำให้ตัวคูณขยายทางพลวัต (DMF) ของระบบมีค่าต่ำที่สุดเป็นเป้าหมาย สำหรับผลของค่าที่เหมาะสมของระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4

ตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุด

	Tuning frequency	Damping	Max. DMF	Max. u_{Ti} (cm)
Linear TMD	$\gamma = 0.99$	$\xi = 0.060$	12.71	3.02
Linear MTMD	$\gamma_0 = 0.994, \Delta\gamma = 0.12$	$\xi_i = 0.021$	10.61	7.60
Optimal non. MTMD	$\gamma_0 = 0.995, \Delta\gamma = 0.12$	$c_{Ti} = 20 \text{ N/(m/s)}^2$	11.81	8.12
Selected non. MTMD	$\gamma_0 = 0.990, \Delta\gamma = 0.13$	$c_{Ti} = 50 \text{ N/(m/s)}^2$	13.14	5.44

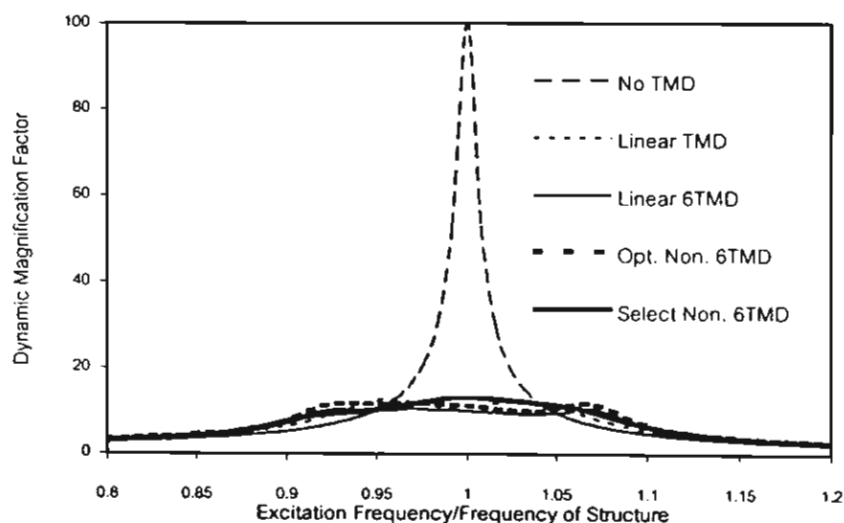
พิจารณาตัวแปรของระบบมวลหน่วงชุด พบว่าค่า γ_0 ที่เหมาะสมแตกต่างกันไปจากค่า γ ของมวลหน่วงเล็กน้อย ค่า $\Delta\gamma$ ของมวลหน่วงชุดทุกระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นที่เหมาะสมในการใช้งานจริงเลือกค่า γ_0 ที่มีขนาดที่ใกล้เคียงกับ ค่า γ_0 ที่เหมาะสมและเลือกค่า c_T ที่สามารถผลิตได้ง่ายเพื่อความสะดวกในการผลิต

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบที่เหมาะสมทั้งหมดในรูปของ DMF พบว่าทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ระบบมวลหน่วงชุดจะมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนได้สูงกว่ามวลหน่วงเล็กน้อยและระบบแบบเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนได้สูงกว่าระบบแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย โดยในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพของมวลหน่วงและมวลหน่วงชุด พบว่าประสิทธิภาพของระบบแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นใกล้เคียงกัน และจะเห็นได้ว่าระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุดทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นสามารถลดการสั่นสะเทือนได้กว่า 80%

รูปที่ 8

ประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงและมวลหน่วงชุด



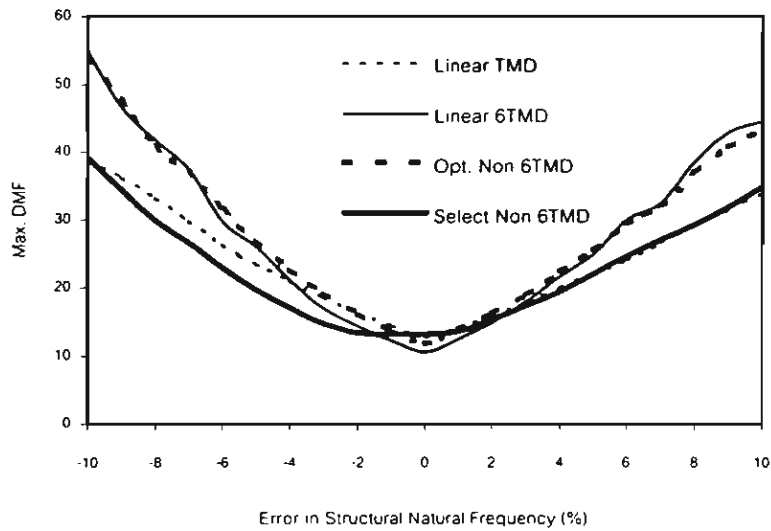
3.2 ความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบมวลหมุน

ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งในการพิจารณาประสิทธิภาพของมวลหมุนคือความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ (Sensitivity) เมื่อมีความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง (ω_s) ผิดพลาดในทางปฏิบัติ การศึกษาถึงประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าระบบทุกระบบค่อนข้างไวของค่า ω_s ที่เปลี่ยนแปลงไป และระบบมวลหมุนชุดแบบไม่เชิงเส้นจะมีความมั่นคงต่อการแปรปรวนมากกว่า ซึ่งเป็นข้อดีอีกด้านหนึ่งของระบบนี้

นอกจากการพิจารณาความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเมื่อมีความผิดพลาดในการประมาณค่า ω_s แล้ว ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อระบบแบบไม่เชิงเส้นคือระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ซึ่งมีผลต่อแรงหมุนของมวลหมุนแบบไม่เชิงเส้น โดยระดับของการสั่นสะเทือนนี้ขึ้นกับระดับของแรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ ดังนั้นจึงต้องศึกษาความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบแบบไม่เชิงเส้นเมื่อมีความแปรปรวนของแรงภายนอกด้วย ในรูปที่ 10 พบว่าประสิทธิภาพของระบบเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยถึงแม้มีความผิดพลาดในการประมาณแรงภายนอกค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อระบบมวลหมุนชุดเกิดการสั่นจะมีความเร็วในการสั่นสะเทือนต่างๆ กันในมวลหมุนแต่ละตัว ดังนั้นมวลหมุนแต่ละตัวจะมีแรงหมุนซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วในการสั่นสะเทือนต่างกันไปด้วย ซึ่งช่วงของแรงหมุนดังกล่าวนี้ทำให้ระบบมวลหมุนชุดค่อนข้างมั่นคงต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงภายนอก สำหรับประสิทธิภาพของมวลหมุนชุดแบบไม่เชิงเส้นที่เหมาะสมในการใช้งานจริงนั้นจะมีความไวต่อความผิดพลาดในการประมาณแรงภายนอกค่อนข้างต่ำ เนื่องจากค่าความหน่วง (c_T) ของมวลหมุนแต่ละตัวมีค่าสูงกว่าค่าความหน่วงที่เหมาะสม

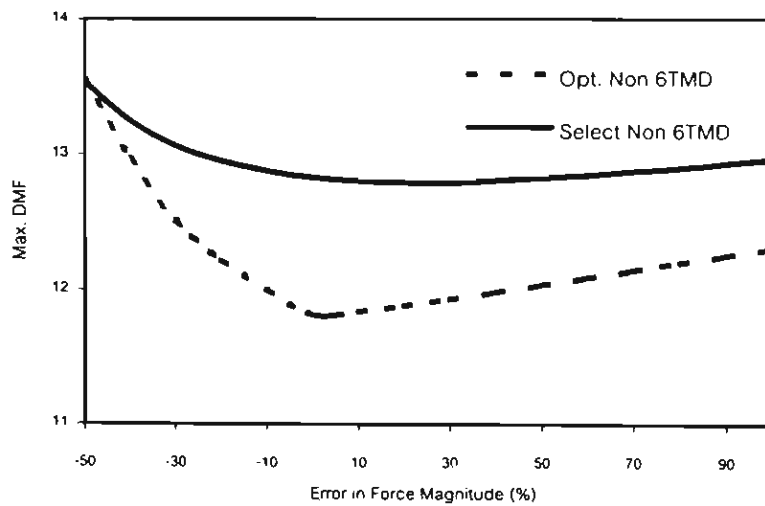
รูปที่ 9

ความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงเมื่อมีความผิดพลาดในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง



รูปที่ 10

ความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงเมื่อมีความผิดพลาดในการประมาณค่าแรงกระทำภายนอก



4. การเลือกระบบ TMD ที่เหมาะสม (Optimal Design)

จากวิธี Method of Averaging พิจารณาระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้น ภายใต้แรงกระทำแบบ Harmonic

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u + \varepsilon i|u| = \varepsilon f_1 \cos \Omega t \quad (34)$$

โดยสมมุติคำตอบในรูป

$$u = a \cos(\omega_0 t - \beta) \quad (35)$$

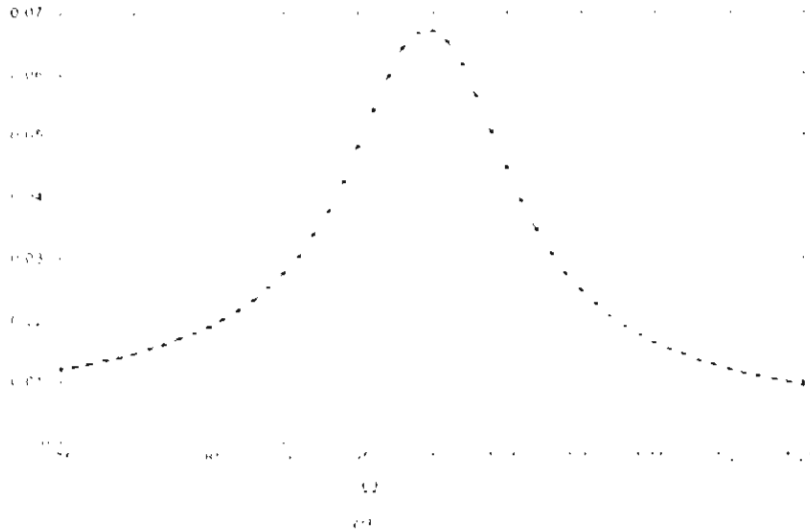
จะได้คำตอบในขั้นตอนสุดท้าย คือ

$$a = \sqrt{\frac{-9\pi^2(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + \sqrt{81\pi^4(\omega_0^2 - \Omega^2)^4 + 2304\pi^2\varepsilon^4\Omega^4f_1^2}}{128\varepsilon^2\Omega^4}} \quad (36)$$

หลังจากได้สมการแอมพลิจูดของระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นแล้วได้ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ (36) กับการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ Step by Step Integration จากระบบตัวอย่าง พบว่าค่าแอมพลิจูดที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธีนั้นมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 11 โดยที่แกน y เป็นค่าแอมพลิจูดของโครงสร้าง ส่วนแกน x เป็นค่าความถี่ของแรงภายนอกหารด้วยความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง และเมื่อทำการพิจารณาจากตัวอย่างอื่น ๆ ก็พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้จากสมการ (36) กับค่าที่ได้จากทฤษฎี Step by Step Integration นั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อไปถึงการหาค่า Equivalent Damping ของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้นต่อไป

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของโครงสร้างที่คำนวณได้โดยวิธี Step by Step Integration กับสมการที่ได้ทฤษฎี The Method of Averaging

Displacement



เริ่มจากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้นกับระบบ TMD แบบเชิงเส้น จากสมการแสดงค่าแอมพลิจูด ที่สภาวะ Steady-State ของระบบ TMD แบบเชิงเส้น คือ

$$a = \frac{p_1}{k} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot (2\zeta\beta) \quad (37)$$

และสมการแสดงค่าแอมพลิจูด ณ Steady-State ของระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้น จากวิธี The Method of Averaging ในสมการที่ (36) จากนั้นทำการเปรียบเทียบโดยสมมติว่าแอมพลิจูดของระบบมวลหน่วงแบบเชิงเส้นและ ระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นมีค่าเสมือนเท่ากัน ดังนั้นจะสามารถหาค่า Equivalent Damping, ξ_e ได้คือ

$$\xi_e = \frac{1}{2\Omega\omega_0} \sqrt{\frac{128\varepsilon^4\Omega^4f_1^2 - (\omega_0^2 - \Omega^2)^2}{\psi}} \quad (38)$$

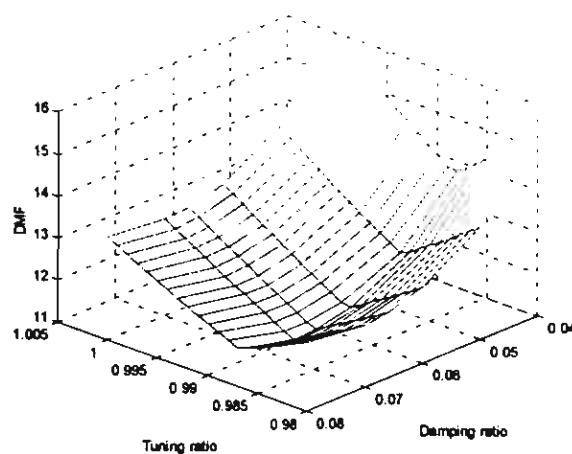
เมื่อกำหนดให้ $\psi = -9\pi^2(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + \sqrt{81\pi^4(\omega_0^2 - \Omega^2)^4 + 2304\pi^2\varepsilon^4\Omega^4f_1^2}$

จากสมการ (38) พบว่าค่า Equivalent Damping ไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของ TMD เพียงอย่างเดียวยังมีผลของแรงภายนอกมาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาหาแรงภายนอกที่มีผลต่อค่า Equivalent Damping ของระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้นต่อไป

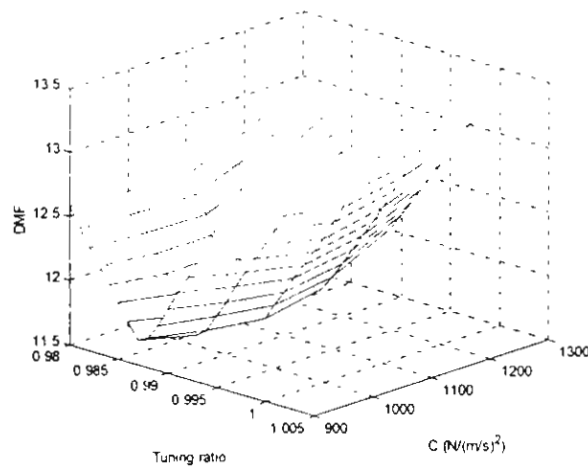
เมื่อทำการการศึกษาระบบที่ประกอบด้วยโครงสร้างและ TMD นั้น ในการที่จะหาค่า Equivalent Damping ของ TMD แบบไม่เชิงเส้นนั้น จะต้องทราบขนาดของแรงที่กระทำต่อระบบ TMD ด้วย แต่เนื่องจากไม่สามารถคำนวณหาขนาดของแรงที่แน่นอนได้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการประมาณอย่างคร่าว ๆ โดยพิจารณาว่าแรงที่กระทำต่อระบบ TMD นั้นมีค่าเป็นสัดส่วนเมื่อเทียบกับแรงภายนอกที่มากระทำต่อโครงสร้าง โดยอาศัยการเปรียบเทียบกราฟ DMF ของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งหาได้จากทฤษฎี Step by Step Integration กับกราฟ DMF ที่ได้จากการคำนวณโดยสมการของ Equivalent Damping แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ จนได้ค่าที่ทำให้กราฟทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งการทำงานในกระบวนการนี้จะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการหาสัดส่วนของแรงที่เหมาะสม

ในการศึกษาต่อไปได้ทำการศึกษาการลู่เข้าของฟังก์ชันสำหรับระบบ TMD ว่าสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่า DMF ของโครงสร้างมีค่าต่ำสุด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 12 และ 13

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tuning ratio, Damping ratio และค่า DMF ของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบ TMD แบบเชิงเส้น

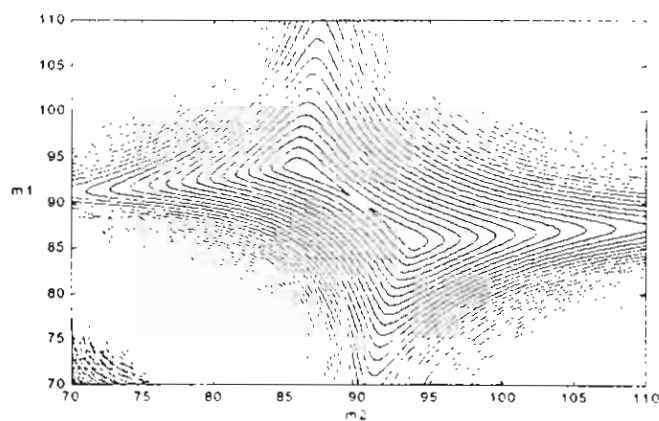


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tuning ratio, ค่าความหน่วงและค่า DMF ของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบ TMD แบบไม่เชิงเส้น



จากรูปที่ 12 และ 13 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการลู่เข้าของคำตอบที่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ TMD ที่เหมาะสมได้ และได้ทำการศึกษาการลู่เข้าของฟังก์ชันสำหรับระบบ MTMD โดยพิจารณาจากระบบที่ประกอบด้วย TMD 2 ชุด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 14

รูปที่ 14 Contour แสดงค่า DMF ของโครงสร้างเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลทั้งสองของระบบมวลหน่วงแบบเชิงเส้น 2 ชุด



จากรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าระบบ MTMD มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้มากกว่าหนึ่งคำตอบ ดังนั้น คำตอบที่ได้จากการทำ Optimization จึงค่อนข้างขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การหาคำตอบด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการลองผิดลองถูก และสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วมาก

5. การผลิตระบบ TMD และทดสอบประสิทธิภาพ

ขั้นตอนการทำการวิจัยขั้นต่อไปคือ การทดสอบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นกับระบบโครงสร้างจริง โดยเลือกใช้สะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็กตัวอย่าง ซึ่งมีคุณสมบัติคือมวลรวมประมาณ 18.5 ตัน ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานเท่ากับ 2.00 Hz. และอัตราส่วนความหน่วงประมาณ 0.5%

สำหรับระบบมวลหน่วงเลือกใช้ระบบมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถผลิตได้ง่ายและได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนการวิจัยขั้นที่แล้วโดยมีตัวแปรต่างๆ ดังนี้

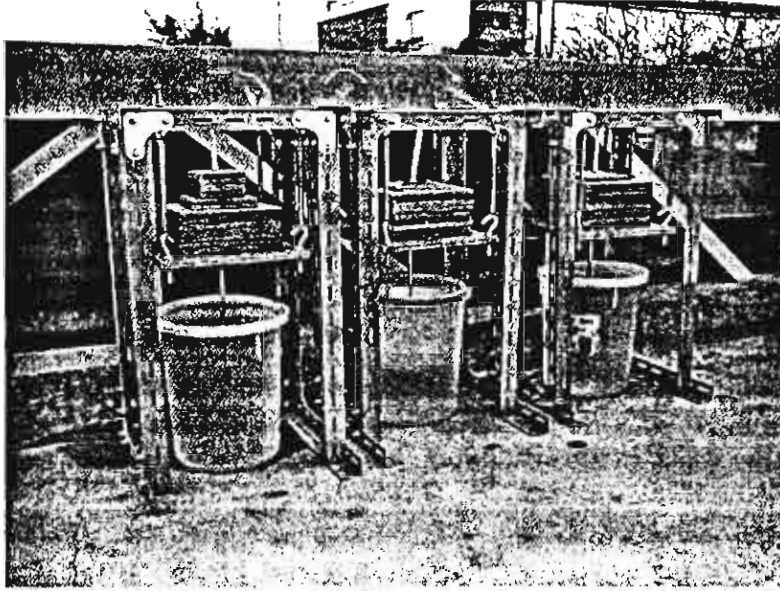
- 1.) จำนวนของระบบมวลหน่วงเท่ากับ 6 ตัว
- 2.) ค่าสติฟเนสของระบบมวลหน่วงแต่ละตัวมีขนาดเท่ากับ 4791 N/m
- 3.) ช่วงอัตราส่วนความถี่ ($\Delta\gamma$) เท่ากับ 0.13
- 4.) อัตราส่วนความถี่กลาง (γ_o) เท่ากับ 0.99
- 5.) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c_T) เท่ากับ 50 N/(m/s)²

จากตัวแปรนี้จะสามารถกำหนดคุณสมบัติของมวลหน่วงแต่ละตัวซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยลักษณะของมวลหน่วง 3 ชุด จากทั้งหมด 6 ชุดที่ติดตั้งบนสะพานลอย แสดงดังรูปที่ 15

ตารางที่ 5
คุณสมบัติของระบบมวลหน่วงแต่ละตัว

มวลหน่วงตัวที่	มวล (kg)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
1	35.56	1.85
2	33.64	1.90
3	31.88	1.95
4	30.25	2.01
5	28.74	2.06
6	27.34	2.11

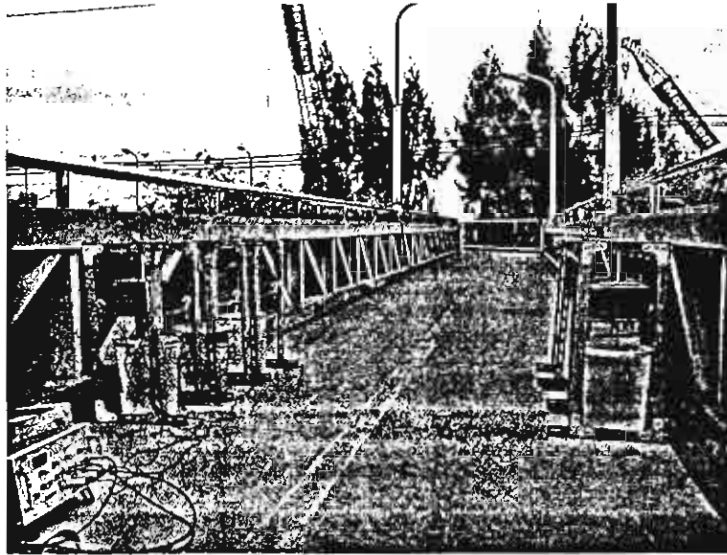
รูปที่ 15
ระบบมวลหน่วงติดตั้งบนสะพานลอย



ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงโดยตรวจวัดความเร่งในการสั่นของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็กด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณภาคสนามและวิเคราะห์สัญญาณความเร่งในการสั่นของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆของสะพานลอยเมื่อเกิดการสั่นใน 2 ลักษณะ ได้แก่อัตราส่วนความหน่วง!เมื่อเกิดการสั่นแบบอิสระ และความเร่งสูงสุดเมื่อเกิดการสั่นเนื่องจากคนเดินผ่าน

จากนั้นทำการติดตั้งมวลหน่วงชุดเข้ากับสะพานลอยดังรูปที่ 16 ตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณความเร่งในการสั่นทั้ง 2 ลักษณะของสะพานลอยของสะพานลอยเพื่อหาค่าต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งของสะพานลอยทั้งในขณะที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งมวลหน่วงชุด เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของมวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นในการแก้ไขปัญหาการสั่นของสะพานลอย และเปรียบเทียบผลการตอบสนองในการสั่นทั้ง 2 ลักษณะของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็กในขณะที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งมวลหน่วงชุดกับแบบจำลองการตอบสนองของโครงสร้างเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 16
สะพานลอยเมื่อติดตั้งมวลหน่วงชุด



จากผลการศึกษาในขั้นที่ 1 สามารถทำการตรวจวัดค่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานเมื่อมีการสั่นแบบอิสระโดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุดเท่ากับ 0.5% และผลการตรวจวัดค่าความเร่งสูงสุดของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดินโดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 m/s^2 เมื่อทำการติดตั้งมวลหน่วงชุดกับสะพานลอยแล้วตรวจวัดค่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานเมื่อมีการสั่นแบบอิสระได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.6% และความเร่งสูงสุดของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 m/s^2 ผลการตรวจวัดค่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นแบบอิสระโดยติดตั้งมวลหน่วงชุดแสดงไว้ในตารางที่ 6 และผลการตรวจวัดค่าความเร่งสูงสุดของสะพานลอยดังแสดงในตารางที่ 7 โดยผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นแบบอิสระโดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุดทั้งจากสัญญาณที่วัดได้ในการทดสอบและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 17 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นแบบอิสระโดยติดตั้งมวลหน่วงชุดแสดงดังรูปที่ 18 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดินโดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุดแสดงในรูปที่ 19 และผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดินโดยติดตั้งมวลหน่วงชุดแสดงในรูปที่ 20

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่ามวลหน่วงชุดที่ใช้ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นสามารถแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็กโดยสามารถเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงของสะพานลอยและลดขนาดของความเร่งในการสั่นเนื่องจากคนเดิน และจากการเปรียบเทียบสัญญาณการตอบสนองของโครงสร้างสามารถยืนยันความสอดคล้องของผลการทดสอบและผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 6
อัตราส่วนความหน่วงของสะพานลอยเมื่อติดตั้งมวลหน่วงชุด

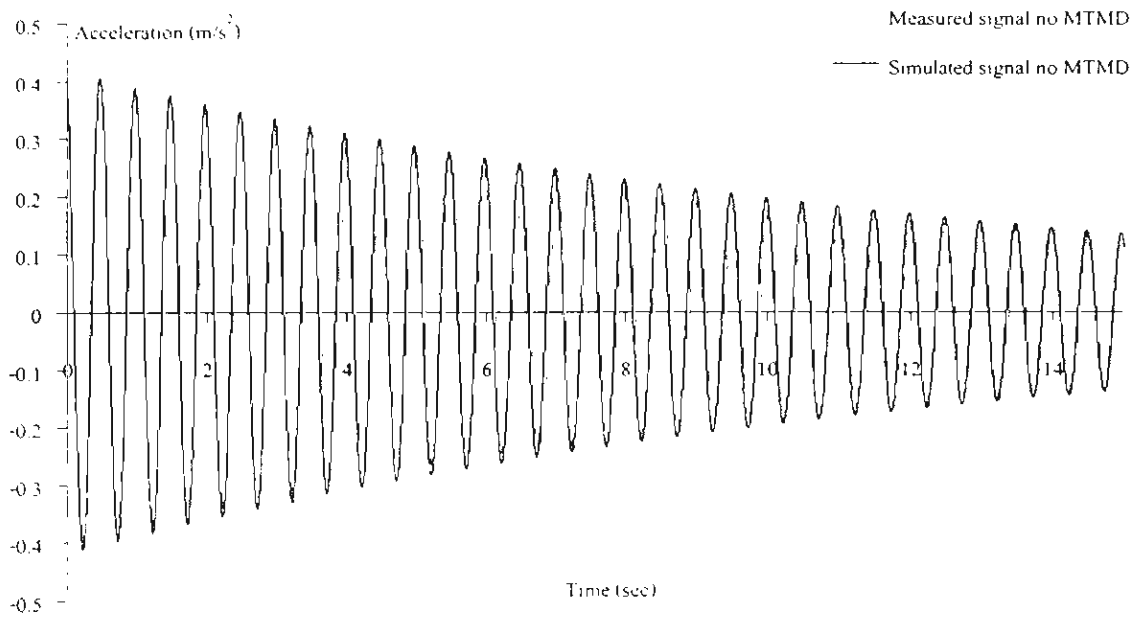
ครั้งที่	อัตราส่วนความหน่วง (%)	ข้อสังเกต
1	4.502	มีสัญญาณรบกวน
2	4.403	
3	2.441	
4	4.056	
5	3.683	
6	3.263	มีสัญญาณรบกวน มีสัญญาณรบกวน
7	3.197	
8	3.494	
9	3.238	
10	3.933	

ตารางที่ 7
ความเร่งสูงสุดของสะพานลอย

ครั้งที่	ความเร่งสูงสุด (m/s^2)	กรณี
1	0.28	With MTMD
2	0.3	With MTMD
3	0.27	With MTMD
4	0.35	With MTMD
5	0.4	With MTMD
6	0.53	no MTMD
7	0.55	no MTMD
8	0.8	no MTMD
9	0.9	no MTMD
10	1.3	no MTMD

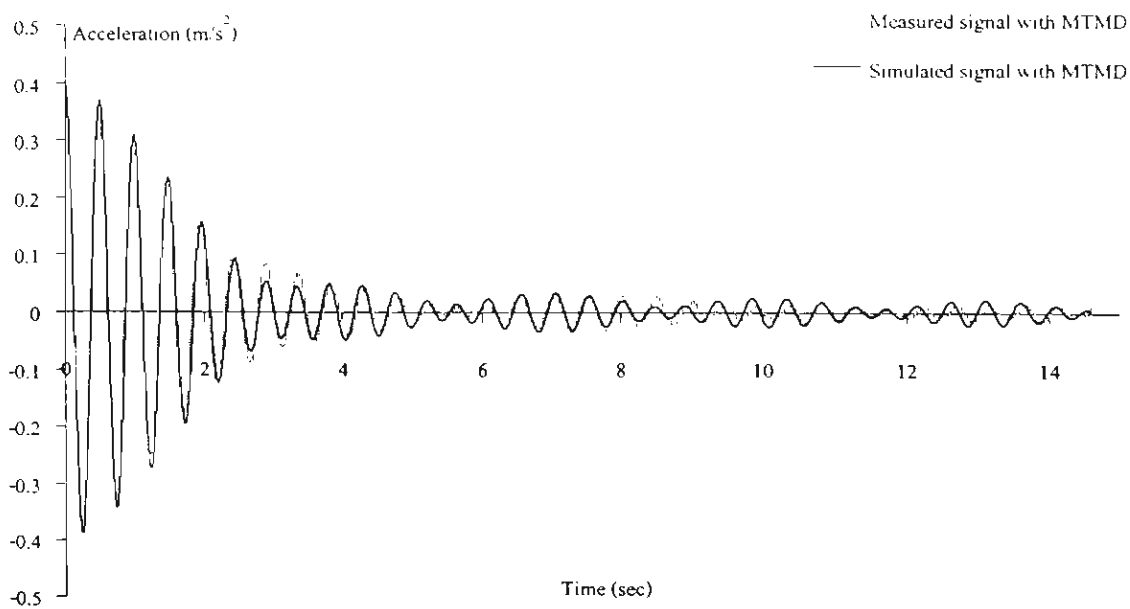
รูปที่ 17

การเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นแบบอิสระ
โดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุด



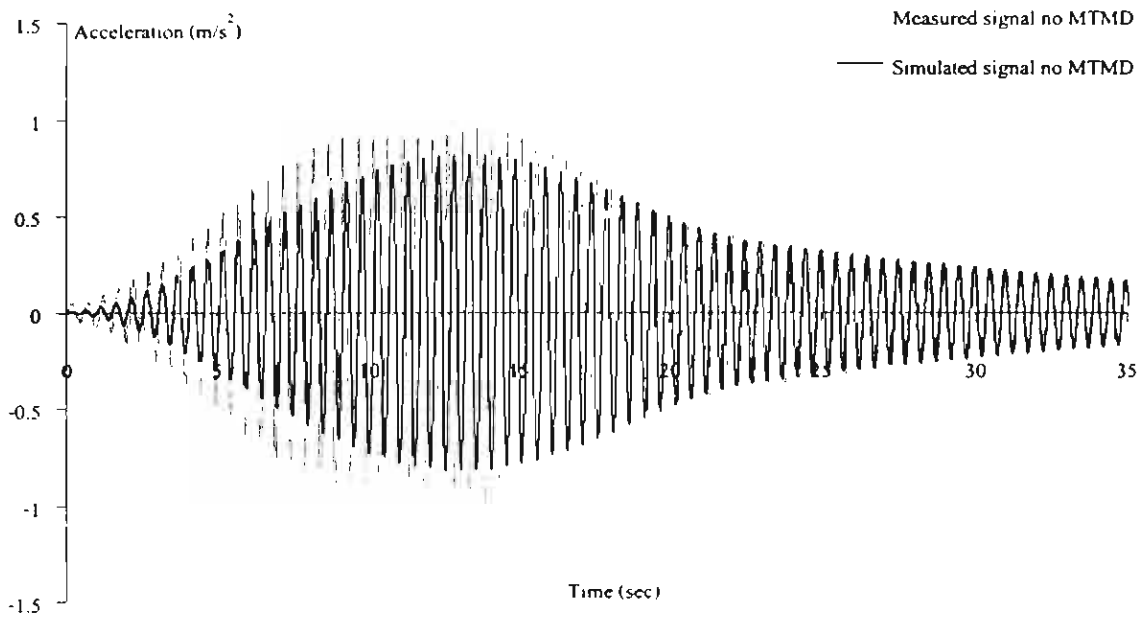
รูปที่ 18

การเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นแบบอิสระ
โดยติดตั้งมวลหน่วงชุด



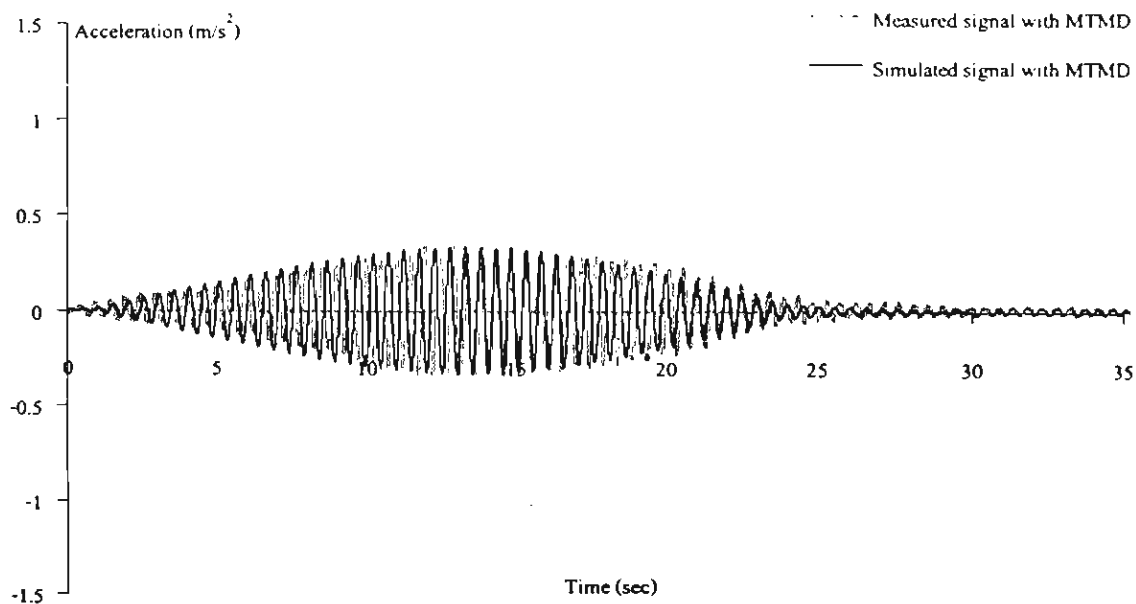
รูปที่ 19

การเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดิน
โดยไม่ติดตั้งมวลหน่วงชุด



รูปที่ 20

การเปรียบเทียบการตอบสนองของสะพานลอยเมื่อมีการสั่นเนื่องจากคนเดิน
โดยติดตั้งมวลหน่วงชุด



สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการนำเสนอระบบควบคุมการสันสะเทือนด้วยมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในการประยุกต์ใช้จริง สามารถออกแบบระบบนี้ได้โดยทฤษฎีที่พัฒนาขึ้น และสามารถผลิตระบบขึ้นได้เองโดยใช้วัสดุที่จัดหาได้ภายในประเทศทั้งหมด ทำให้ช่วยลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และด้วยเหตุผลในด้านความสะดวกในการผลิตนี้ ทำให้การประยุกต์ใช้สามารถทำได้กับปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทั่วไป และสำหรับปัญหาที่มีลักษณะแตกต่างไปจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้ สามารถออกแบบและผลิตระบบมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นขึ้นได้จากการศึกษาและทดลองในระบบที่ไม่ซับซ้อนตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในเนื้อหาของงานวิจัยนี้

ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตัวหน่วงแบบของเหลวที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติการหน่วงแบบไม่เชิงเส้นกำลังสอง โดยแรงหน่วงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงจะมีขนาดแปรผันกับความเร็วในการเคลื่อนที่ยกกำลังสอง และในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจะมีความสัมพันธ์กับขนาดหน้าตัดของตัวหน่วง, ความหนาแน่นของของเหลว และค่าสัมประสิทธิ์การลากซึ่งสัมพันธ์กับค่า Reynolds Number และความผิดพลาดในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Reynolds Number ดังนั้น ตัวหน่วงแบบของเหลวที่ใช้ในการทดลองสามารถควบคุมให้มีคุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้นกำลังสอง และผลิตเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบมวลหน่วงได้
- 2) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นในการแก้ปัญหการสันสะเทือนของแบบจำลองโครงสร้างตัวอย่าง พบว่าทุกระบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน
- 3) ระบบมวลหน่วงแบบตัวเดียวทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นจะมีปัญหาด้านความไวต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ (Sensitivity) ที่มีต่อความผิดพลาดในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง สำหรับความไวต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพที่มีต่อความผิดพลาดในการประมาณค่าแรงกระทำภายนอกของมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นและมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้น พบว่ามวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นจะให้ความมั่นคงมากกว่ามวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้น
- 4) จากการศึกษาการออกแบบระบบมวลหน่วงที่เหมาะสม สามารถหาค่าที่เหมาะสมโดยการหาค่าตอบของระบบไม่เชิงเส้นโดยวิธี Perturbation จากนั้นหาค่าเทียบเท่าในรูปของระบบ

เชิงเส้น และใช้ Numerical Optimization ในการหาค่าที่เหมาะสม ค่าตอบที่ได้จากการทำ Optimization ค่อนข้างขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การหาคำตอบด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการลองผิดลองถูก และสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วมาก

- 5) การทดสอบประสิทธิภาพของระบบมวลห้วงชุดกับโครงสร้างจริงได้แก่สะพานลอยคนข้าม โครงสร้างเหล็ก ผลการทดสอบพบว่ามวลห้วงชุดสามารถเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างและสามารถลดความเร่งสูงสุดในการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเนื่องจากคนเดินได้ โดยความเร่งในการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองของแรงกระทำเนื่องจากคนเดิน

เอกสารอ้างอิง

นคร ภู่วโรดม. "การแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงแบบไร้เชิงเส้น." เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, มีนาคม 2542

โสภาค กาญจนโนสธ มณฑล รุ่งโรจน์สุวรรณ และ นคร ภู่วโรดม, การทดลองสำหรับแบบจำลองของตัวหน่วงแบบง่ายเพื่อใช้ในระบบมวลหน่วงในการแก้ปัญหการสั่นสะเทือน, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, มีนาคม 2542

Ali, H. N. Introduction to Perturbation Techniques. New York: John Wiley & Sons, 1981.

Ali, H.N., and Dean, T.M. Nonlinear Oscillations. New York: John Wiley & Sons, 1979.

Bachmann H. "Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations", J. of Struct. Div., ASCE, Vol. 118, ST3, 1992.

Bachmann H. and Ammann W. Vibrations in structures induced by man and machines, Structural Engineering Document No. 3e, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987.

British Standards Institution, Vibration serviceability requirements for foot and cycle track bridges, BS5400, Part 2, Appendix C, 1978.

Clough, R.W., and Penzine J. Dynamics of Structures. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

Den Hartog, J.P. Mechanical Vibrations. fourth 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1956.

Janna W. S. Introduction to fluid mechanics, Boston: PWS Publishing Company, 1993.

Igusa, T., and Xu, K. "Dynamics Characteristics of Mutiple Substructures with Closely Spaced Frequencies." Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol.21 (1992):

1059-1070.

Rodsin K., "Suppression of Pedestrian Bridge Vibration by Multiple Tuned Mass Damper" Master's thesis, Asian Institute of Technology, 1999.

Matsumoto Y., Nishioka T., Shiojiri H., Matsuzaki K. Dynamic design of footbridges, International Association for Bridge and Structural Engineering, Proceeding P-17/78, 1978. p. 1-15

Minh, N.N. "Man-Induced Vibration on Pedestrian Bridges" Master's thesis, Asian Institute of Technology, 1995.

Poovarodom, N., Yamaguchi, H. and Warnitchai, P., Optimal Allocation of Multiple Tuned Mass Dampers for Continuous Systems, Proceedings of the 2nd International conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), 1994

Singiresu, S.RAO. Engineering Optimization. New York: John Wiley & Sons, 1996.

Soong T. T. and Dargush G. F., Passive energy dissipation systems in structural engineering, West Sussex: John Wiley & Sons, 1997

Streeter V. L. and Wylie E. B., Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 1983.

Warburton, G.B. "Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters." Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol.10 (1982): 381-401.

Warnitchai, P. and Poovarodom, N., A New Approach in Optimal Design of Multiple Tuned Mass Dampers, Proceedings of the 4th East Asia-Pacific conference (EASEC), 1993

Wheeler, J. E. "Prediction and Control of Pedestrian Induced Vibration in Footbridges." J. of Struct. Div., ASCE, Vol. 108, ST9, 1982.

Yamaguchi, H. Structural Dynamics. Asian Institute of Technology, 1992.

Yamaguchi, H. and Harnpornchai, N. "Fundamental characteristics of Multiple Tuned Mass Dampers for suppressing harmonically forced oscillations." Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol.22 (1993): 51-62.

ผลของงานวิจัย

นคร ภู่วโรดม, การแก้ไขปัญหการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงแบบไร้เชิงเส้น, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, มีนาคม 2542
เป็นการตีพิมพ์บทความและนำเสนอในที่ประชุมระดับชาติ

โสภาค กาญจะโนสถ มณฑล รุ่งโรจน์สุวรรณ และ นคร ภู่วโรดม, การทดลองสำหรับแบบจำลองของตัวหน่วงแบบง่ายเพื่อใช้ในระบบมวลหน่วงในการแก้ปัญหการสั่นสะเทือน, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, มีนาคม 2542
เป็นการตีพิมพ์บทความในที่ประชุมระดับชาติ

Poovarodom N., Kanchanosot S. and Warnitchai P., Nonlinear Multiple Tuned Mass Dampers for Suppressing Man-Induced Vibration of Pedestrian Bridge. Engineering Structures
เป็นบทความที่ส่งเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ (*Engineering Structures*)

และขณะนี้มีการเขียนบทความ

นคร ภู่วโรดม และ มณฑล รุ่งโรจน์สุวรรณ การออกแบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นที่เหมาะสมเพื่อลดตีพิมพ์ในวารสาร วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา และปรับปรุงเนื้อหาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติต่อไป