

การตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ของสะพานช่วงยาว
โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม และการลดการตอบสนอง

โดย

พิภพ โมกขาว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

การตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ของสะพานช่วงยาว โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม
และการลดการตอบสนอง

Aerodynamic Response of Long Span Bridges by Wind Tunnel Test and Their
Vibration Suppression

โดย

พิภพ โมกขาว
Mr.Pipop Mokekhao

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ.2551

Abstract

This research presents section model test of Akashi kaikyo Bridge suspension bridge and Industrial Ring Road Bridge in wind tunnel to find vortex shedding phenomena and critical wind speed for flutter instability. These aeroelastic phenomena are the most important problems that usually happen in suspension bridge and cable stayed bridge. The section model of the bridges are made of woods of length scale 1/50 for Akashi Kaikyo Bridge and 1/90 for Industrial Ring Road Bridge respectively and installed in wind tunnel by eight springs support for stiffness of the bridge. In addition, the Tuned Mass Dampers (TMDs) are installed on the bridge to suppress the aerodynamic response of the bridges. The TMDs are designed of 1% and 3% by mass ratio for Akashi Kaikyo Bridge and 1%, 2% and 4% for Industrial Ring Road Bridge respectively. TMDs are installed in 2 patterns. The first, the TMDs are installed in each mode shape of vibration; in vertical and in torsional. The second, the TMDs are installed to control both vertical and torsional in the same time. In addition, 3 different damping ratios occupied for TMD 1% mass ratio for Industrial Ring Road Bridge. Moreover, the aerodynamic response of the original section and improved section by providing the 10 cm. width of strip opening in middle lane of Akashi Kaikyo Bridge were tested.

The results shown that the efficiency of TMDs 1-4% by mass ratio for both Akashi Kaikyo Bridge and Industrial Ring Road Bridge are satisfied. A) The TMDs 1% by mass ratio in vertical and torsional can suppress vertical and torsional vibration by 11-39% and 46-67% respectively and it can suppress vertical and torsional vibration by 35% and 67% respectively during vortex shedding and it can extend the critical wind speed by 15-20%. B) The TMDs 2% by mass ratio in vertical and torsional for Industrial Ring Road Bridge can suppress vertical and torsional vibration by 19% and 35% respectively and it can suppress vertical and torsional vibration by 43% and 6% respectively during vortex shedding and it can extend the critical wind speed by 7%. C) The TMDs 3% by mass ratio in vertical and torsional for Akashi Kaikyo Bridge can suppress vertical and torsional vibration by 10% and 54% respectively and it can extend the critical wind speed by 84%. D) The TMDs 4% by mass ratio in vertical and torsional for Industrial Ring Road Bridge can suppress vertical and torsional vibration by 22% and 54% respectively and it can suppress vertical and torsional vibration by 45% and 66% respectively during vortex shedding and it can extend the critical wind speed by 64%. E) In case of 3 different damping ratios occupied for TMD 1% by mass ratio for Industrial Ring Road Bridge, it was found that the optimum damping ratio TMDs case can extend the critical wind speed by 15%. Meanwhile the less and the more damping ratio TMDs can extend the critical wind speed by 7% and 12% respectively. The vibration suppression efficiency of the 3 cases TMDs are similar. F) In addition, the results shown that the improved section of Akashi Kaikyo Bridge by providing the 10 cm. width of strip opening in middle lane can suppress aerodynamic response well.

อัตรามวล 4% สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม พร้อมกันทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งได้ 22% และในแนวการบิดได้ 54% และสามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งขณะเกิด Vortex shedding ได้ 45% และในแนวการบิดได้ 66% และสามารถเพิ่มความเร็วมวิกฤตได้ 64% จ) เมื่อแปรผันความหน่วง TMD พบว่า ที่ความหน่วงที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความเร็วมวิกฤตได้ 15% ในขณะที่ความหน่วงน้อยกว่าความหน่วงที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความเร็วมวิกฤตได้ 7% และที่ความหน่วงมากกว่าความหน่วงที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความเร็วมวิกฤตได้ 12% และทั้ง 3 แบบสามารถลดการสั่นไหวได้ใกล้เคียงกัน ฉ) การปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องให้ลมผ่านได้ดีขึ้นที่บริเวณกลางของผิวจราจร ทำให้ลดการตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ได้ดีขึ้น

Abstract

This research presents section model test of Akashi kaikyo Bridge suspension bridge and Industrial Ring Road Bridge in wind tunnel to find vortex shedding phenomena and critical wind speed for flutter instability. These aeroelastic phenomena are the most important problems that usually happen in suspension bridge and cable stayed bridge. The section model of the bridges are made of woods of length scale 1/50 for Akashi Kaikyo Bridge and 1/90 for Industrial Ring Road Bridge respectively and installed in wind tunnel by eight springs support for stiffness of the bridge. In addition, the Tuned Mass Dampers (TMDs) are installed on the bridge to suppress the aerodynamic response of the bridges. The TMDs are designed of 1% and 3% by mass ratio for Akashi Kaikyo Bridge and 1%, 2% and 4% for Industrial Ring Road Bridge respectively. TMDs are installed in 2 patterns. The first, the TMDs are installed in each mode shape of vibration; in vertical and in torsional. The second, the TMDs are installed to control both vertical and torsional in the same time. In addition, 3 different damping ratios occupied for TMD 1% mass ratio for Industrial Ring Road Bridge. Moreover, the aerodynamic response of the original section and improved section by providing the 10 cm. width of strip opening in middle lane of Akashi Kaikyo Bridge were tested.

The results shown that the efficiency of TMDs 1-4% by mass ratio for both Akashi Kaikyo Bridge and Industrial Ring Road Bridge are satisfied. A) The TMDs 1% by mass ratio in vertical and torsional can suppress vertical and torsional vibration by 11-39% and 46-67% respectively and it can suppress vertical and torsional vibration by 35% and 67% respectively during vortex shedding and it can extend the critical wind speed by 15-20%. B) The TMDs 2% by mass ratio in vertical and torsional for Industrial Ring Road Bridge can suppress vertical and torsional vibration by 19% and 35% respectively and it can suppress vertical and torsional vibration by 43% and 6% respectively during vortex shedding and it can extend the critical wind speed by 7%. C) The TMDs 3% by mass ratio in vertical and torsional for Akashi Kaikyo Bridge can suppress vertical and torsional vibration by 10% and 54% respectively and it can extend the critical wind speed by 84%. D) The TMDs 4% by mass ratio in vertical and torsional for Industrial Ring Road Bridge can suppress vertical and torsional vibration by 22% and 54% respectively and it can suppress vertical and torsional vibration by 45% and 66% respectively during vortex shedding and it can extend the critical wind speed by 64%. E) In case of 3 different damping ratios occupied for TMD 1% by mass ratio for Industrial Ring Road Bridge, it was found that the optimum damping ratio TMDs case can extend the critical wind speed by 15%. Meanwhile the less and the most damping ratio TMDs can extend the critical wind speed by 7% and 12%. The vibration suppression efficiency of the 3 cases TMDs are similar. F) In addition, the results shown that the improved section of Akashi Kaikyo Bridge by providing the 10 cm. width of strip opening in middle lane can suppress aerodynamic response well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะรองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งมีความปรารถนาดีต่อผู้วิจัยและได้อุทิศเวลาเอาใจใส่ต่อผู้วิจัยเสมอมาในการศึกษาระดับปริญญาโทนี้ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤดายุทธ ชมภูมิ่ง ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญทรัพย์ วิชฌยางกูร กรรมการวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ กรรมการวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ที่ได้ช่วยปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

และในระหว่างขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและการศึกษานั้นจะสำเร็จไม่ได้เลย ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลเหล่านี้ อันได้แก่ คุณอาประยงค์ โมกขาว ที่กรุณาในการสร้างแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo ซึ่งมีความละเอียดและยากในการสร้างมาก นอกจากนี้ยังได้รับความช่วยเหลือจาก คุณไพโรจน์ สีหะตระกูล ซึ่งเป็นเพื่อนตอนที่ศึกษาระดับปริญญาตรีจนกระทั่งปัจจุบัน อนุเคราะห์ด้านการสั่งจัดทำสปริง ส่วนในการจัดสร้างแบบจำลองสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมได้รับความช่วยเหลือจากพี่รัช เจนสุกเสรี ที่ได้ดำเนินการจัดสร้างนอกจากนี้ยังให้คำปรึกษาในด้านการทดสอบต่างๆ รวมทั้งการออกแบบติดตั้งมวลหน่วง และยังอนุเคราะห์ในด้านโปรแกรมที่ใช้ในการหาความถี่ในการสั่นและความหน่วงของสะพานอีกด้วย ส่วนการติดตั้งและการทดสอบสะพาน ได้รับความช่วยเหลือจากคุณวรพจน์ ธรรมสังคีติ และคุณพิเชษ กล้าหาญ

ขอขอบพระคุณ คุณบุญชัย กุลศิริพฤกษ์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท กรุงเทพเอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด และ คุณกิตติ อุ่นจิตติ ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม บริษัท ซีทีซีไอ(ประเทศไทย) จำกัดที่กรุณาอนุญาตให้ผู้วิจัยได้ศึกษาต่อได้ในขณะที่เป็นพนักงานของบริษัทฯ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิต ผู้ซึ่งให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับผู้วิจัย และให้การสนับสนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทเป็นอย่างดี ได้แก่ บิดาและมารดา รวมทั้งขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้ในการศึกษาและการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

พิภพ โมกขาว

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ.2551

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ..... | (1) |
| Abstract..... | (3) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (4) |
| สารบัญตาราง..... | (6) |
| สารบัญรูปประกอบ..... | (9) |
| | |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา..... | 2 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... | 8 |
| 1.3 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์..... | 8 |
| 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 15 |
| 3.1 พลศาสตร์ของโครงสร้าง (Dynamic of Structure)..... | 15 |
| 3.2 พลศาสตร์ของแรงลม (Dynamic of Wind)..... | 23 |
| 3.3 การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง (Vibration Control)..... | 34 |
| 3.4 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม..... | 38 |
| 4. วิธีการวิจัย..... | 57 |
| 4.1 การออกแบบและจัดทำแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม..... | 57 |
| 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดค่า ของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo ในอุโมงค์ลม..... | 78 |
| 4.3 การปรับปรุงหน้าตัดของสะพาน Akashi kaikyo ทางด้านอากาศพลศาสตร์..... | 83 |
| 4.4 การทดสอบแบบจำลองสะพานในอุโมงค์ลม..... | 84 |

| | |
|---|-----|
| 5. ผลการวิจัย..... | 88 |
| 5.1 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและมุมการบิดของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo... | 90 |
| 5.2 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและมุมการบิดของแบบจำลองสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม..... | 106 |
| 6. วิเคราะห์ผลการวิจัย..... | 126 |
| 6.1 สะพาน Akashi kaikyo | 126 |
| 6.2 สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม | 133 |
| 7. สรุปผลการวิจัย | 144 |
| ภาคผนวก | |
| ผนวก ก การปรับแก้ความเร็วลม | 146 |
| ผนวก ข TMD ของสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม..... | 150 |
| ผนวก ค ตัวอย่างสัญญาณการตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ในพิสัยเวลา | 152 |
| ผนวก ง โปรแกรม laser_ring_cov.m ในการหาความถี่ในการสั่นและความหน่วงของ สะพาน | 179 |
| บรรณานุกรม | 187 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างที่รับแรงแบบสถิตและแรงแบบพลศาสตร์..... | 15 |
| ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ TMD ตามรูปแบบการสั่นของโครงสร้างเมื่ออัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างน้อยมาก..... | 37 |
| ตารางที่ 3.3 ชนิดของการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างภายในอุโมงค์ลมและข้อมูลที่ได้..... | 47 |
| ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่คล้ายคลึงกันของแบบจำลองสะพานและสะพานจริง..... | 58 |
| ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติในการย่อส่วนของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo..... | 60 |
| ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติในการย่อส่วนของแบบจำลองสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม..... | 60 |
| ตารางที่ 4.4 สรุปการออกแบบสปริงตามความถี่..... | 65 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าความหน่วงของ TMD (V1), $\mu = 1\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่าง ๆ..... | 69 |
| ตารางที่ 4.6 ตารางการออกแบบ TMD แบบที่ 1..... | 71 |
| ตารางที่ 4.7 ค่าความหน่วงของ TMD (V3), $\mu = 1\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่าง ๆ..... | 71 |
| ตารางที่ 4.8 ค่าความหน่วงของ TMD (T1), $\mu = 1\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่าง ๆ..... | 72 |
| ตารางที่ 4.9 ค่าความหน่วงของ TMD (V1), $\mu = 3\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่าง ๆ..... | 73 |
| ตารางที่ 4.10 ค่าความหน่วงของ TMD (V3), $\mu = 3\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่าง ๆ..... | 73 |
| ตารางที่ 4.11 ค่าความหน่วงของ TMD (T1), $\mu = 3\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่าง ๆ..... | 74 |
| ตารางที่ 4.12 ขนาดของ damper plate และสปริงของ TMD แบบที่ 1..... | 75 |
| ตารางที่ 4.13 ตารางการออกแบบ TMD แบบที่ 2..... | 76 |
| ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงขนาดของ damper plate และสปริงของ TMD แบบที่ 2..... | 77 |
| ตารางที่ 4.15 ระยะเวลาติดตั้ง TMD (T1)..... | 78 |
| ตารางที่ 5.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) แบบยึดและไม่ยึดด้านข้างสะพาน เมื่อไม่ติดตั้ง TMD..... | 99 |
| ตารางที่ 5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) แบบไม่ยึดด้านข้างสะพานก่อนและหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน เมื่อไม่ติดตั้ง TMD..... | 100 |
| ตารางที่ 5.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) แบบยึดด้านข้างสะพานก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% | 101 |

| | |
|--|-----|
| ตารางที่ 5.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) แบบไม่มียึดด้านข้างสะพานหลังปรับปรุงหน้าตัด สะพาน ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%..... | 102 |
| ตารางที่ 5.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) แบบไม่มียึดด้านข้างสะพานหลังปรับปรุงหน้าตัด สะพาน ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 3% | 103 |
| ตารางที่ 5.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) แบบไม่มียึดด้านข้างสะพานหลังปรับปรุงหน้าตัด สะพาน แปรผันมุมปะทะลมและไม่ติดตั้ง TMD..... | 105 |
| ตารางที่ 5.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%..... | 114 |
| ตารางที่ 5.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 2% | 117 |
| ตารางที่ 5.9 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 4% | 120 |
| ตารางที่ 5.10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพานวง แหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% และแปรผันความหน่วง.. | 123 |
| ตารางที่ 6.1 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% สำหรับสะพาน Akashi kaikyo ก่อนปรับปรุง หน้าตัดสะพาน (ติดตั้งที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) | 127 |
| ตารางที่ 6.2 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% สำหรับสะพาน Akashi kaikyo หลังปรับปรุง หน้าตัดสะพาน (ติดตั้งที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) | 130 |
| ตารางที่ 6.3 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 3% สำหรับสะพาน Akashi kaikyo หลังปรับปรุง หน้าตัดสะพาน (ติดตั้งที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) | 131 |
| ตารางที่ 6.4 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวง แหวนอุตสาหกรรม | 135 |
| ตารางที่ 6.5 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 2% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวง แหวนอุตสาหกรรม | 136 |
| ตารางที่ 6.6 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 4% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวง แหวนอุตสาหกรรม | 137 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 6.7 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% แปรผันความหน่วง สำหรับสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม | 138 |
| ตารางที่ 6.8 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวง แหวนอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding | 139 |
| ตารางที่ 6.9 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 2% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวง แหวนอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding | 140 |
| ตารางที่ 6.10 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 4% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวง แหวนอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding | 141 |
| ตารางที่ 6.11 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% แปรผันความหน่วง สำหรับสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding | 142 |
| ตารางที่ 6.12 ความเร็วลมที่ทำให้เกิด vortex shedding และ flutter instability กับแบบจำลอง สะพาน Akashi kaiyo จริงและสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมจริง | 143 |

สารบัญรูปประกอบ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 สะพาน Tacoma Narrow, 1994 (USA)..... | 2 |
| รูปที่ 1.2 แผนที่แสดงที่ตั้งของสะพาน Akashi Kaikyo..... | 3 |
| รูปที่ 1.3 สะพาน Akashi Kaikyo..... | 4 |
| รูปที่ 1.4 รูปด้านข้างของสะพาน Akashi Kaikyo..... | 4 |
| รูปที่ 1.5 รูปตัดของสะพาน Akashi Kaikyo..... | 5 |
| รูปที่ 1.6 รูปหน้าตัด และ เสาหลัก (Main Tower) ของสะพาน Akashi Kaikyo..... | 5 |
| รูปที่ 1.7 แผนที่แสดงที่ตั้งของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม..... | 6 |
| รูปที่ 1.8 สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม..... | 7 |
| รูปที่ 1.9 แบบตามแนวยาวสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม | 7 |
| รูปที่ 1.10 แบบหน้าตัดช่วงกลางสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม..... | 7 |
| รูปที่ 3.1 แสดงระบบการสั่นของโครงสร้าง..... | 16 |
| รูปที่ 3.2 ระบบ MDOF ที่มีแรงภายนอกกระทำ..... | 17 |
| รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของลม..... | 23 |
| รูปที่ 3.4 ความถี่ Vortex shedding กับความเร็วลมที่พัดผ่าน โครงสร้าง..... | 25 |
| รูปที่ 3.5 รูปแบบของระลอกลมที่ Reynolds number ต่างกัน..... | 27 |
| รูปที่ 3.6 ผลของมุมปะทะของลมต่อโครงสร้าง..... | 31 |
| รูปที่ 3.7 การเกิด torsional divergence กับ โครงสร้าง..... | 33 |
| รูปที่ 3.8 ระบบ TMD ที่ติดตั้งกับ โครงสร้าง..... | 35 |
| รูปที่ 3.9 การตอบสนองของ โครงสร้างและ TMD ต่อแรงภายนอกที่ความถี่ต่างๆ..... | 36 |
| รูปที่ 3.10 อุโมงค์ลมช่วงยาวแบบเปิด ของ TU-AIT..... | 40 |
| รูปที่ 3.11 อุโมงค์ลมช่วงยาวแบบปิด..... | 40 |
| รูปที่ 3.12 อุโมงค์ลมช่วงสั้นแบบเปิดของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..... | 41 |
| รูปที่ 3.13 การจำลองลักษณะลมธรรมชาติและอาคาร โดยรอบ..... | 42 |
| รูปที่ 3.14 ลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยที่แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินในภูมิภาคแบบ ต่างๆ ตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา [ASCE 7-95]..... | 42 |
| รูปที่ 3.15 การจำลองลักษณะลมธรรมชาติในอุโมงค์ลมช่วงสั้นโดยวิธีแบบใช้ตัวเร่ง..... | 43 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.16 การติดตั้งหัววัดความดันบนผิวของแบบจำลองแข็งเพื่อวัดการผันผวนของความดันที่บริเวณหลังคาโค้ง (รูป ก) และผนังรอบโครงสร้างเนื่องจากแรงลม (รูป ข)..... | 44 |
| รูปที่ 3.17 ชนิดของแบบจำลองยึดหยุ่น..... | 44 |
| รูปที่ 3.18 แบบจำลองยึดหยุ่นชนิด Rocking Model..... | 45 |
| รูปที่ 3.19 แบบจำลองยึดหยุ่นของอาคารสูงชนิด Lump-mass Model..... | 45 |
| รูปที่ 3.20 สะพาน Akashi Kaikyo (ก)แบบจำลองยึดหยุ่นของสะพานในอุโมงค์ลม (ข)การโค้งตัวด้านข้างของสะพานภายในอุโมงค์ลม..... | 45 |
| รูปที่ 3.21 แบบจำลองหน้าตัดแบบ Sectional Model..... | 46 |
| รูปที่ 3.22 แบบจำลองแบบ High-Frequency Force Balance..... | 46 |
| รูปที่ 3.23 Full bridge model | 50 |
| รูปที่ 3.24 Taut strip model..... | 50 |
| รูปที่ 3.25 Section Model..... | 51 |
| รูปที่ 4.1 ความถี่ธรรมชาติ (Hz) และรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน Akashi kaikyo..... | 59 |
| รูปที่ 4.2 แบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo ก่อนติดตั้งในอุโมงค์ลม..... | 61 |
| รูปที่ 4.3 แบบจำลองวงแหวนอุตสาหกรรม ก่อนติดตั้งในอุโมงค์ลม..... | 62 |
| รูปที่ 4.4 การติดตั้งสปริงเข้ากับแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo..... | 63 |
| รูปที่ 4.5 แสดงระยะการติดตั้งสปริงเข้ากับแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo..... | 65 |
| รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง TMD เข้ากับสะพานที่ด้านหัวและด้านท้ายสะพาน..... | 66 |
| รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของ TMD แบบที่ 1..... | 67 |
| รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V1), $\mu = 1\%$ | 69 |
| รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบของ TMD ควบคุม (V1), $\mu = 1\%$ | 70 |
| รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V3), $\mu = 1\%$ | 72 |
| รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (T1), $\mu = 1\%$ | 72 |
| รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V1), $\mu = 3\%$ | 73 |
| รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V3), $\mu = 3\%$ | 74 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (T1), $\mu = 3\%$ | 74 |
| รูปที่ 4.15 ส่วนประกอบของ TMD แบบที่ 2..... | 76 |
| รูปที่ 4.16 ระยะเวลาติดตั้ง TMD (T1)..... | 77 |
| รูปที่ 4.17 การหาค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและมุมในการบิดของสะพาน..... | 79 |
| รูปที่ 4.18 Laser displacement sensor..... | 79 |
| รูปที่ 4.19 แผนผังการติดตั้ง Laser displacement sensor..... | 80 |
| รูปที่ 4.20 Terminal block..... | 80 |
| รูปที่ 4.21 DAQ card..... | 81 |
| รูปที่ 4.22 Accelerometer..... | 81 |
| รูปที่ 4.22 Spring connector..... | 82 |
| รูปที่ 4.23 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบวัดค่า..... | 82 |
| รูปที่ 4.24 กราฟการตอบสนองของสะพาน Long's Creek Bridge ภายใต้การปรับแต่งหน้าตัดสะพานแบบต่างๆ..... | 83 |
| รูปที่ 4.25 สะพาน Akashi kaikyo มีและไม่มีช่องเปิดกลางสะพาน..... | 84 |
| รูปที่ 4.26 สะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมติดตั้งในอุโมงค์ลม..... | 84 |
| รูปที่ 4.27 อุโมงค์ลม..... | 85 |
| รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีการยึดกับไม้ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติดตั้ง TMD | 90 |
| รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีการยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและติดตั้ง TMD มวล1% | 91 |
| รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนและหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติดตั้ง TMD | 92 |
| รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ไม่ติดตั้ง TMD และแปรผันมุมปะทะ..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ติดตั้ง TMD มวล 1% และแปรงฟันมุมปะทะ..... | 94 |
| รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ติดตั้ง TMD มวล 3% | 95 |
| รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ติดตั้ง TMD แปรงฟันมวล 1% และ 3% | 96 |
| รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลของความหน่วงสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% และ 3% | 97 |
| รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V4-T2) ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และไม่ติดตั้ง TMD..... | 98 |
| รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% | 106 |
| รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลของการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 2% | 107 |
| รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลัง ติดตั้ง TMD มวล 4% | 108 |
| รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ควบคุมทั้งแนวตั้ง V1และการบิด..... | 109 |
| รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ควบคุมแนวตั้ง V1 | 110 |
| รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ควบคุมการบิด T1 | 111 |
| รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมทั้งแนวตั้ง V1และการบิด T1 และแปรงฟันความหน่วง..... | 112 |
| รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบผลของความหน่วงสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% | 113 |
| รูปที่ 6.1 มุมปะทะของแรงลมต่อสะพาน Akashi kaikyo | 128 |
| รูปที่ ก.1 Flow Master ของ DANTEC | 146 |

| | |
|---|-----|
| รูปที่ ก.2 Wind Monitor model 05103V ของ YOUNG | 147 |
| รูปที่ ก.3 Air Velocity Transducer ของ TSI | 147 |
| รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม กับรอบของพัดลมที่ Turn Table # 2 | 148 |
| รูปที่ ก.5 การปรับแก้ค่าความเร็วระหว่าง Flow Master กับ Hot Sphere Anemometer | 149 |
| รูปที่ ข.1 TMD 1% สำหรับความถี่ธรรมชาติ V1 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo | 150 |
| รูปที่ ข.2 TMD 1% สำหรับความถี่ธรรมชาติ V3 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo | 150 |
| รูปที่ ข.3 TMD 1% สำหรับความถี่ธรรมชาติ T1 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo | 150 |
| รูปที่ ข.4 TMD 1% สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม | 151 |
| รูปที่ ข.5 TMD 2% สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม | 151 |
| รูปที่ ข.6 TMD 4% สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม | 151 |
| รูปที่ ค.1 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.51 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และก่อนติดตั้ง TMD | 152 |
| รูปที่ ค.2 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.12 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และก่อนติดตั้ง TMD | 153 |
| รูปที่ ค.3 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 5.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และก่อนติดตั้ง TMD | 154 |
| รูปที่ ค.4 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% | 155 |
| รูปที่ ค.5 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.12 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% | 156 |
| รูปที่ ค.6 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 6.08 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% | 157 |
| รูปที่ ค.7 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและก่อนติดตั้ง TMD | 158 |
| รูปที่ ค.8 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.12 m/s | |

| | |
|--|-----|
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและก่อนตัด TMD | 159 |
| รูปที่ ค.9 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 6.54 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและก่อนตัด TMD | 160 |
| รูปที่ ค.10 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังตัด TMDมวล 1% .. | 161 |
| รูปที่ ค.11 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.54 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังตัด TMDมวล 1% .. | 162 |
| รูปที่ ค.12 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 7.75 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังตัด TMDมวล 1% .. | 163 |
| รูปที่ ค.13 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังตัด TMDมวล 3% .. | 164 |
| รูปที่ ค.14 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 6.52 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังตัด TMDมวล 3% .. | 165 |
| รูปที่ ค.15 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 13.51 m/s | |
| ที่ความถี่ธรรมชาติV3-T1หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังตัด TMDมวล 3% .. | 166 |
| รูปที่ ค.16 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s | |
| ก่อนตัดTMD..... | 167 |
| รูปที่ ค.17 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s | |
| ก่อนตัดTMD | 168 |
| รูปที่ ค.18 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 8.42 m/s | |
| ก่อนตัดTMD | 169 |
| รูปที่ ค.19 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 1% | 170 |
| รูปที่ ค.20 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 1% | 171 |
| รูปที่ ค.20 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 9.94 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 1% | 172 |
| รูปที่ ค.21 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 2% | 173 |

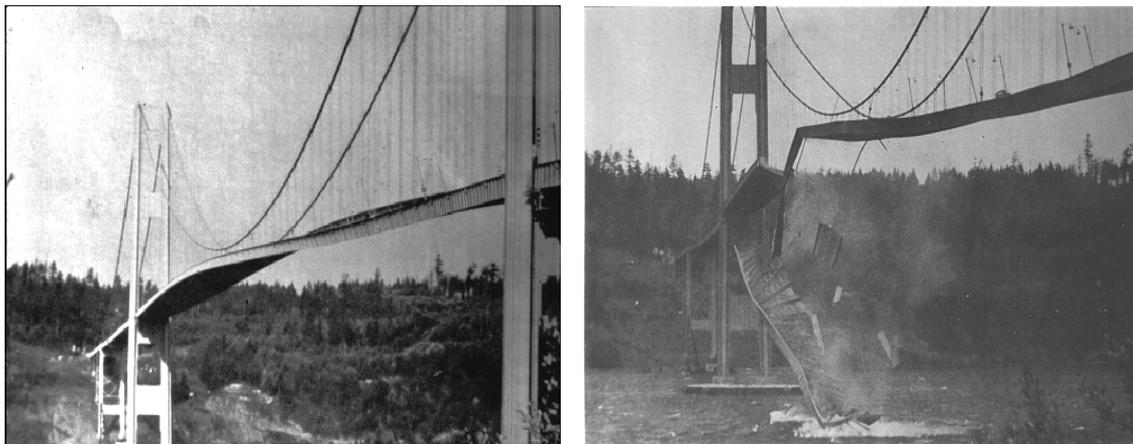
| | |
|---|-----|
| รูปที่ ค.22 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 2% | 174 |
| รูปที่ ค.23 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 9.07 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 2% | 175 |
| รูปที่ ค.24 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 4% | 176 |
| รูปที่ ค.25 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 4% | 177 |
| รูปที่ ค.26 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 13.61 m/s | |
| หลังตัดTMD มวล 4% | 178 |

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันโครงการก่อสร้างสะพานแขวน (Suspension Bridge) และสะพานขึง (Cable-Stayed Bridge) ต่างๆ มีการนำเอาเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาใช้ในงานออกแบบและก่อสร้างกันอย่างกว้างขวางมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างสะพานที่มีช่วงยาวมากๆ หรือสะพานที่ข้ามแม่น้ำกว้างๆ ซึ่งโครงสร้างสะพานเหล่านั้นมักจะมีขนาดใหญ่และช่วงต่อม่อสะพานยาวนาน นอกจากนี้ การออกแบบและก่อสร้างสะพานในปัจจุบัน ก็สามารถทำได้มีช่วงยาวมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สะพานมีน้ำหนักน้อย ส่วนใหญ่จึงออกแบบเป็นโครงสร้างเหล็ก มีผลทำให้โครงสร้างดังกล่าวมีความอ่อนตัวมาก ทำให้ผลของแรงลมจึงมีผลกระทบ (Wind Effect) มากกับสะพานช่วงยาว (Long Span Bridges) แบบนี้อย่างมาก ตัวอย่างเช่น สะพาน Akashi kaikyo ในประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นสะพานแขวน (Suspension Bridge) ที่มีช่วงกลางสะพานยาวที่สุดในโลก คือยาวถึง 1,991 เมตร ส่วนในประเทศไทยสะพานที่มีช่วงยาว ได้แก่ สะพานพระราม 9 ซึ่งเป็นสะพานขึงที่มีความยาวทั้งหมด 782 เมตร โดยมีความยาวช่วงกลางสะพานถึง 450 เมตร และสะพานพระราม 8 เป็นสะพานที่มีความยาวทั้งหมด 475 เมตร และมีช่วงกลางสะพานยาวถึง 300 เมตร สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม มีความยาวช่วงข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา 398 เมตรและความยาวตัวสะพานด้านหลัง 152 เมตร นอกจากนี้ยังมีสะพานอีกมากมายทั่วโลกที่ช่วงกลางของสะพานยาวมากๆ

การออกแบบโครงสร้างสะพานส่วนใหญ่ในอดีตนั้น มิได้มีการคำนึงถึงผลกระทบทางพลศาสตร์ จะคำนึงแต่เพียงทางด้านสถิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากยังขาดความรู้ความเข้าใจถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่เพียงพอ ทำให้โครงสร้างสะพานที่สร้างมาตั้งแต่อดีต ที่มีช่วงกลางของสะพานยาวๆ มีรูปร่างของหน้าตัดสะพานที่ไม่เหมาะสม ทำให้เกิดปัญหาทางพลศาสตร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะได้รับผลกระทบมาจากแรงลม นอกจากนี้สะพานช่วงยาวยังสั้นไหวได้ง่ายเนื่องจากความแปรปรวนของลมอีกด้วย ปัจจุบันพบว่ามีสะพานจำนวนมากทั่วโลกที่กำลังได้รับผลกระทบจากแรงลมอยู่ในขณะนี้ และมีสะพานอีกจำนวนไม่น้อยที่ถึงขั้นพังทลายลงไปแล้ว ตัวอย่างเช่น สะพาน Tacoma Narrows ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สะพาน Tacoma Narrow , 1940 (USA)

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การวิบัติของสะพานแขวนช่วงยาวในอดีตจากผลของแรงลมนั้น ซึ่งแม้จะเกิดที่ความเร็วลมต่ำๆ ก็ตาม จึงทำให้มีการศึกษาผลกระทบจากแรงลมที่กระทำกับสะพานมากขึ้น จากการศึกษาวิจัยต่างๆ ในอดีตที่ผ่านมา ทำให้พบสาเหตุของการวิบัติของสะพานซึ่งส่วนใหญ่เกิดมาจากความไม่เหมาะสมของหน้าตัดสะพานที่ไม่ลู่ลม ดังนั้นการออกแบบสะพานแขวนช่วงยาวในปัจจุบันจึงต้องมีการทดสอบแบบจำลองหน้าตัดของสะพานหลายๆ แบบเพื่อหาการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์จากแรงลม ไม่ว่าจะเป็นการตอบสนองแบบ buffeting การสั่นของสะพานจากการเกิด vortex shedding และการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter เพื่อให้ได้หน้าตัดสะพานที่เหมาะสมที่สุดในแง่การลู่ลมก่อนนำไปก่อสร้างจริง การทดสอบแบบจำลองของสะพานในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel Test) เป็นวิธีการทดสอบหาหน้าตัดสะพานที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ และเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบัน การทดสอบแบบจำลองของสะพานในอุโมงค์ลมมีอยู่สองแบบด้วยกัน คือ แบบจำลองสะพานทั้งสะพาน (Full Scale Model) และแบบจำลองหน้าตัดสะพาน (Section Model)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะหาการตอบสนองของสะพานทางด้านพลศาสตร์จากแรงลมคือ การหาความเร็วลมแบบราบเรียบ (Smooth Wind) ที่ทำให้เกิดการสั่นของสะพานจากการเกิด vortex shedding ของสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม และการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter ของสะพาน Akashi kaikyo โดยการทดสอบแบบจำลองหน้าตัดสะพานในอุโมงค์ลม ซึ่งการทดสอบจะหาการตอบสนองทั้งก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน้าวงลดการ

ตอบสนอง (Tuned Mass Damper; TMD) ของแบบจำลองหน้าตัดของทั้งสองสะพาน นอกจากนี้ยังหาผลการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ก่อนและหลังการปรับปรุงหน้าตัดสะพาน

งานวิจัยนี้ได้เลือกสะพาน Akashi kaikyo ซึ่งเป็นสะพานแขวนในประเทศญี่ปุ่นและมีโครงสร้างแบบโครงถัก Truss Stiffened Girder นอกจากนี้ยังเป็นสะพานแขวนช่วงยาวที่สุดในโลก และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมซึ่งเป็นสะพานจิงในประเทศไทยและเป็นสะพานที่เพิ่งสร้างเสร็จเมื่อปี พ.ศ. 2549 มาเป็นแบบจำลองในการทดสอบ

1.1.1 ข้อมูลโดยสังเขปของสะพาน Akashi Kaikyo

สะพาน Akashi kaikyo เป็นสะพานข้ามช่องแคบ Akashi และเชื่อมระหว่างเมืองโกเบบนเกาะฮอนชู กับ เกาะอาวจิมาในอำเภอเฮียวโก ของประเทศญี่ปุ่น สร้างเสร็จและเปิดใช้งานเมื่อ 5 เมษายน 2541 สะพาน Akashi kaikyo เป็นสะพานแขวน (Suspension Bridge) ที่มีความยาวของสะพานช่วงกลาง (Main Span) ถึง 1,991 เมตร มีความยาวของสะพานทั้งหมด 3,911 เมตร จึงเป็นสะพานแขวนที่ยาวที่สุดในโลก



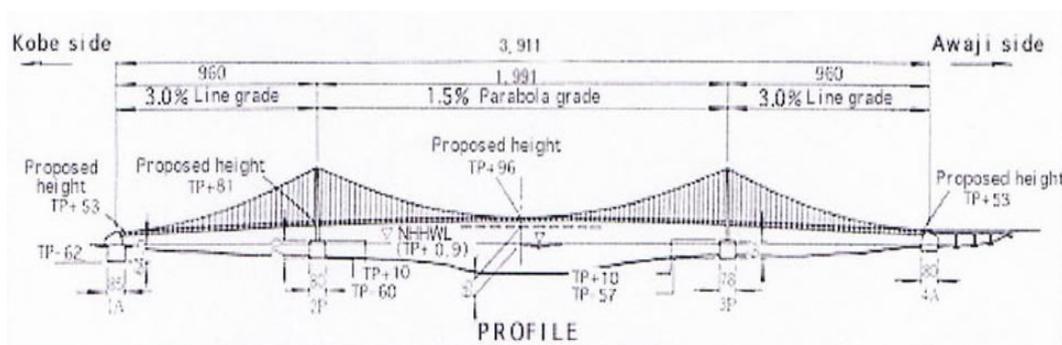
รูปที่ 1.2 แผนที่แสดงที่ตั้งของสะพาน Akashi Kaikyo



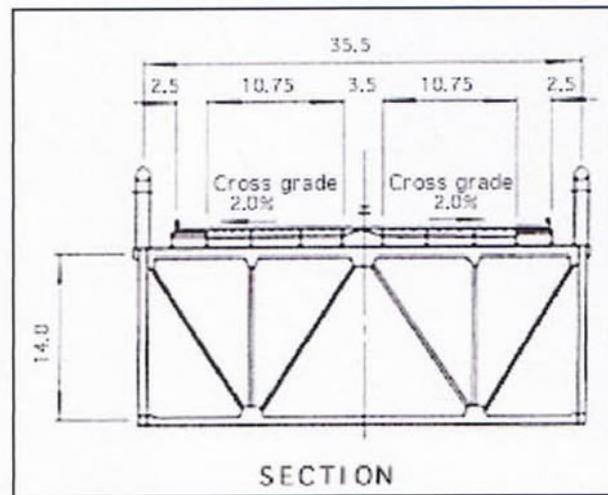
รูปที่ 1.3 สะพาน Akashi Kaikyo

ลักษณะทางกายภาพของสะพาน Akashi Kaikyo

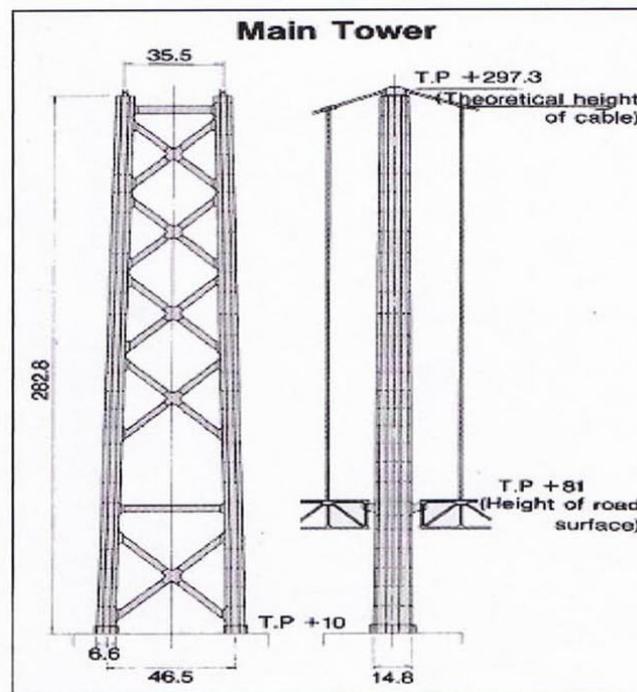
- 1) สะพานมีความยาวช่วงกลางสะพาน(Main span) 1,991 เมตร ความยาวรวม 3,991 เมตร
- 2) ตอม่อหลัก (Main Pier) ทั้งสองลูกออกแบบเป็นแบบฐานรากแผ่ วางบนชั้นหินแกรนิต ก่อสร้างแบบวิธี “Laying Down Caisson Method” ที่มีกระแสน้ำเชี่ยวและมีความลึกมาก ดังนั้น การสร้างฐานรากที่มีทั้งขนาดใหญ่และมีความลึกมากจึงต้องใช้เทคโนโลยีที่มีความทันสมัยอย่างมาก และฐานรากยังถูกออกแบบให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ด้วย
- 3) เสาหลักของสะพาน (Main Tower) ทำด้วยเหล็กกล้า มีความสูงถึง 282.8 เมตร
- 4) สายเคเบิลหลัก (Main Cable) เป็นเคเบิลที่ถูกพัฒนามาจากลวด Galvanized กำลังสูง ซึ่งสามารถรับแรงดึงได้ถึง 1,800 N/sq.mm.
- 5) โครงสร้างของสะพานถูกออกแบบเป็น Truss Stiffened Girder มีความลึก 14 เมตร และความกว้างรวม 30 เมตร รับพิวจราจร 6 เลน



รูปที่ 1.4 รูปด้านข้างของสะพาน Akashi Kaikyo



รูปที่ 1.5 รูปตัดของสะพาน Akashi Kaikyo



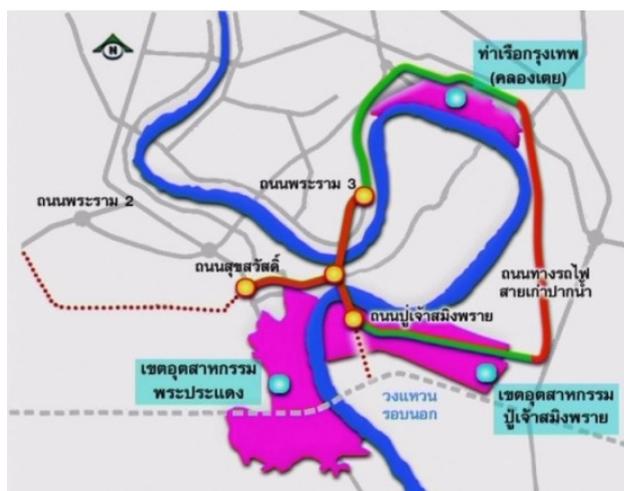
รูปที่ 1.6 รูปหน้าตัด และเสาหลัก(Main Tower)ของสะพาน Akashi kaikyo

1.1.2 ข้อมูลโดยสังเขปของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาสำหรับวงแหวนอุตสาหกรรม ลักษณะเป็นสะพานซิง ขนาด 7 ช่องจราจร ทางด้านใต้เชื่อมระหว่าง ตำบลทรงคะนอง กับตำบลหญ้าแพรก อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ มีพิธีเปิดอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2549 แต่ก่อนหน้านั้นได้เปิดใช้ตั้งแต่วันที่ 20 กันยายน 2549

ช่วงเหนือ เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาทางด้านเหนือ เชื่อมระหว่างแขวงบางโพงพาง เขตยานนาวา กรุงเทพมหานคร กับตำบลทรงคะนอง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เป็นสะพานซิงเคเบิลคู่ขนาดกว้าง 7 ช่องจราจร ที่ประกอบด้วยเสาสูง จำนวน 2 ต้น ความยาวสะพานช่วงข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา 326 เมตร เป็นโครงสร้างประกอบระหว่างคอนกรีต และเหล็ก และความยาวตัวสะพานในช่วงด้านหลัง 128 เมตร เป็นโครงสร้างแบบคอนกรีตอัดแรง มีความสูงจากระดับน้ำสูงสุดที่กึ่งกลางสะพานประมาณ 50 เมตร เพื่อให้เรือบรรทุกสินค้าสามารถแล่นลอดได้

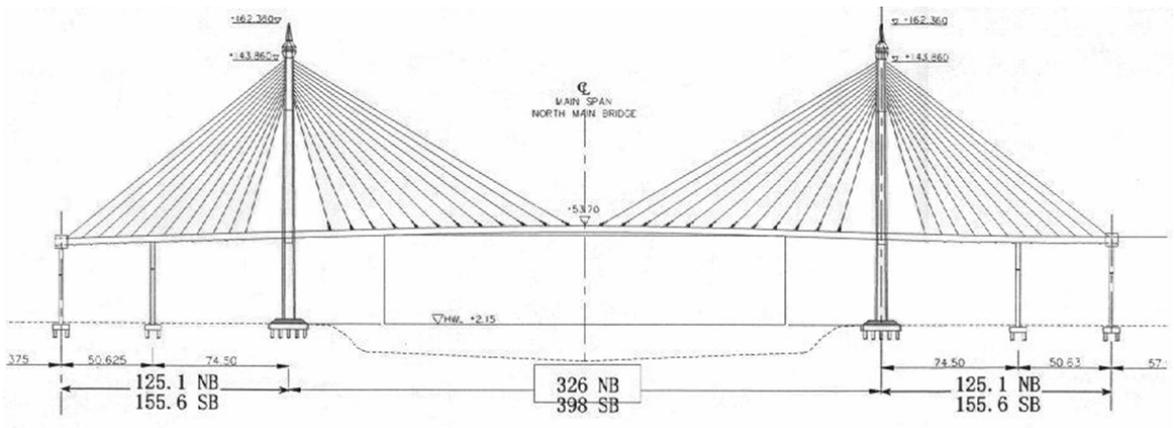
ช่วงใต้ เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาทางด้านใต้ เชื่อมระหว่างตำบลทรงคะนองกับตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เป็นสะพานซิงเคเบิลคู่ขนาดกว้าง 7 ช่องจราจร ที่ประกอบด้วยเสาสูง จำนวน 2 ต้น ความยาวสะพานช่วงข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา 398 เมตร เป็นโครงสร้างประกอบระหว่างคอนกรีต และเหล็ก และความยาวตัวสะพานในช่วงด้านหลัง 152 เมตร เป็นโครงสร้างแบบคอนกรีตอัดแรง มีความสูงจากระดับน้ำสูงสุดที่กึ่งกลางสะพานประมาณ 50 เมตร เพื่อให้เรือบรรทุกหรือเรือขนส่งจากปากแม่น้ำเจ้าพระยาสามารถแล่นลอดได้ เพื่อเข้าสู่ท่าเรือคลองเตย



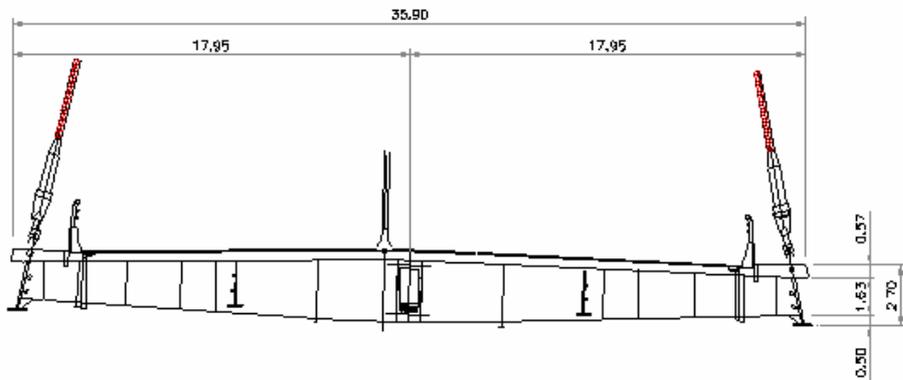
รูปที่ 1.7 แผนที่แสดงที่ตั้งของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.8 สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.9 แบบตามแนวยาวสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.10 แบบหน้าตัดช่วงกลางสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงลมที่มีผลต่อสะพานที่มีช่วงกลางยาว (Long Span Bridge) ภายใต้อิทธิพลของแรงลม โดยการทดสอบแบบจำลองหน้าตัดสะพานในอุโมงค์ลม ของสะพาน Akashi Kaikyo ของประเทศญี่ปุ่น และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม ของประเทศไทย
- 2) เพื่อศึกษาการทำแบบจำลองย่อส่วนสะพานในสัดส่วนทางวิศวกรรม เพื่อให้ได้คล้ายคลึงกับสะพานจริง ทั้งรูปร่างและคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์
- 3) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหว และการตอบสนองของสะพานช่วงยาวภายใต้อิทธิพลของแรงลม ทั้งก่อนและหลังติดตั้งตัวมวลหน่วง (Tuned Mass Damper; TMD) โดยการทดสอบแบบจำลองหน้าตัดสะพานในอุโมงค์ลม และการปรับปรุงหน้าตัดสะพานเพื่อลดการตอบสนอง

1.3 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์

- 1) สะพานที่ใช้เป็นต้นแบบในการทำแบบจำลอง Section Model คือ สะพาน Akashi Kaikyo ซึ่งเป็นสะพานแขวน (Suspension Bridge) ของประเทศญี่ปุ่น และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นสะพานค้ำ (Cable Stay Bridge) ของประเทศไทย
- 2) การทำแบบจำลองย่อส่วนสะพาน จะสร้างแบบจำลองแบบ Section Model ในบริเวณช่วงกลางของสะพาน Akashi Kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
- 3) ติดตั้งมวลหน่วง (Tuned Mass Damper; TMD) เพื่อลดการตอบสนองของสะพานภายใต้อิทธิพลของแรงลม ทั้งในแนวดิ่งและแนวการบิด ดังนี้

สะพาน Akashi kaikyo

- รูปแบบที่ 1 ติดตั้ง TMD มวล 1% และ 3% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม ที่ละรูปแบบการสั่นไหว คือ ในแนวดิ่งที่ 1,3 (V1,V3) และแนวการบิดที่ 1 (T1)
- รูปแบบที่ 2 ติดตั้ง TMD มวล 1% และ 3% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม พร้อมกันทั้งในแนวดิ่งที่ 1 (V1) กับแนวการบิดที่ 1 (T1) และในแนวดิ่งที่ 3 (V3) กับแนวการบิดที่ 1 (T1)

สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

- รูปแบบที่ 1 ติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม ทีละรูปแบบการสั่นไหว คือ ในแอมพลิจูดที่ 1 (V1) และแอมพลิจูดที่ 1 (T1)
 - รูปแบบที่ 2 ติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม พร้อมกันทั้งในแอมพลิจูดที่ 1 (V1) กับแอมพลิจูดที่ 1 (T1)
 - รูปแบบที่ 3 ติดตั้ง TMD มวล 1% ด้วยความหน่วงน้อยกว่าและมากกว่ามวลหน่วงที่เหมาะสม พร้อมกันทั้งในแอมพลิจูดที่ 1 (V1) กับแอมพลิจูดที่ 1 (T1)
- 4) ปรับปรุงหน้าตัดของสะพาน Akashi kaikyō เพื่อลดการตอบสนองภายใต้แรงลม

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ของสะพานแขวน Akashi Kaikyo ในวิทยานิพนธ์นี้ จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการศึกษาวิจัยต่างๆ ในอดีตที่ผ่านมาเป็นแนวทางในการศึกษา ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่มงานวิจัยได้แก่ กลุ่มแรกเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์ของสะพานช่วงยาว กลุ่มที่ 2 เกี่ยวกับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมและกลุ่มที่ 3 เกี่ยวกับการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยใช้มวลหน่วง (Tuned Mass Damper; TMD)

งานวิจัยกลุ่มที่ 1 การศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ของสะพานช่วงยาว

1) วิโรจน์ บุญญภิญโญ, Miyata T., Yamada H.(1995) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Advanced Aerodynamic Analysis of Suspension Bridge by State-Space Approach ซึ่งได้เสนอแบบจำลองพลศาสตร์ของลมกับโครงสร้าง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นสูง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter และการตอบสนองแบบ buffeting ในพิสัยเวลา (Time domain)

2) พีระศักดิ์ พานิชไตรภพ (2543) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การควบคุมการสั่นไหวของสะพานแขวนช่วงยาวภายใต้แรงลม ด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสม ซึ่งได้เสนอการวิเคราะห์การควบคุมการสั่นไหวของสะพานแขวนช่วงยาวภายใต้แรงลมด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสม โดยได้เสนอแบบจำลองพลศาสตร์ของแรงลมกับโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นสูง ที่สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter และการตอบสนองแบบ buffeting ในพิสัยเวลา สมการสมดุลทางพลศาสตร์ภายใต้แรงลมแสดงในรูปพิสัยหลัก และ state-space การสร้างแบบจำลองแปรปรวนใช้วิธี ARMA การคำนวณความหน่วงในแต่ละรูปแบบการสั่นไหวของระบบโครงสร้างเมื่อติดตั้งมวลหน่วง (TMD) หาได้โดยใช้วิธีรวมรูปแบบการสั่นไหวหลัก 2 ครั้ง แล้วนำเมตริกซ์ความหน่วงที่ได้มาใช้ในการคำนวณผลตอบสนองภายหลังการติดตั้ง TMD ตัวอย่างการคำนวณได้ใช้สะพานแขวน Akashi Kaikyo ซึ่งมีความยาวช่วงกลาง 1,991 เมตร มาเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ผลการวิจัยพบว่า การติดตั้ง TMD ควบคุมการสั่นไหวในทิศทางแนวตั้งและแนวราบลำดับที่ 1 ด้วยอัตราส่วนมวล TMD 1% ในแต่ละทิศทาง

สามารถลดผลการตอบสนองแบบ buffeting ของสะพานได้ประมาณ 14-24% ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 20 เมตร/วินาทีเมื่อความเร็วลมเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นประสิทธิภาพของ TMD ในแนวการบิดเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากผลของอัตราส่วนความหน่วงจากการสั่นไหว ร่วมระหว่างสะพานกับลมในทิศทางแนวการบิดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของ TMD ในทิศทางแนวตั้งและแนวราบมีค่าลดลง เนื่องจากผลของอัตราส่วนความหน่วงจากการสั่นไหวร่วมระหว่างสะพานกับลมมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นและผลการวิจัยยังพบว่าการติดตั้ง TMD ไม่ทำให้ความเร็วลมวิกฤติที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ

3) อคูลย์ อักษร (2546) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ Aerodynamics และการควบคุมการสั่นไหวของสะพานแขวนช่วงยาว ได้ศึกษาการตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ของสะพานแขวนช่วงยาว โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของลมกับโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ขั้นสูงและการควบคุมการสั่นไหวของสะพานภายใต้แรงลมด้วยมวลหน่วง (TMD) ที่ความเร็วลมต่างๆ เหมือนกับงานวิจัยของ วิโรจน์ บุญญภิญโญ และพีระศักดิ์ พานิชไตรภพ (2003) แต่พิจารณาการควบคุมการสั่นไหวขณะกำลังก่อสร้างด้วย พบว่า ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 20 เมตร/วินาที การควบคุมการสั่นไหวในทิศทางแนวตั้งและแนวราบลำดับที่ 1 ด้วยอัตราส่วนมวล TMD 1% ในแต่ละทิศทางสามารถลดผลการตอบสนองแบบ buffeting ของสะพานได้ประมาณ 14-24% เมื่อความเร็วลมเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นเป็น 60 เมตร/วินาที สามารถลดผลการตอบสนองได้ประมาณ 59% เนื่องจากผลของอัตราส่วนความหน่วงจากการสั่นไหวร่วมระหว่างสะพานกับลมในทิศทางแนวการบิด มีค่าลดลงเมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลของ TMD มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การติดตั้ง TMD ควบคุมการสั่นไหวในแนวตั้งลำดับที่ 1 ด้วยอัตราส่วนมวล TMD 1% และการควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดลำดับที่ 1 ด้วยอัตราส่วนมวล TMD 2% ของมวลของโมเมนต์ความเฉื่อยไม่ทำให้ความเร็วลมวิกฤติที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter ของสะพานเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ

4) Dinh Manh Duc (2546) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Wind Tuned Model Test of a Cable-Stayed Bridge in the South of Vietnam เป็นการศึกษาหาคูณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของสะพาน Rach Mieu ในประเทศเวียดนาม เปรียบเทียบกับหน้าตัดสะพานแบบตัว H และหน้าตัดสะพาน Rach Mieu แบบลู่ลม และหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ทางอากาศพลศาสตร์ คือ C_L, C_D, C_M และค่า flutter derivative และตรวจวัดการตอบสนองของสะพานภายใต้แรงลมโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม จากผลการวิจัยพบว่า หน้าตัดสะพานแบบตัว H ได้ผลการทดสอบเหมือนกับ Scanlan R.H., Tomko J.J. (1971) ส่วนหน้าตัดที่มีเสถียรภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่

ดีที่สุด คือ หน้าตัดสะพาน Rach Mieu แบบกลุ่ม และพบว่าความเร็วลมวิกฤติที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแบบ flutter มีค่ามากกว่าความเร็วลมสูงสุดที่ในบริเวณก่อสร้างสะพาน Rach Mieu นอกจากนี้ยังพบว่า มุมปะทะของลมต่างๆ ที่กระทำกับสะพานนั้นไม่มีผลต่อเสถียรภาพของอากาศพลศาสตร์ของสะพานอีกด้วย

งานวิจัยกลุ่มที่ 2 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

1) สุกิจย์ เทพมังกร , Kenny C.S. (1998) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การทดสอบแบบจำลองอาคารสูงในอุโมงค์ลม และการจำลองการโยกตัวของอาคารโดยวิธี Base Hinged Assembly ซึ่งเป็นการจำลองการโยกตัวของอาคารสูงโดย Base Hinged Assembly (BHA) technique ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารสูง เมื่อรับแรงลมโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม จากการศึกษาพบว่าความถี่ในการโยกตัวของ BHA model สามารถจำลองและปรับเปลี่ยนได้โดยการออกแบบ Stiffness ของ flexural elements ให้สอดคล้องกับค่าความถี่ที่ต้องการ นอกจากนี้ ข้อดีของ BHA model คือ สามารถทำได้ง่าย และการปรับเปลี่ยน mass, stiffness, damping รวมทั้งรูปทรงภายนอกของอาคารก็สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วและ BHA model ยังมีศักยภาพในการจำลองพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารสูงที่มี Coupled translational-tensional motion ได้เป็นอย่างดี

2) สุกิจย์ เทพมังกร เป็นหนึ่ง วานิชชัย ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และวรศักดิ์ กนกนุกุลชัย (2537) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารพญาพาร์ค ทาวเวอร์ เมื่อรับแรงลม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งได้เสนอผลงานการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารพญา พาร์ค ทาวเวอร์ ในอุโมงค์ลม โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารเมื่อรับแรงลม เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร่งในแนวราบที่เกิดจากการโยกตัว ณ ระดับกัฏตาอาคาร แล้วนำไปเปรียบเทียบกับระดับที่ยอมรับได้ ที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร และเพื่อศึกษาหาแนวทางที่เป็นไปได้ในการลดระดับการโยกตัว โดยการทดสอบในอุโมงค์ลมนี้ประกอบด้วย การจำลองสภาพลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม การสร้างแบบจำลองย่อส่วนที่มีความคล้ายคลึงกับอาคารจริงทั้งในด้านรูปร่างและคุณสมบัติทางจลศาสตร์ และการตรวจวัดการโยกตัวของแบบจำลองเมื่อรับลม จากการศึกษาพบว่า ในเกือบทุกกรณีอาคารจะมีระดับการโยกตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางลมสูงกว่าในแนวทิศทางลม ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลมในแนวตั้งฉากที่เกิดจากการม้วนตัวเป็นจังหวะของกระแสลมที่พัดผ่านตัวอาคาร และกลไกการกำทอนของโครงสร้าง และพบว่าค่าความเร่งที่เกิดขึ้นนี้สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ดี

จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่า วิธีการเพิ่ม Damping ให้กับอาคาร เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สามารถลดระดับการโยกตัวและความเร่งให้ลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน

งานวิจัยกลุ่มที่ 3 การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยใช้มวลหน่วง (Tuned Mass Damper; TMD)

1) โสภาค กาญจะโนสถ (2543) ได้ทำการวิจัยเรื่อง ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นที่เหมาะสมสำหรับมวลหน่วง งานวิจัยได้เสนอการพัฒนาระบบมวลหน่วง (Tuned Mass Damper; TMD) ให้สามารถใช้ตัวหน่วงที่มีพฤติกรรมการหน่วงแบบไม่เชิงเส้น โดยการทำการทดลองหาคุณสมบัติและพฤติกรรมของตัวหน่วงแบบของเหลวซึ่งมีคุณสมบัติการหน่วงแบบไม่เชิงเส้น จากนั้นจำลองระบบโครงสร้างที่ใช้มวลหน่วงที่มีคุณสมบัติการหน่วงแบบไม่เชิงเส้น และระบบโครงสร้างที่ใช้มวลหน่วงแบบเชิงเส้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยคอมพิวเตอร์และสร้างระบบมวลหน่วงที่มีคุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้น เพื่อใช้ทดสอบในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนกับระบบโครงสร้าง โดยได้ผลการวิจัย คือ ตัวหน่วงที่ทำการทดลองมีพฤติกรรมการหน่วงแบบไม่เชิงเส้นกำลังสองโดยแรงหน่วงที่เกิดขึ้นจะแปรผันกับความเร็วในการเคลื่อนที่ยกกำลังสองและความแตกต่างในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Reynolds Number ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นและแบบเชิงเส้นในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของแบบจำลองโครงสร้างตัวอย่างโดยคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าตัวคูณขยายทางพลวัต (Dynamic Magnification Factor; DMF) ของโครงสร้างเมื่อติดตั้งระบบมวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้นและแบบเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงสร้างที่ไม่มีระบบมวลหน่วง พบว่าระบบมวลหน่วงจะสามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้ เมื่อพิจารณาความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ (Sensitivity) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง พบว่าจะมีผลต่อทุกระบบ และเมื่อพิจารณาความไวของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงภายนอก พบว่ามวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นจะมีความมั่นคงมากกว่ามวลหน่วงแบบไม่เชิงเส้น ผลการทดสอบระบบมวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นกับระบบโครงสร้างจริงคือสะพานลอยคนข้ามโครงสร้างเหล็ก พบว่ามวลหน่วงชุดแบบไม่เชิงเส้นสามารถเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง และลดค่าความเร่งสูงสุดในการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเนื่องจากคนเดินได้ และผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้คำนวณไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2) Praveen K. Malhotra (1987) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Tuned Mass Damper (TMD) for Suppressing Wind Effects in Cable-Stayed Bridge Decks ซึ่งได้ศึกษาผลของการติดตั้ง TMD ในหลายๆ รูปแบบของการสั่นไหวของสะพานโดยใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบ TMD ของ Den Hartog และวิเคราะห์ระบบที่มีการติดตั้ง TMD โดยใช้วิธี mode superposition นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบผลของการตอบสนองใช้ TMD ตัวเล็กหลายๆ ตัวกับ TMD ตัวใหญ่เพียงตัวเดียว และการออกแบบ TMD หลายตัวเพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวในแต่ละรูปการสั่นไหว ผลการวิจัยพบว่า การติดตั้ง TMD สามารถลดการตัดตัวและการบิดตัวของสะพานจากการเกิด vortex-shedding และลมที่ปั่นป่วนได้ โดยที่ TMD สามารถเพิ่มความเร็ววิกฤติได้ถึง 15% และลดการตอบสนองของสะพานจากลมที่ปั่นป่วนได้ 35%

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของสะพานช่วงยาวทางอากาศพลศาสตร์ผ่านงานวิจัยในกลุ่มที่ 1 และศึกษารูปแบบต่างๆของการทดสอบในอุโมงค์ลมรวมทั้งการย่อส่วนของแบบจำลองผ่านงานวิจัยในกลุ่มที่ 2 ในส่วนของการศึกษาการออกแบบ TMD และการเลือกใช้ของเหลวหนืดและการหาขนาดของ damper plate สำหรับการจำลองความหน่วงของ TMD ได้ศึกษาผ่านงานวิจัยในกลุ่มที่ 3

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 พลศาสตร์ของโครงสร้าง (Dynamic of Structure)

การเคลื่อนที่ของวัตถุทำให้เกิดการสั่น การสั่นแบบอิสระ (free vibration) จะเกิดขึ้นในขณะที่ระบบเคลื่อนที่ไปมา โดยไม่มีแรงกระทำที่ระบบ ความถี่ของการเคลื่อนที่หรือการสั่นดังกล่าว เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติการสั่นของวัตถุ การสั่นแบบ forced vibration คือการเคลื่อนที่ในขณะที่มีแรงภายนอกมากระทำที่กับวัตถุและทำให้วัตถุเคลื่อนที่ไปมาเช่นเดียวกับแรงที่กระทำ ถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ เรียกว่า วัตถุอยู่ในสภาพการกำทอน (resonance) ซึ่งจะมีการสั่นที่รุนแรงและเป็นอันตรายต่อวัตถุอย่างมาก การชำรุดเสียหายของโครงสร้าง เช่น ปีกเครื่องบิน สะพาน หรืออาคาร อาจจะมีสาเหตุมาจากสภาพการกำทอนนี้

แรงที่มากระทำกับโครงสร้างจะมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ

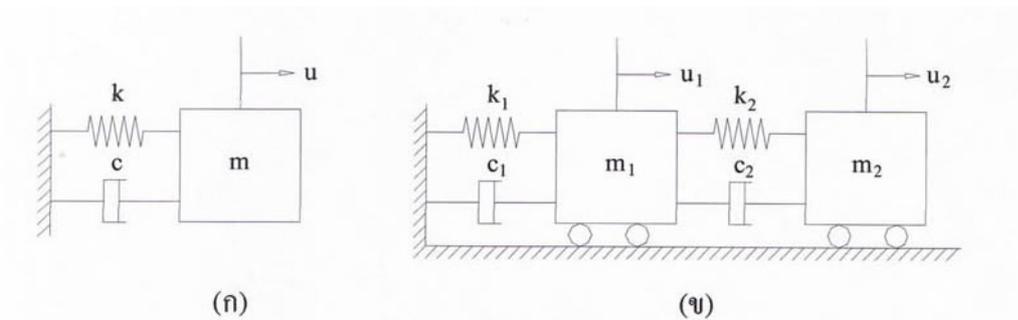
- 1) แรงแบบสถิต (Static Force) คือแรงที่กระทำกับโครงสร้างจะเป็นแรงที่คงที่ แรงที่โครงสร้างต้านเพื่อให้อยู่สมดุลจะเป็นแรงที่เกิดจากแรงยึดหยุ่น (Stiffness) ผลตอบสนองที่ได้จะได้เฉพาะค่า การเคลื่อนที่ (u)
- 2) แรงแบบพลศาสตร์ (Dynamic Force) คือแรงที่กระทำกับโครงสร้างจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กัเวลา แรงที่โครงสร้างต้านเพื่อให้อยู่ในสมดุลจะเป็นแรงที่เกิดจาก แรงเฉื่อย แรงหน่วงและแรงยึดหยุ่น ผลตอบสนองที่ได้จะมีทั้ง การเคลื่อนที่ (u) ความเร็ว (\dot{u}) และความเร่ง (\ddot{u})

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างที่รับแรงแบบสถิตและแรงแบบพลศาสตร์

| | แรงภายนอก | คุณสมบัติโครงสร้าง | ผลตอบสนอง | สมการสมดุล |
|---------|-----------|--------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Static | f | K | u | $-Ku + f = 0$ |
| Dynamic | $f(t)$ | M, C, K | u, \dot{u}, \ddot{u} | $-M\ddot{u} - C\dot{u} - Ku + f = 0$ |

3.1.1 ดีกรีของควมอิสระ (Degree of Freedom ; DOF)

ดีกรีของควมอิสระเป็นการบอกตำแหน่งหรือพิกัดอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยพิกัดอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดจำนวน DOF ถ้าในโครงสร้างเป็นระบบแบบง่ายที่มีการเคลื่อนที่ของพิกัดอิสระได้ในทิศทางเดียว จะเรียกระบบแบบนี้ว่า Single Degree of Freedom (SDOF) ดังแสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) และถ้าในระบบของโครงสร้างมีดีกรีอิสระตั้งแต่ 2 ดีกรีขึ้นไป จะเรียกระบบนี้ว่าระบบ Multi Degree of Freedom (MDOF) ดังแสดงดังรูปที่ 3.1 (ข)

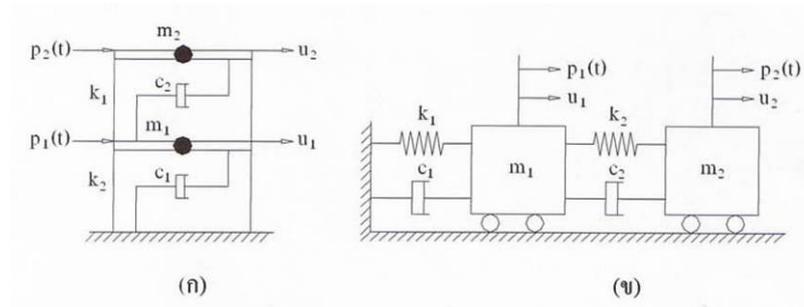


รูปที่ 3.1 แสดงระบบการสั่นของโครงสร้าง

3.1.1.1 ระบบ Single Degree of Freedom (SDOF) เป็นระบบที่มีดีกรีอิสระเพียงดีกรีเดียว โดยในระบบจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติทางกายภาพคือ มวล (m), ความหน่วง (c) และ สติฟเนส (k) จะเป็นแรงต้านของระบบที่กระทำกับแรงภายนอก ($f(t)$) ที่มากระทำ สมการสมดุลทางพลศาสตร์เขียนได้ดังสมการที่ 3.1a

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (3.1a)$$

3.1.1.2 ระบบ Multi Degree of Freedom (MDOF) เป็นระบบที่ประกอบไปด้วย DOF ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ตัวอย่างการพิจารณาโครงสร้าง 2 ชั้น (two-stories frame) ที่ถูกกระทำด้วยแรงภายนอก $p_1(t)$ และ $p_2(t)$ ในระบบนี้จะสมมุติให้ระบบของคานและพื้นนั้นแข็งมาก (Infinitely Stiff)



รูปที่ 3.2 ระบบ MDOF ที่มีแรงภายนอกกระทำ

จากรูปสามารถเขียนสมการสมดุลของแรงในรูปเมตริกได้ดังสมการที่ (3.1b)

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix} \quad (3.1b)$$

สมมติว่าพฤติกรรมเป็นเส้นตรง (linear) แรงยืดหยุ่นต้านทาน f_s (elastic resisting forces) จะมีความสัมพันธ์กับการจัดตั้งสมการที่ (3.1c)

$$\begin{Bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3.1c)$$

แรงหน่วง f_d จะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว \dot{u}_1 และ \dot{u}_2 ดังสมการที่ (3.1d)

$$\begin{Bmatrix} f_{d1} \\ f_{d2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} \quad (3.1d)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ (3.1c) และ (3.1d) ในสมการที่ (3.1b) จะได้ดังสมการที่ (3.1e)

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix} \quad (3.1e)$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปของสมการสมดุลทางพลศาสตร์ (Equation of Motions) ได้ดังสมการที่ (3.1f)

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (3.1f)$$

โดยที่ m คือเมตริกซ์ของมวลซึ่งมีรูปทั่วไปดังสมการที่ (3.1g)

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & m_n \end{bmatrix} \quad (3.1g)$$

k คือ เมตริกซ์ของสปริงเนสซึ่งมีรูปทั่วไปดังสมการที่ (3.1h)

$$k = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & -k_3 & k_3 + k_4 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & k_n \end{bmatrix} \quad (3.1h)$$

c คือ เมตริกซ์ของตัวหน่วงซึ่งมีรูปทั่วไปดังสมการที่ (3.1i)

$$c = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & -c_3 & c_3 + c_4 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & c_n \end{bmatrix} \quad (3.1i)$$

u คือ เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ซึ่งมีรูปทั่วไปดังสมการที่ (3.1j)

$$u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (3.1j)$$

p คือ เวกเตอร์ของแรงที่ซึ่งมีรูปทั่วไปดังสมการที่ (3.1k)

$$p = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix} \quad (3.1k)$$

3.1.2 ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง (Natural Frequency) และรูปแบบการสั่นไหว (Model Shapes)

3.1.2.1 โครงสร้างระบบ SDOF ถ้าโครงสร้างเป็นระบบแบบ SDOF สามารถที่จะหาความถี่ธรรมชาติโครงสร้างได้โดยตรงจากสมการที่ (3.2)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.2)$$

โดยที่ k = สติฟเนสของโครงสร้างโดยจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง และแรงภายนอกที่เข้ามากระทำกับโครงสร้าง

3.1.2.2 โครงสร้างระบบ MDOF

1) โครงสร้างแบบไม่มีความหน่วง undamped system สมการสมมูลในกรณีของ undamped free vibration จะได้ดังสมการที่ (3.3a)

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (3.3a)$$

สมมติให้คำตอบของสมการ $u = \phi e^{i\omega x}$ แล้วแทนค่าลงในสมการที่ (3.3a) จะได้เป็นสมการที่ (3.3b)

$$m\phi(-\omega^2)e^{i\omega x} + k\phi e^{i\omega x} = 0 \quad (3.3b)$$

$$|k - \omega^2 m|\phi e^{i\omega x} = 0 \quad (3.3c)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad |k - \omega^2 m|\phi = 0 \quad (3.3d)$$

$$|m^{-1}k - \omega^2 I|\phi = 0 \quad (3.3e)$$

เนื่องจาก $\phi \neq 0$ ดังนั้นจะได้

$$|m^{-1}k - \omega^2 I| = 0 \quad (3.3f)$$

จากสมการที่ (3.3f) ใช้วิธี Eigenvalue Analysis หาค่า Eigenvalue และ Eigenvector ได้ โดยที่ค่า Eigenvalue จะอยู่ในรูปของ Diagonal Matrix มีค่าเท่ากับ $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ ค่าความถี่ธรรมชาติจะเท่ากับ $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ค่า Eigenvector จะเป็นรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape; ϕ_i) ของแต่ละความถี่

ธรรมชาติ (ω_i) จะบอกให้รู้ว่าที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆ จะมีรูปร่างของการสั่นไหวอย่างไร

- 2) โครงสร้างแบบมีความหน่วง damped system สมการสมดุลในกรณีนี้จะอยู่ในรูปของ damped free vibration ดังสมการที่ (3.4a)

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.4a)$$

จากสมการที่ (3.4a) มีผลของเมตริกซ์ของความหน่วงเพิ่มเข้ามาทำให้ไม่สามารถที่จะใช้วิธี Eigenvalue Analysis ได้โดยตรงจำเป็นต้องใช้วิธี State Space โดยจัดให้อยู่ในรูปของ state vector ดังสมการที่ (3.4b)

$$x = \begin{Bmatrix} u \\ \dot{u} \end{Bmatrix} \quad (3.4b)$$

จากสมการที่ (3.4a) ใช้วิธี State Space โดย state vector ในสมการที่ (3.4b) สามารถเขียนสมการสมดุลได้ใหม่ดังสมการที่ (3.4c)

$$\begin{bmatrix} c & m \\ m & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \ddot{u} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \dot{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.4c)$$

จาก state equation

$$\dot{x} = Ax \quad (3.4d)$$

เมื่อ

$$A = -\begin{bmatrix} c & m \\ m & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix} \quad (3.4e)$$

จากสมการที่(3.4c) ใช้ Complex Eigenvalue Analysis จะสามารถหา Complex Eigenvalue และ Complex Eigenvector ได้ โดยที่ค่า Complex Eigenvalue อยู่ในรูปของ Diagonal Matrix จะมีค่าเท่ากับ $\alpha_i \pm i\beta_i$ ดังนั้นจะสามารถหาความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้คือ

$$\omega_i = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \text{ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติในกรณีที่ไม่ได้รวมผลของความหน่วง}$$

$$\xi_i = \frac{-\alpha_i}{\omega_i} \text{ คือ Eigenvalue damping ratio ของโครงสร้าง}$$

$$\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \text{ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติในกรณีที่รวมผลของความหน่วงและค่า}$$

Complex eigenvector จะเป็นรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape; ϕ_i) ของแต่ละค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งจะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนขนาดเมตริกซ์ของ Complex eigenvector ขนาด $2n \times 2n$ (ค่า i จะมีค่าเท่ากับ 1 ถึง n)

3.1.3 การหาผลตอบสนองของโครงสร้างโดยวิธี Mode Superposition

ในการหาผลการตอบสนองของโครงสร้าง โดยปกติสามารถที่จะหาได้จากการทำ direct integration จากเมทริกซ์ของ มวล สติฟเนส ความหน่วง และ vector ของแรงที่มากระทำได้โดยตรง แต่ถ้าโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีดีกรีอิสระจำนวนมาก ขนาดของเมทริกซ์จะมีขนาดใหญ่มาก ๆ ถ้าจะทำ direct integration โดยตรงจะเสียเวลาในการคำนวณมาก หรืออาจไม่สามารถคำนวณได้เลย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำวิธี Mode Superposition เข้ามาช่วย โดยแยกความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวออกมาพิจารณา จะนำเอารูปแบบการสั่นไหวแรกๆ ของโครงสร้างมาใช้ เพราะว่าผลตอบสนองส่วนใหญ่จะมีมากในรูปแบบการสั่นไหวแรกๆ ของโครงสร้าง จะเห็นได้ว่าวิธี Mode Superposition จะทำให้ขนาดของเมทริกซ์ที่นำมาทำ direct integration มีขนาดเล็กลงทำให้ใช้เวลาในการคำนวณสั้นลง

จากสมการสมดุลทางพลศาสตร์ของระบบ MDOF สมการที่ (3.1f) ทำ Eigenvalue Analysis จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างออกมา นำค่ารูปแบบการสั่นไหวที่ได้ มาทำการ transform vector ของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง จะได้สมการที่ (3.5)

$$u = \phi q$$

(3.5)

โดยที่ ϕ คือ รูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง และ q คือ modal displacement ของโครงสร้างที่ถูก transform ด้วยรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.1f) แล้วคูณด้วย ϕ^T จะได้สมการสมดุลทางพลศาสตร์ใหม่ดังสมการที่ (3.6)

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = P \quad (3.6)$$

โดยที่ $M = \phi^T m \phi$ คือ modal damping matrix, $\phi_i^T m \phi_j = 0$ เมื่อ $i \neq j$ และ $M_i = \phi_i^T m \phi_i$ คือ modal mass

$C = \phi^T c \phi$ คือ modal damping matrix, $\phi_i^T c \phi_j = 0$ เมื่อ $i \neq j$ และ $C_i = \phi_i^T c \phi_i$ คือ modal damping

$K = \phi^T k \phi$ คือ modal stiffness matrix, $\phi_i^T k \phi_j = 0$ เมื่อ $i \neq j$ และ $K_i = \phi_i^T k \phi_i$ คือ modal stiffness

$P = \phi^T p(t)$ คือ modal force vector และ $P_i = \phi_i^T p$ คือ modal force

จากสมการที่ (3.6) ค่าของ M_i จะเป็นค่า modal mass ประจำความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง เมื่อกำหนดให้ค่า ϕ_i ที่นำมาใช้ในการ transform ณ ตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดของ ϕ_i มีค่าเท่ากับ 1

แล้ว จะสามารถหาค่า modal stiffness ประจำความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างได้จาก $\omega_i^2 M_i$ และค่า modal damping ประจำความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างได้จาก $2\xi_i \omega_i M_i$

ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่แล้ว เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จะทำการ normalize ค่าของ ϕ เมื่อนำมา transform กับเมตริกซ์ของมวลแล้วจะให้ค่าเท่ากับเมตริกซ์เอกลักษณ์ (I) โดยการหาร ϕ ด้วย $\sqrt{M_i}$ ดังสมการที่ (3.7)

$$\frac{\phi_i^T}{\sqrt{M_i}} m \frac{\phi_i}{\sqrt{M_i}} = 1 \quad (3.7)$$

เมื่อทำการ normalize แล้วก็จะสามารถหาค่า K ได้เท่ากับ diagonal matrix ของ ω_i^2 และค่า C ได้เท่ากับ diagonal matrix ของ $2\xi_i \omega_i$ เมื่อต้องการหา modal mass ประจำความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างก็จะสามารถหาได้ดังสมการที่ (3.8) ซึ่งเป็นการนำสมการที่ (3.7) มาประยุกต์ใช้ และให้ผลที่เท่ากับการหาจาก $M_i = \phi_i^T m \phi_i$

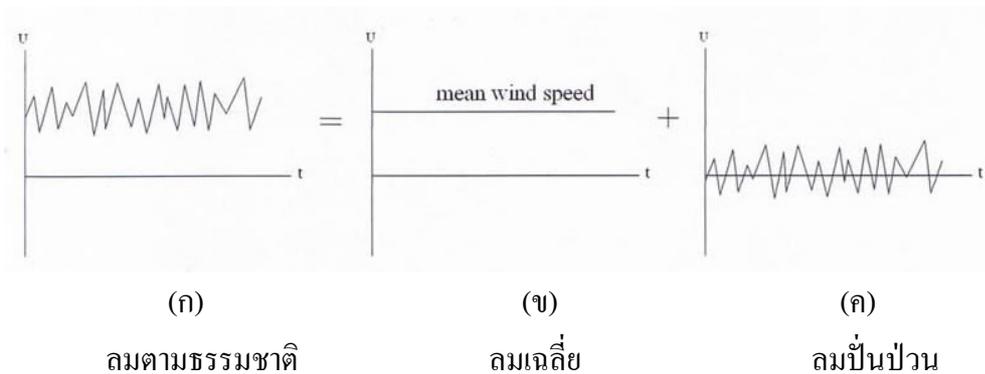
$$M_i = \frac{1}{\phi_{i,\max}^2} \quad (3.8)$$

โดยที่ $\phi_{i,\max}$ คือค่าที่สูงสุดประจำของรูปแบบการสั่นไหวในความถี่ธรรมชาติต่างๆ จากทำ normalize แล้ว

3.2 พลศาสตร์ของแรงลม (Dynamic of Wind)

3.2.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของแรงลม

ปรกติแล้วแรงลมที่มากระทำต่อสะพานจะเป็นแรงลมแบบปั่นป่วน (turbulent wind) ในแรงลมแบบปั่นป่วน นั้นสามารถแยกออกมาได้ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ราบเรียบนั้นก็คือ ความเร็วลมเฉลี่ยและส่วนที่ปั่นป่วน เป็นรูปของลมที่กระทำเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก)-(ค)



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของลม

เพราะฉะนั้นผลกระทบของแรงลมที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างสะพานจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นความเร็วลมเฉลี่ย ซึ่งจะทำให้เกิดผลของ flutter และส่วนที่เป็นความเร็วลมปั่นป่วน ซึ่งทำให้เกิดผลของ buffeting ดังนั้นในแบบจำลองลมพลศาสตร์ (Aerodynamic Force Model) จะทำการรวมผลของทั้ง 2 ส่วนนี้เข้าไว้ด้วยกันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

$$\begin{array}{lcl}
 \text{แรงยก} & : & L = L_{ae} + L_b \\
 \text{แรงลาก} & : & D = D_{ae} + D_b \\
 \text{โมเมนต์} & : & M = M_{ae} + M_b
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} L \\ D \\ M \end{array}} \right\} \quad (3.9)$$

เมื่อตัวห้อย ae เป็นผลของ Aeroelastic (ทำให้เกิด flutter) และตัวห้อย b เป็นผลของ buffeting

โดยที่

$$\begin{array}{lcl}
 L_{ae} & = & \text{แรงยกจาก flutter} \\
 D_{ae} & = & \text{แรงลากจาก flutter} \\
 M_{ae} & = & \text{โมเมนต์จาก flutter} \\
 L_b & = & \text{แรงยกจาก buffeting}
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 D_b &= \text{แรงลากจาก buffeting} \\
 M_b &= \text{โมเมนต์จาก buffeting}
 \end{aligned}$$

3.2.2 สมการสมดุลทางพลศาสตร์ของแรงลม

สมการสมดุลทางพลศาสตร์ (Equation of Motion) ที่พิจารณาทั้งผลของ flutter และ buffeting โดยใช้วิธี Mode Superposition คือ

$$u(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)q(t) = \sum_{r=1}^n \phi_r(x, y, z)q_r(t) \quad (3.10)$$

จะได้สมการสมดุลทางพลศาสตร์ดังสมการที่ (3.11)

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_{ae} + F_b \quad (3.11)$$

โดย n = จำนวนของ Mode

ϕ = Mode Shape

$M = \phi^T m \phi$ = Modal Mass Matrix

$C = \phi^T c \phi = \text{Diag}(2\xi_i \omega_i M_i)$ = Modal Damping Matrix

ξ_i = Modal Damping Factor

$K = \phi^T k \phi$ = Modal Stiffness Matrix

$F_{ae} = \phi^T f_{ae}$ = Modal Aeroelastic Force Vector

$F_b = \phi^T f_b$ = Modal Buffeting Force Vector

3.2.3 ผลกระทบทางอากาศพลศาสตร์ของแรงลมต่อสะพาน (Aerodynamic Effect of Wind on Bridge)

ในการออกแบบสะพานแขวนหรือสะพานชิงช่วงยาวนั้น ผลกระทบจากแรงลมเป็นสิ่งที่นำมาพิจารณาเป็นลำดับต้นๆ การวิบัติของสะพานแขวน Tacoma Narrows ในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1940 เป็นตัวอย่างหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากแรงลมดังกล่าว ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการตอบสนองของสะพานแขวนช่วงยาวภายใต้แรงลม จึงต้องทำความเข้าใจปรากฏการณ์พื้นฐานจากอิทธิพลของลมที่กระทำกับสะพาน และปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ลมกระทำกับสะพานทางด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งผลกระทบทางอากาศพลศาสตร์ของแรงลมที่กระทำต่อสะพานดังกล่าวที่สำคัญ ได้แก่ vortex shedding, flutter, buffeting, galloping และ torsional-divergence เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

3.2.3.1 Vortex shedding

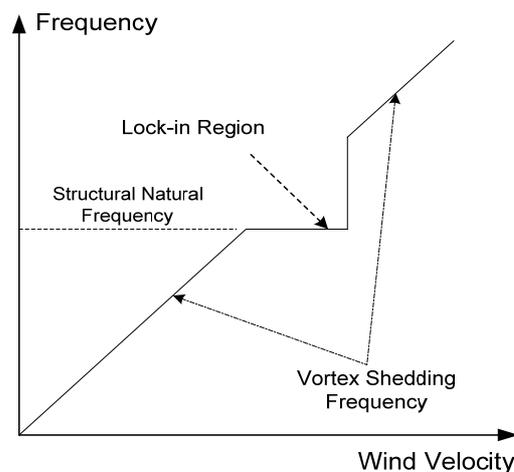
ปรากฏการณ์ลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อลมพัดเข้าหาวัตถุ ลมจะเกิดการแยกตัวไปรอบๆ วัตถุ เกิดเป็นระลอกลม (vortex) และจะแตกตัวออกไปเป็นช่วงๆ สม่่าเสมอทำให้เกิดแรงกระทำกับวัตถุ เป็นจังหวะ จังหวะของแรงที่กระทำกับวัตถุเกิดขึ้นจากระลอกลมที่แตกตัวเป็นช่วงๆ นั้นเอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุด้วย ถ้าวัตถุนั้นแข็งและลู่ลม ช่วงของระลอกลมจะเป็นช่วงแปรผันเป็นสัดส่วนกับความเร็วลม แต่ถ้าวัตถุยืดหยุ่นอย่างโครงสร้างของสะพานแขวน ผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะไปเปลี่ยนแปลงความถี่ของระลอกลม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างนี้จะทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์ขึ้นกับสะพานคือ แรงยก (lift force) แรงลาก (drag force) และแรงดัด (moment force) ซึ่งจะยิ่งทำให้โครงสร้างเคลื่อนที่มากขึ้น

เมื่อความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากความถี่ของ Vortex shedding เรียกความถี่นี้ว่า Strouhal frequency โครงสร้างจะเริ่มเกิดการสั่นไหวเล็กน้อย

$$\text{Strouhal frequency; } f_s = \frac{SU}{D} \quad (3.12)$$

เมื่อ S คือ Strouhal number, D คือ typical cross flow dimension, f_s คือ ความถี่ของ Vortex shedding และ U คือความเร็วลม

และเมื่อความถี่ Vortex shedding เท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจะทำให้เกิดการกำทอนขึ้น เรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า Lock-in และในขณะที่เกิดการ Lock-in นี้ โครงสร้างจะเกิดการสั่นไหวด้วยแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่เกินครึ่งหนึ่งของขนาดวัตถุที่ลมพัดผ่าน [Simiu and Scanlan, 1996]

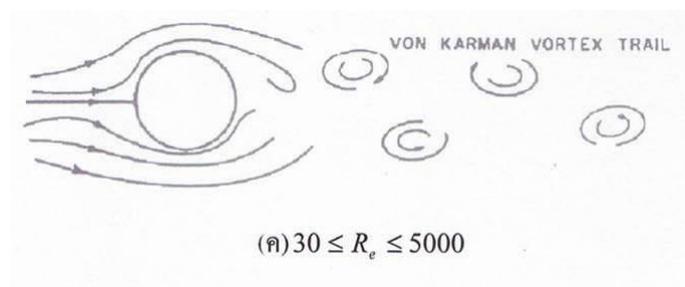
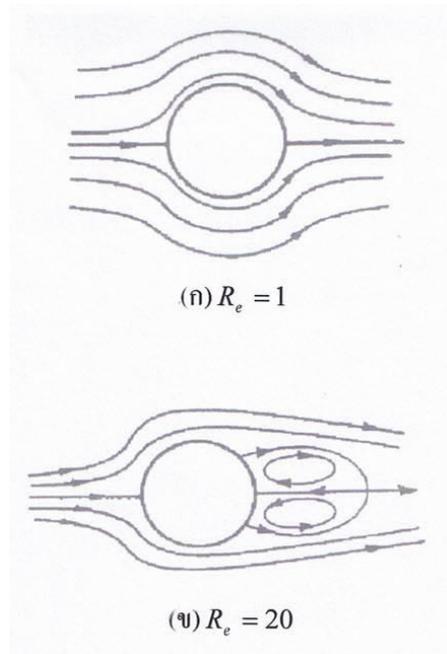


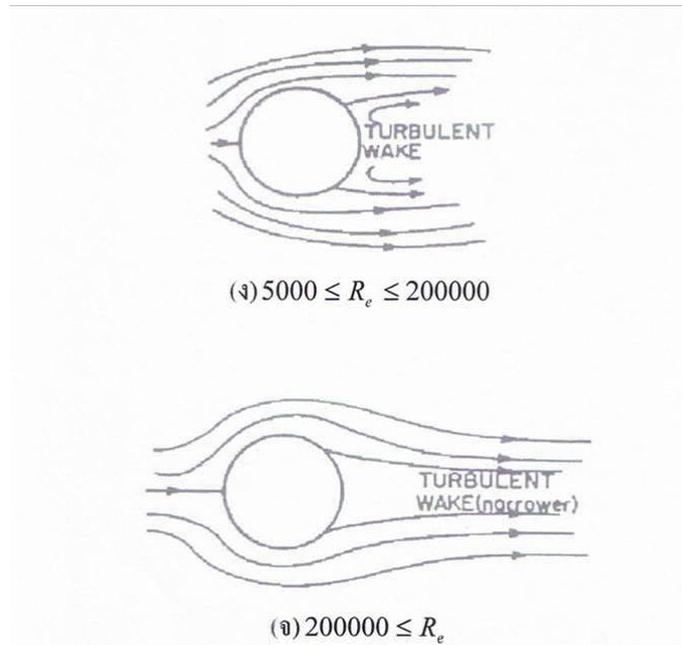
รูปที่ 3.4 ความถี่ Vortex shedding กับความเร็วลมที่พัดผ่าน โครงสร้าง
[Simiu and Scanlan, 1996]

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าขณะที่เกิด Look-in ความถี่ Vortex shedding จะคงที่ในขณะที่ความเร็วลมเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ Vortex shedding นี้จะแตกต่างกันในช่วง Reynolds number, R_e ต่างกัน ดังรูปที่ 3.5(ก)-(จ) และปรากฏการณ์ Vortex shedding จะอยู่ในเทอมของ R_e ดังนี้

$$R_e = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{U D}{\nu} \quad (3.13)$$

เมื่อ U คือ ความเร็วลม, D คือ ขนาดของวัตถุ, μ คือ dynamic viscosity ของของเหลว, ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว และ ν คือ kinematics viscosity





รูปที่ 3.5 รูปแบบของระลอกลมที่ Reynolds number ต่างกัน [Simiu and Scanlan, 1996]

จากรูปที่ 3.5 (ก)-(จ) จะเห็นได้ว่าที่ R_e ต่ำๆ จะยังไม่เกิด Vortex shedding แต่เมื่อ R_e มากขึ้น กระแสลมจะเริ่มเกิดการแยกตัวหลังจากผ่านวัตถุและจะเริ่มเกิด Vortex shedding เมื่อ R_e มีค่าปานกลาง การเกิดระลอกลมลักษณะนี้ จะเกิดการผันผวนตลอดผิวบนและล่างของวัตถุ ซึ่งเป็นสาเหตุให้สะพานเกิดการแกว่งไปมา และเกิดความดันที่ไม่สมดุลกันระหว่างผิวบนและผิวล่างของสะพาน ทำให้เกิดการแกว่งขึ้นลงและการบิดของตัวสะพานจนทำให้สะพานสูญเสียเสถียรภาพ และถ้าเกินขีดจำกัดของโครงสร้างจะทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างในที่สุด (Simiu and Scanlan, 1986)

3.2.3.2 Flutter response

การสูญเสียเสถียรภาพที่อันตรายที่สุดของโครงสร้างจากแรงลมแบบราบเรียบ (smooth wind) ก็คือ aeroelastic flutter ซึ่งมักเกิดขึ้นกับปีกของเครื่องบินและสะพาน ทำให้โครงสร้างดังกล่าวสั่นขึ้นลงและบิดตัวไปมา ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อเกิดระลอกลม (vortex) เป็นช่วงจังหวะที่ผิวบนและผิวล่างจะทำให้เกิดแรงทางอากาศพลศาสตร์เป็นช่วงจังหวะกระทำกับสะพาน และเกิดความไม่สมดุลของความดันระหว่างผิวบนและผิวล่างของสะพานเกิดการสั่นขึ้นลงและบิดตัวไปมา เมื่อการสั่นขึ้นลงเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการบิดตัวไปมาของสะพาน จะเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า

classical flutter นอกจากนี้ผลของความเร็วลมแบบราบเรียบนี้จะทำให้ความหน่วงของโครงสร้างเปลี่ยนไปความเร็วลมที่ทำให้ความหน่วงของโครงสร้างต่ำกว่าศูนย์ เรียกความเร็วลมแบบนี้ว่า ความเร็วลมวิกฤต (critical wind velocity, U_{cr}) ปรากฏการณ์แบบนี้เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง สะพานมาก อาจทำให้สะพานเกิดพังทลายได้

ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่วิกฤตที่สุดที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสะพานแขวนและ สะพานชิงช้าหวาย การพังทลายของสะพาน Tacoma Narrow ก็เกิดจากปรากฏการณ์ดังกล่าว และประเภทของ flutter คำนึงในการออกแบบสะพานแขวนและสะพานชิงช้าหวายมากที่สุดก็คือ classical flutter

classical flutter ที่กระทำกับสะพานนั้น มีลักษณะสองคิรีของความอิสระ นั่นคือ การหมุนและการเคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกัน และเป็นการสั่นแบบไม่มีเสถียรภาพ การวิเคราะห์ flutter นั้นตั้งอยู่บนสมมติฐานของพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นของระบบ (linear elastic system) มี สมการการเคลื่อนที่ที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$m\ddot{h} + c_h\dot{h} + k_h h = L_h \quad (3.14)$$

$$I\ddot{\alpha} + c_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha\alpha = M_\alpha \quad (3.15)$$

เมื่อ m, I, h, α, L_h และ M_α แทนมวล โมเมนต์ของความเฉื่อย ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นลง มุมการเคลื่อนที่ขึ้นลง แรงยก และโมเมนต์ ตามลำดับ c และ k แทนสัมประสิทธิ์ความหน่วง (damping) และสัมประสิทธิ์ความแข็ง (stiffness coefficient)

$$L_h = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha \right] \quad (3.16)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha \right] \quad (3.17)$$

ตามทฤษฎีการสั่นของปีกเครื่องบิน (steady sinusoidal oscillation) จะได้สัมประสิทธิ์ดังนี้

$$KH_1^* = -2\pi F \quad (3.18)$$

$$KH_2^* = -\pi \left(1 + F + 2 \frac{G}{K} \right) \quad (3.19)$$

$$KH_3^* = -2\pi \left(F - \frac{KG}{2} \right) \quad (3.20)$$

$$KA_3^* = \pi F \quad (3.21)$$

$$KA_2^* = -\frac{\pi}{2} \left(1 - F - 2 \frac{G}{K} \right) \quad (3.22)$$

$$KA_3^* = \pi \left(F - \frac{KG}{2} \right) \quad (3.23)$$

เมื่อ $F(K) + iG(K) = c(K)$ คือ Theodorsen circulation function ซึ่งนิยามโดย Bessel function ผลลัพธ์หาได้โดยการพล็อตกราฟของ $F(K)$ และ $G(K)$ และถ้า H_i^* และ A_i^* เป็น non dimension function ของความถี่ลดรูปของ K แล้วจะได้สมการการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปของ

$$h = h_0 e^{\lambda t} \sin \omega t \quad (3.24)$$

$$\alpha = \alpha_0 e^{\lambda t} \sin(\omega t - \theta) \quad (3.25)$$

เมื่อ h_0 และ α_0 เป็นค่าแอมพลิจูดเริ่มต้น θ เป็นค่าเฟสสัมพัทธ์ และ λ เป็นการเพิ่มหรือลดของการสั่น

Lasen และ Walther (1998) เสนอสมการแรงยกและโมเมนต์ดังนี้

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (3.26)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (3.27)$$

เมื่อ $K = \frac{B\omega}{U}$ เป็นค่า ส.ป.ส. ความถี่ลดรูป H_i^* และ A_i^* คือ flutter derivatives U คือ ค่าความเร็วลม และ B คือความกว้างของสะพาน โดยสมมติให้การเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์มอนิกตามคาบของเวลาคือ $h = h_0 \exp(i\omega t)$ และ $\alpha = \alpha_0 \exp(i\omega t)$ ดังนั้นสมการที่ (3.26) และ (3.27) จึงเขียนอยู่ในรูป non-dimensional ได้ดังนี้

$$C_L e^{i(\omega t - \varphi)} = 2K^2 \left[(iH_1^* + H_4^*) \frac{h}{B} + (iH_2^* + H_3^*) \alpha \right] e^{i\omega t} \quad (3.28)$$

$$C_M e^{i(\omega t - \varphi)} = 2K^2 \left[(iA_1^* + A_4^*) \frac{h}{B} + (iA_2^* + A_3^*) \alpha \right] e^{i\omega t} \quad (3.29)$$

หารสมการข้างบนด้วย $\exp(i\omega t)$ และแทน $\exp(-i\varphi)$ ด้วย $(\cos \varphi - i \sin \varphi)$ จะได้ค่า aerodynamic derivatives ดังสมการที่ (3.30)-(3.33)

$$H_1^* = \frac{-C_L \sin(\phi)}{2(2\pi)^2} \frac{B}{h} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.30)$$

$$H_2^* = \frac{-C_L \sin(\phi)}{2\alpha(2\pi)^2} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.31)$$

$$H_3^* = \frac{C_L \sin(\phi)}{2\alpha(2\pi)^2} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.32)$$

$$H_4^* = \frac{-C_L \sin(\phi)}{2(2\pi)^2} \frac{B}{h} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.33)$$

$$A_1^* = \frac{-C_M \sin(\phi) B}{2(2\pi)^2} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.34)$$

$$A_2^* = \frac{-C_M \sin(\phi)}{2\alpha(2\pi)^2} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.35)$$

$$A_3^* = \frac{C_M \sin(\phi)}{2\alpha(2\pi)^2} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.36)$$

$$A_4^* = \frac{-C_M \sin(\phi) B}{2(2\pi)^2} \left(\frac{U}{fB} \right)^2 \quad (3.37)$$

Flutter derivatives ขณะเกิด vortex lock-in

การเริ่มต้นของโครงสร้างจากการเกิด vortex-shedding ซึ่งความถี่ธรรมชาติในการสั่นเข้าใกล้ความถี่ Strouhal ($f \cong f_s$) นั้นเราสามารถหา Flutter derivatives ได้จากการทดลอง แต่ในขณะเกิด vortex lock-in นั้นหาได้ค่อนข้างยาก แต่อาจหาได้โดยพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ในขณะ lock-in โดยให้ $\omega = \omega_h$ และ $\omega = \omega_\alpha$ ดังนี้

$$m(\ddot{h} + 2\xi_h \omega \dot{h} + \omega^2 h) = L_h \quad (3.38)$$

$$I(\ddot{\alpha} + 2\xi_\alpha \omega \dot{\alpha} + \omega^2 \alpha) = M_\alpha \quad (3.39)$$

เมื่อ

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha \right] \quad (3.40)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha \right] \quad (3.41)$$

3.2.3.3 Buffeting

Buffeting เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความปั่นป่วนของลม (turbulent wind) ที่พัดเข้าหาโครงสร้างโดยที่แรงลมที่ปั่นป่วนจะมีรูปของแรงลมที่ขึ้นลงไปตามเมื่อเทียบกับเวลา กล่าวคือ ถ้าพิจารณาที่จุดที่แรงลมมากกระทำ ณ จุดหนึ่งขนาดของแรงลมจะมีการเปลี่ยนแปลงไปมา ซึ่งจะหาความเร็วลมออกมาอยู่ในรูปของความเร็วลมเฉลี่ย (mean wind speed) ในแต่ละพื้นที่และภูมิภาคก็จะมีรูปลักษณะของลมปั่นป่วนแตกต่างกันออกไป ความถี่ของแรงก็จะต่างออกไปด้วย ถ้าที่ความเร็วลมที่มีค่าความถี่ของแรงเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ก็จะทำให้โครงสร้างเกิด

การตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์อย่างรุนแรง ซึ่งขนาดของความรุนแรงก็จะขึ้นอยู่กับลักษณะของหน้าตัดที่รับแรงลมของโครงสร้างด้วย

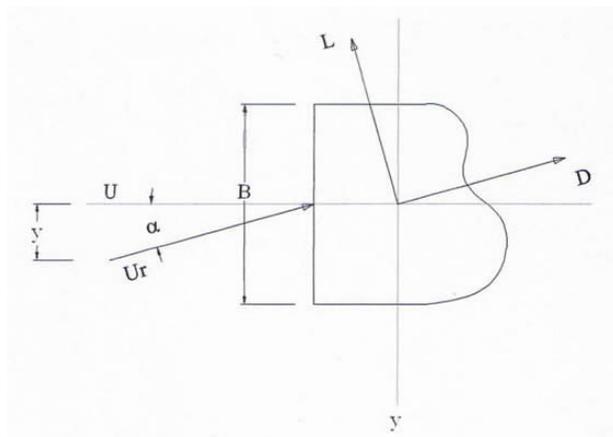
Buffeting ที่ เป็นลักษณะที่เกิดขึ้นจากแรงที่ไม่คงที่ที่กระทำกับวัตถุ ซึ่งเป็นผลมาจากความเปลี่ยนแปลงความเร็วของแรงลมที่เข้ามากระทำ ถ้าความเปลี่ยนแปลงความเร็วของลม ทำให้เกิดระลอกลมปั่นป่วนบริเวณหน้าของวัตถุที่พัดเข้าหา และทำให้เกิดแรงที่ไม่คงที่ดังกล่าว เรียกลักษณะอย่างนี้ว่า wake buffeting

3.2.3.4 Galloping

Galloping คือความไร้เสถียรภาพของโครงสร้างขลุ่ยซึ่งมีรูปร่างของหน้าตัดเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือแบบตัว “D” ภายใต้บางสภาวะ โครงสร้างเหล่านี้จะสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมที่ความถี่ต่ำๆ ซึ่งต่ำกว่าความถี่ vortex shedding เสียอีก จึงเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า ปรากฏการณ์ความถี่ต่ำ (low frequency phenomenon)

การเกิด Galloping ในสะพานเป็นเหตุให้เกิดการสั่นขึ้นลงของสะพานภายใต้กระแสลมคงที่โดยเหตุผลสัมพัทธ์ที่ว่า เมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงและมุมปะทะ (α) เปลี่ยนแปลงด้วยการที่มุมปะทะเปลี่ยนแปลงนี้เองทำให้การไหลของกระแสลมไม่สมมาตร ดังนั้นความดันที่ผิวบนและล่างของสะพานจึงไม่เท่ากันเป็นผลให้เกิดแรงยกในทิศทาง y แรงยกนี้จะทำให้โครงสร้างเริ่มเคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร็ว \dot{y} และเกิดความไม่มั่นคงกับโครงสร้าง พฤติกรรมของโครงสร้างคือการต้านทานการเคลื่อนที่โดยการคืนแรงตามรูปที่ 3.6 ดังนั้นโครงสร้างจะสั่นในทิศทาง y และสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \quad (3.42)$$



รูปที่ 3.6 ผลของมุมปะทะของลมต่อโครงสร้าง [Simiu and Scanlan, 1996]

สูตรการวิเคราะห์ Galloping

$$\text{แรงลาก} \quad D(\alpha) = \frac{1}{2} \rho U_r^2 B C_D(\alpha) \quad (3.43)$$

$$\text{แรงยก} \quad L(\alpha) = \frac{1}{2} \rho U_r^2 B C_L(\alpha) \quad (3.44)$$

กำหนดให้ $F_y(\alpha)$ เป็นแรงทางอากาศพลศาสตร์ซึ่งเป็นผลรวมของแรงยกและแรงลากตามแกน y

$$F_y(\alpha) = -D(\alpha) \sin \alpha - L(\alpha) \cos \alpha \quad (3.45)$$

$$\text{และ} \quad F(\alpha) = \frac{1}{2} \rho U_r^2 B C_{F_y}(\alpha) \quad (3.46)$$

เมื่อ $U = U_r \cos \alpha$ และ $\alpha = \arctan^{-1} \frac{\dot{y}}{U}$ เมื่อพิจารณากรณีที่ $\dot{y} \ll U \rightarrow \alpha \cong \frac{\dot{y}}{U}$ และสมการการเคลื่อนที่จะได้ดังนี้

$$m(\ddot{y} + 2\xi \omega_1 \dot{y} + \omega_1^2 y) = -\frac{1}{2} \rho U^2 B \left[\frac{dC_L(\alpha)}{d\alpha} + C_D(\alpha) \right]_0 \frac{\dot{y}}{U} \quad (3.47)$$

$$\xi_T = 2\xi m \omega_1 \dot{y} + \frac{1}{2} \rho U B \left[\frac{dC_L(\alpha)}{d\alpha} + C_D(\alpha) \right]_0 \quad (3.48)$$

ระบบจะเสถียรเมื่อ $\xi_T > 0$ ซึ่งหมายความว่า พลังงานการเคลื่อนที่ได้ถูกสลายไป และระบบจะไม่เสถียรเมื่อ $\xi_T < 0$ แรงยกจะทำให้การเคลื่อนที่มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเทอม $2\xi m \omega$ ซึ่งเป็นความหน่วงเชิงกลมีค่าเป็นบวกเสมอ และเทอมที่สองของสมการซึ่งเป็นค่าความหน่วงทางอากาศพลศาสตร์อาจมีค่าเป็นลบได้ดังนั้นถ้า $\xi_T < 0$ แล้ว

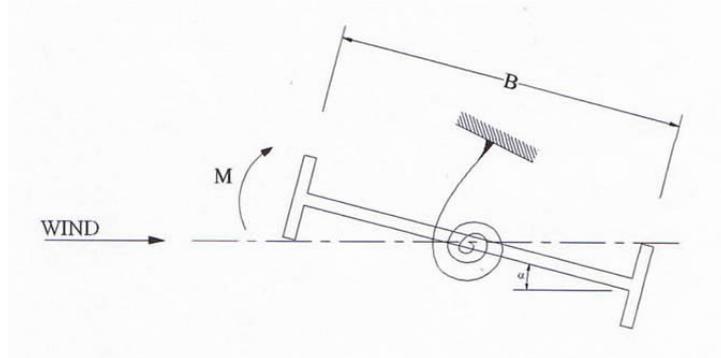
$$\left[\frac{dC_L(\alpha)}{d\alpha} + C_D(\alpha) \right]_0 < 0 \quad (3.49)$$

Galloping จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน B/h อยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 3.0 เมื่อ B คือความกว้างของหน้าตัด และ h คือความสูงของหน้าตัด เมื่ออัตราส่วน B/h มีค่าตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไปกระแสลมจะมาบรรจบกันอีกครั้งหลังผ่านโครงสร้างไป ดังนั้นจะไม่เกิด Galloping ด้วยเหตุนี้เอง Galloping จึงมักเกิดขึ้นกับเสา pylon ของสะพานขึง

3.2.3.5 Torsional divergence

Torsional divergence เป็นตัวอย่างของการตอบสนองแบบสติดแบบหนึ่งของโครงสร้าง Torsional divergence มักเกิดขึ้นกับปีกของเครื่องบินที่อ่อนไหวต่อการบิดตัวที่ความเร็วลมสูงๆ เมื่อมีลมมากระทำกับโครงสร้างจะเกิดแรงยก แรงลาก และแรงดัดขึ้น แรงดัดนี้จะทำให้เกิดแรงบิดที่ตัวโครงสร้างทำให้เกิดมุมปะทะของลมเพิ่มขึ้น การเพิ่มของมุมปะทะนี้เป็นผลให้เกิดโมเมนต์บิดและแรงดัดที่ตัวโครงสร้างมากขึ้น ปรากฏการณ์แบบนี้อาจพิจารณาเหมือนกับ

ว่ามีความเร็วลมเพิ่มขึ้น ถ้าโครงสร้างไม่มีสตีเฟนเซิงบิตเพียงพอที่จะรับโมเมนต์นี้ได้ โครงสร้างจะเกิดความไม่เสถียรและเกิดการบิดจนวิบัติได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของโครงสร้างเองและโมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์ที่ทำให้เกิดการบิดด้วย ส่วนใหญ่การเกิดแบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความเร็วลมสูงมากกว่าความเร็วที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไป



รูปที่ 3.7 การเกิด torsional divergence กับโครงสร้าง [Simiu and Scanlan, 1996]

โมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีสมการดังนี้

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 C_M(\alpha) \quad (3.50)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ U คือความเร็วลมเฉลี่ย B คือความกว้างของหน้าตัด α คือมุมของการบิด และ C_M คือ ส.ป.ส. ของโมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์รอบแกนที่บิด ที่มุมปะทะเป็นศูนย์ ค่าของโมเมนต์จะเป็น

$$M_\alpha(0) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 C_{M0} \quad (3.51)$$

เมื่อ $C_{M0} = C_M(0)$ และเมื่อมุมปะทะเล็กน้อยหรือ $\alpha = 0$ M_α จะประมาณได้ดังสมการที่ (3.52)

$$M\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[C_{M0} + \left(\frac{dC_{M0}}{d\alpha} \right)_{\alpha=0} \alpha \right] \quad (3.52)$$

นำสมการ โมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์เท่ากับโมเมนต์ต้านจากโครงสร้างดังนี้

$$\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[C_{M0} + \left(\frac{dC_{M0}}{d\alpha} \right)_{\alpha=0} \alpha \right] = k_\alpha \alpha \quad (3.53)$$

$$\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 [C_{M0} + C'_{M0} \alpha] = k_\alpha \alpha \quad (3.54)$$

$$\text{เมื่อ } C'_{M0} = \left. \frac{dC_{M0}}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} \text{ กำหนดให้ } \lambda = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2$$

แล้วจะได้สมการเป็น

$$(k_\alpha - \lambda C'_{M0})\alpha = \lambda C_{M0} \quad (3.55)$$

หรือ

$$\alpha = \frac{\lambda C_{M0}}{(k_\alpha - \lambda C'_{M0})} \quad (3.56)$$

Torsional divergence จะเกิดขึ้นเมื่อ α เข้าใกล้อินฟินิตี้

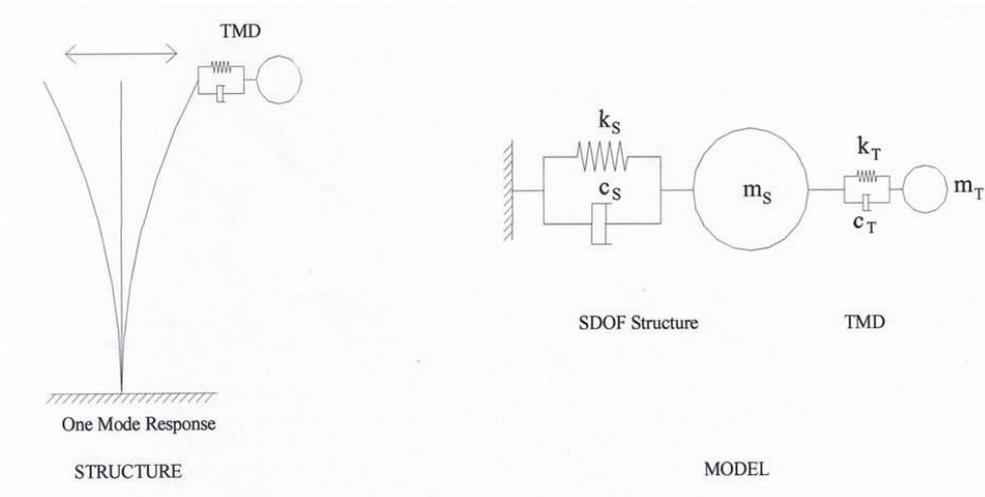
$$\lambda = \frac{k_\alpha}{C'_{M0}} \quad (3.57)$$

ดังนั้นจะสามารถหาความเร็วลมวิกฤติที่ทำให้เกิด Torsional divergence ได้ดังนี้

$$U_{cr} = \sqrt{\frac{2k_\alpha}{\rho B^2 C'_{M0}}} \quad (3.58)$$

3.3 การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง(Vibration Control)

การออกแบบตัวควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง จะมีอยู่ 2 แบบคือ แบบ Passive Control และแบบ Active Control โดยที่การออกแบบ Active Control จะลดผลตอบสนองของโครงสร้างได้ดีกว่าเพราะจะมีการติดตั้ง sensor เพื่อหาแรงจากภายนอกก่อนที่จะเข้ามากระทำกับโครงสร้าง แล้วจึงใส่แรงให้โครงสร้างเพื่อต้านแรงจากภายนอกที่จะเข้ามากระทำที่เวลาต่างๆ ก่อนทำให้สามารถลดผลการตอบสนองลงไปได้มาก แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงยุ่งยากในการออกแบบและมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การควบคุมแบบ Passive Control โดยใช้ Tuned Mass Damper (TMD) เป็นตัวควบคุมเพราะสามารถออกแบบง่าย ราคาไม่แพง ไม่ต้องการฐานยึดอีกด้านหนึ่งของตัวหน่วงสำหรับการติดตั้งทำให้ไม่ค่อยมีปัญหาในการติดตั้ง และยังมีประสิทธิภาพในระดับที่ดี ตัวควบคุมแบบ TMD จะประกอบไปด้วยมวล m_i , สปริง k_i และตัวหน่วง c_i ดังรูปที่ 3.8 หน้าที่สำคัญของ TMD คือการสลายพลังงานการสั่นสะเทือนของโครงสร้างโดยอาศัย dash-pot เป็นตัวช่วยในการลดการสั่นสะเทือน ในการสลายพลังงานของการสั่นให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการตอบสนองของ TMD และการปรับค่าความถี่ธรรมชาติของ TMD ให้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง

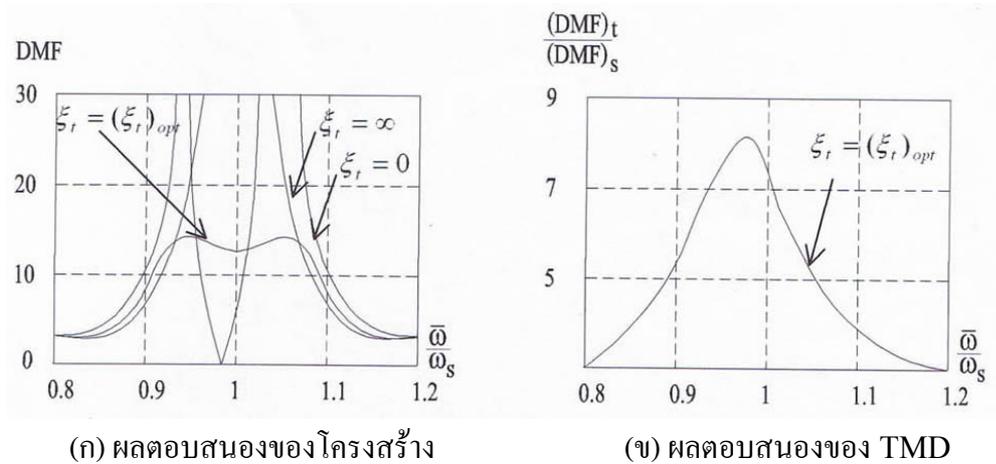


รูปที่ 3.8 ระบบ TMD ที่ติดตั้งกับโครงสร้าง

จากกลไกการทำงานของ TMD นั้นทำให้เกิดระบบทุติยภูมิ (secondary system) คือ การสั่นของมวลหน่วงเพื่อที่จะสลายการสั่นของโครงสร้าง ในการที่จะให้กลไกการทำงานของ TMD มีประสิทธิภาพจะต้องพิจารณาความถี่ธรรมชาติของตัว TMD ที่เหมาะสมโดยความถี่ที่เหมาะสมนั้นจะเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ถ้า TMD มีความถี่ที่เหมาะสมก็จะสามารถสลายพลังงานการสั่นได้มากขึ้นเท่านั้น ส่วนความหน่วงที่เหมาะสมนั้นถ้ามีค่าน้อยเกินไประบบก็จะสลายการสั่นได้น้อย แต่ถ้ามีมากเกินไปจะเสมือนกับติดก้อนวัตถุเข้าไป ระบบ TMD ก็จะไม่ทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการทำ Optimize Control เพื่อที่จะให้ตัว TMD มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.3.1 การออกแบบ TMD ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Optimization Control)

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจะพิจารณาโครงสร้างแบบ SDOF ที่ถูกแรงภายนอกแบบ harmonic มากระทำแล้วทำการออกแบบ TMD เพื่อควบคุมผลตอบสนองนั้น โดยจะแสดงให้เห็นถึงความหน่วงของ TMD ที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมนั้นมีผลต่อโครงสร้างในลักษณะอย่างไร ดังรูปที่ 3.9(ก) เป็นการแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของแรงภายนอกที่มากระทำ ($\bar{\omega}$) หารด้วยความถี่ธรรมชาติโครงสร้าง (ω_s) กับค่าตัวคูณขยายทางพลวัต (Dynamic Magnification Factor; DMF) ของผลการตอบสนองของโครงสร้าง และในรูปที่ 3.9(ข) แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของตัว TMD



(ก) ผลตอบสนองของโครงสร้าง (ข) ผลตอบสนองของ TMD
รูปที่ 3.9 การตอบสนองของโครงสร้างและ TMD ต่อแรงภายนอกที่ความถี่ต่างๆ

พารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญที่นำมาใช้ในการออกแบบ TMD อยู่ในรูปของ non-dimensional ดังนี้

$$-\mu = \frac{m_t}{m_s} \quad (3.59)$$

$$\gamma = \frac{\omega_t}{\omega_s} \quad (3.60)$$

$$\xi = \frac{c_t}{2m_s\omega_s} \quad (3.61)$$

โดยที่ μ คือ mass ratio หรืออัตราส่วนมวลของ TMD ต่อมวลของโครงสร้าง γ คือ tuning ratio หรืออัตราส่วนความถี่ธรรมชาติของ TMD ต่อความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง และ ξ คือ damping ratio หรือค่า damping ratio ของ TMD

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ TMD ตามรูปแบบการสั่นของโครงสร้าง
เมื่ออัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างน้อยมาก

| Condition | Harmonically forces vibration (Den Hartog) | Free vibration | Self-excited Vibration | Randomly forces Vibration (Ayorinde and Warberton) |
|------------------|--|---|--|--|
| Objective | Equal and Maximum fixed Points | Maximum modal damping for structure dominant mode | Maximum negative damping for stable two modes | Maximum mean square of structure response |
| γ_{opt} | $\frac{1}{1+\mu}$ | $\frac{1}{1+\mu}$ | $\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$ | $\sqrt{\frac{\mu+2}{2(\mu+1)^2}}$ |
| $(\xi_l)_{opt}$ | $\sqrt{\frac{3\mu}{8(\mu+1)}}$ | $\sqrt{\frac{\mu}{(1+\mu)}}$ | $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{(1+\mu/2)}}$ | $\sqrt{\frac{\mu(3\mu+4)}{8(\mu+1)(\mu+2)}}$ |
| $\Delta\xi_{eq}$ | $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu/2}{1-\mu/2}}$ | $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{1-\mu/4}}$ | $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+\mu/2}}$ | $\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\mu(1+\mu)}{1+3\mu/4}}$ |

จากรูปที่ 3.9 กำหนดให้ mass ratio มีค่า 0.01 tuning ratio เป็นค่าที่เหมาะสม ส่วน damping ratio มีค่าต่างกัน 3 ค่า เพื่อใช้เปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าถ้าค่า damping ratio มีค่ามากเกินไประบบก็จะไม่สามารถทำงานได้ เสมือนกับว่าโครงสร้างมีมวลของ TMD เพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ถ้า damping ratio มีค่าน้อยเกินไประบบก็จะทำงานได้สร้างมีประสิทธิภาพโดยทำให้โครงสร้างมีการแยกความถี่ออกมาแต่ไม่สามารถลดผลการตอบสนองได้ เพราะฉะนั้นจึงต้องหาค่า damping ratio ที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณาจาก response curve ที่ได้จากการคิด TMD โดยกำหนด fixed point 2 จุดอยู่ในระดับเดียวกันและทำให้ response curve มีลักษณะราบที่สุด ซึ่งเกณฑ์ในการออกแบบ TMD และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการสั่นของโครงสร้างเนื่องจากแรงภายนอกที่มากกระทำต่างๆ กันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

3.4 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบด้านแรงลมสำหรับโครงสร้างมาเป็นเวลานาน โดยในระยะแรกๆ เป็นการทดสอบด้วยความเร็วลมสม่ำเสมอ (Uniform Flow) แต่จากการศึกษาการเคลื่อนไหวของลมในธรรมชาติ พบว่าความเร็วลมบริเวณใกล้พื้นดินจะถูกหน่วงให้ลดลง เนื่องจากสภาพขรุขระของพื้นผิวโลกและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ความสูงเกรเดียนต์ โดยเรียกช่วงความสูงนี้ว่า บาวคาร์เลเยอร์ (Boundary Layer) ซึ่งมีความสูงประมาณ 500 เมตร ในบริเวณใจกลางเมืองใหญ่ โดยที่สิ่งปลูกสร้างต่างๆ จะอยู่ในช่วงความสูงนี้ ดังนั้นการทดสอบหาค่าแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง โดยการทดสอบภายในอุโมงค์ลมภายใต้ความเร็วลมสม่ำเสมอ จึงไม่เหมาะสม

การทดสอบภายในอุโมงค์ลมจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นหลังจากมีการจำลองสภาพการไหลวน (Turbulent Flow) และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามความสูงจากระดับพื้นดินให้สอดคล้องกับลมธรรมชาติ โดยการสร้างอุโมงค์ลมที่มีความยาวเพียงพอที่จะทำให้บาวคาร์เลเยอร์ ก่อตัวขึ้นที่ละน้อยจากแรงเสียดทานที่ผิวของพื้นอุโมงค์ลม ซึ่งถูกทำให้มีสภาพขรุขระ ทำให้ลมจำลองที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับลมธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มแบบจำลองของอาคารข้างเคียงในบริเวณโดยรอบอาคารที่พิจารณา เพื่อศึกษาผลกระทบอันทำให้หน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นบนอาคารที่พิจารณาเปลี่ยนแปลงไป การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ต้องมีหลักการและข้อพิจารณาต่างๆ ดังนี้

3.4.1 ประเภทของอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ อุโมงค์ลมแบบปิด (Closed Circuit Type) และ แบบเปิด (Open Circuit Type) อุโมงค์ลมแบบเปิดยังแบ่งได้เป็น อุโมงค์ลมช่วงยาว และ อุโมงค์ลมช่วงสั้น

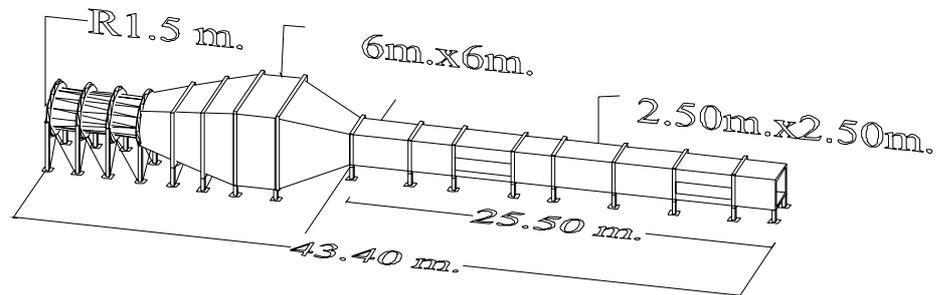
1) อุโมงค์ลมช่วงยาว

ลักษณะของลมจำลองที่ใช้จะมีลักษณะของการไหลวนตามที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติโดยที่ลักษณะของลมธรรมชาติ (Boundary Layer) จะถูกสร้างขึ้นจากผลของแรงเสียดทานที่ผิวของพื้นอุโมงค์ลม ซึ่งถูกจำลองให้มีสภาพสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศจริง โดยการใช้บล็อกสี่เหลี่ยมขนาดเล็กติดตั้งไว้บนพื้น ดังรูปที่ 3.13 โดยปกติความสูงของชั้นบาวคาร์เลเยอร์ ที่สร้างขึ้นมี

ค่าประมาณ 0.5 ถึง 1.0 เมตรภายใต้ความยาว 20-30 เมตร ในอุโมงค์ลม ซึ่งความสูงของชั้นบาดเตอร์เลเยอร์นี้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการติดอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive Devices) ที่บริเวณต้นทางของส่วนทดสอบ นอกจากนี้ อุปกรณ์แบบพาสซีฟยังมีความจำเป็นในกรณีที่ต้องการจำลองสภาพลมตามธรรมชาติ ในบริเวณเหนือทะเลหรือมหาสมุทร และในภูมิภาคประเทศแบบโล่งที่มีความขรุขระน้อยหรือปานกลาง

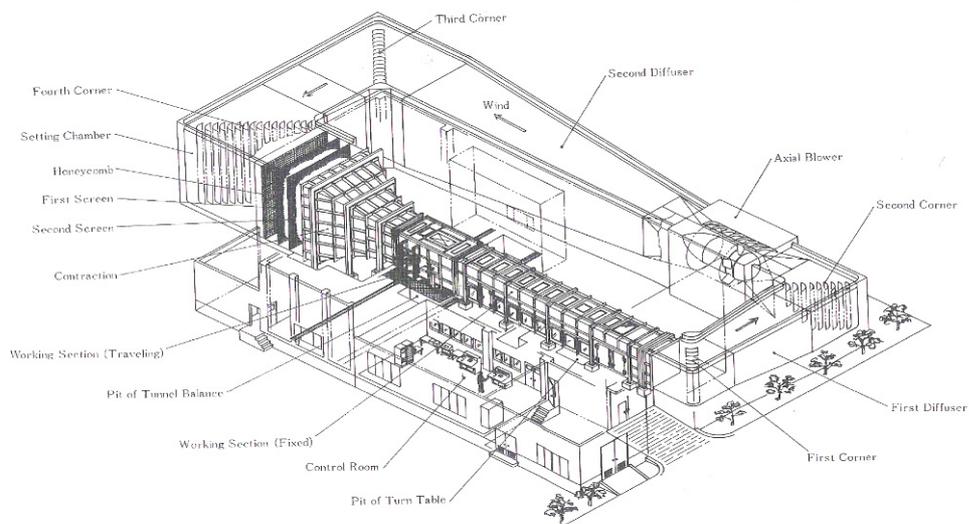
ตัวอย่างของอุโมงค์ลมช่วงยาวแบบเปิด เช่น อุโมงค์ลมของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (TU) โดยความร่วมมือกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) อุโมงค์ลม TU-AIT (รูปที่ 3.10) เป็นอุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่ และทันสมัยที่สุดแห่งหนึ่งในเอเชีย โดยมีความยาวช่วงทดสอบ 25.5 เมตร ขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ คือ กว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร ความเร็วลมที่ใช้ทดสอบระหว่าง 0.5 ถึง 20 เมตรต่อวินาที และมีจุดรองรับโครงสร้างที่ปรับทิศทางรับลมได้ 2 ตำแหน่ง ประกอบด้วยเครื่องมือวัดและประมวลผลพื้นฐานที่จำเป็นต่างๆ องค์ประกอบสำคัญของอุโมงค์ลมประกอบด้วย

- ใบพัดและมอเตอร์ ที่ใช้ขับเคลื่อนให้พาอากาศถูกพัดเป็นลมที่มีความเร็วที่สามารถควบคุมได้
- Diffuser เป็นส่วนที่ขยายขนาดของหน้าตัดที่ลมเคลื่อนตัว และลดความเร็วลมลงเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน
- Honey comb และ Screen เพื่อใช้กรองกระแสลมที่มีส่วนผสมของความแปรปรวนให้เรียบขึ้น
- Contraction cone คือบริเวณที่หน้าตัดลดขนาดลงเพื่อเร่งความเร็วลม ซึ่งเมื่อลมออกไปจากส่วนนี้จะเป็นลมที่เรียบและมีความเร็วตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.10 อุโมงค์ลมช่วงยาวแบบเปิด ของ TU-AIT

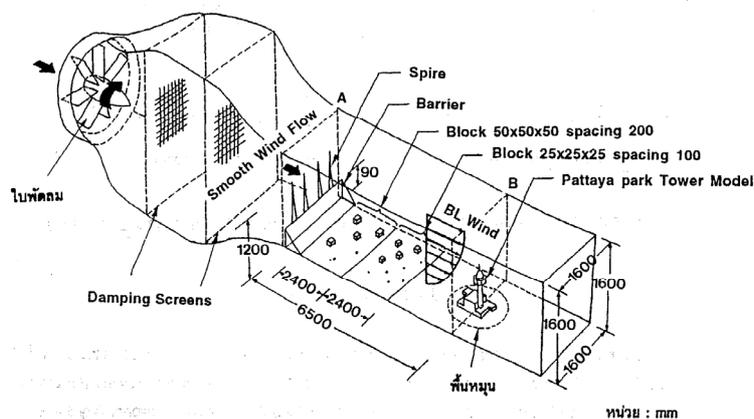
ตัวอย่างของอุโมงค์ลมช่วงยาวแบบปิดของบริษัท Kawasaki Heavy Industries ประเทศญี่ปุ่น แสดงในรูปที่ 3.10 โดยมีความยาวช่วงทดสอบ 20 เมตร ขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ คือ กว้าง 2.5 เมตร สูง 3 เมตร ความเร็วลมที่ใช้ทดสอบระหว่าง 0.2 ถึง 25 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.11 อุโมงค์ลมช่วงยาวแบบปิด [Simiu and Scanlan, 1996]

2) อุโมงค์ลมช่วงสั้น

อุโมงค์ลมประเภทนี้นิยมใช้ในการทดสอบทางด้านการบิน ซึ่งลักษณะของลมที่จำลองที่ใช้เป็นแบบสม่ำเสมอ (Smooth Flow) ดังนั้นความยาวของช่วงทดสอบจึงสั้น อย่างไรก็ตามอุโมงค์ลมประเภทนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบทางด้านวิศวกรรมโยธาได้ด้วยการติดอุปกรณ์แบบพาสซีฟที่บริเวณต้นทางของส่วนทดสอบ เพื่อสร้างลักษณะลมธรรมชาติ เช่น กริด (Grid) เฟนส์ (Fence) และสไปร์ (Spire) นอกจากนี้ในพื้นที่ทดสอบจะมีการติดตั้งบล็อกสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่พื้นเช่นเดียวกับในอุโมงค์ลมช่วงยาว ตัวอย่างของอุโมงค์ลมประเภทนี้เช่น อุโมงค์ลมที่ติดตั้งที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [เทพมังกร และคณะ, 2539]



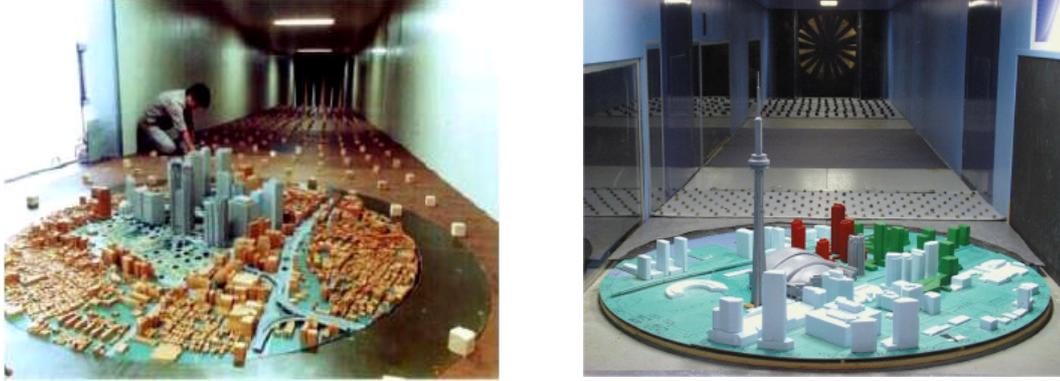
รูปที่ 3.12 อุโมงค์ลมช่วงสั้นแบบเปิดของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2 การจำลองลักษณะลมธรรมชาติภายในอุโมงค์ลม

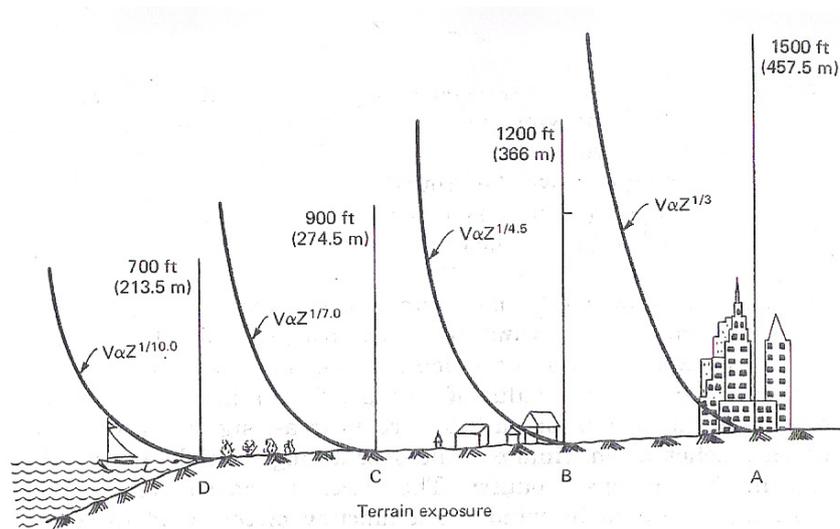
สิ่งสำคัญประการหนึ่งในการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม คือ การจำลองลักษณะลมให้ได้ใกล้เคียงกับลมที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติในบริเวณตำแหน่งที่ตั้งของอาคารดังแสดงในรูปที่ 3.13 การจำลองลักษณะลมธรรมชาติภายในอุโมงค์ลมประกอบด้วยลักษณะที่สำคัญ 3 ประการคือ

- 1) ลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยที่แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดิน (Variation of Mean Wind Speed with Height) ดังแสดงในรูปที่ 3.5
- 2) สภาพความแปรปรวนของลมในรูปของความเข้มข้นของความแปรปรวน (Turbulence Intensities) และ อินทิกรัลสเกล (Integral Scale) ที่แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดิน

- 3) ค่า Spectra และ Cross-spectra ของความแปรปรวนในทิศทางตามลม ตั้งฉากกับลม และในแนวตั้ง

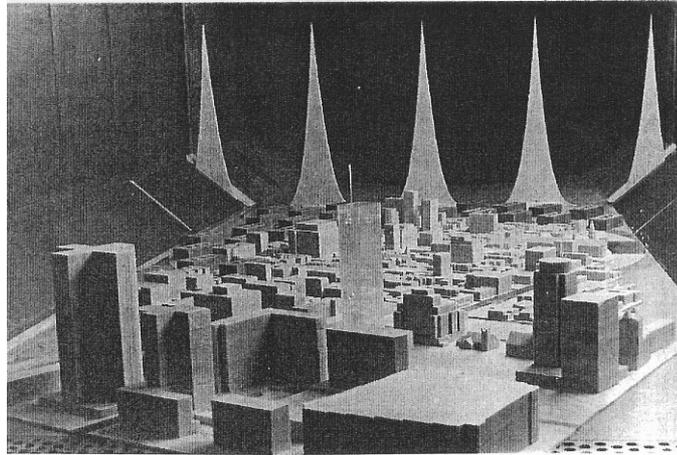


รูปที่ 3.13 การจำลองลักษณะลมธรรมชาติและอาคารโดยรอบ



รูปที่ 3.14 ลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยที่แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินในภูมิภาคแบบต่างๆ ตามมาตรฐานของประเทศไทย [ASCE 7-95]

วิธีที่ใช้ในการจำลองลักษณะลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติ (Natural Growth Method) แสดงในรูปที่ 3.13 และวิธีแบบใช้ตัวเร่ง (Augmented Method) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยวิธีแรก ต้องการความยาวอุโมงค์ลมที่มีความยาวเพียงพอที่จะทำให้บาวคาร์เลเยอร์ ก่อตัวขึ้นที่ละน้อยจากแรงเสียดทานที่ผิวของพื้นอุโมงค์ลม ซึ่งถูกทำให้มีสภาพขรุขระ วิธีที่สองเป็นการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น กริด เฟนส์ และสไปร์ เพื่อช่วยลดความยาวที่ต้องการในการสร้างบาวคาร์เลเยอร์



รูปที่ 3.15 การจำลองลักษณะชุมชนชาติในอุโมงค์ลมช่วงสั้นโดยวิธีแบบใช้ตัวเร่ง

3.4.3 ผลของสิ่งกีดขวาง (Blockage Effects) ในอุโมงค์ลม

ในการพิจารณาการย่อส่วนต้องคำนึงถึงผลของผนังอุโมงค์ลม และสิ่งกีดขวางที่มากเกินไปด้วย สิ่งกีดขวางทำให้ทำให้ลักษณะของลมที่ไหลผ่านบริเวณแบบจำลองเปลี่ยนไป อัตราส่วนของสิ่งกีดขวาง(รูปที่11) คือพื้นที่หน้าตัดของแบบจำลอง และอาคารโดยรอบในทิศทางตั้งฉากกับลม (A_m) ต่อพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม (A_w) อัตราส่วนของสิ่งกีดขวางในอุโมงค์ลมไม่ควรเกิน 5% เพื่อลดผลของสิ่งกีดขวาง [Wind Tunnel Studies,1999]

3.4.4 ชนิดของการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างภายในอุโมงค์ลมและข้อมูลที่ได้

3.4.4.1 การทดสอบด้วยแบบจำลองแข็ง (Rigid Model)

การทดสอบประเภทนี้ใช้เพื่อศึกษาการผันผวนของความดันที่บริเวณผนังรอบโครงสร้างเนื่องจากลม แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองที่แข็งและมีรายละเอียดครบถ้วน และติดตั้งด้วยหัววัดความดันกระจายตลอดทั้งผนังที่ต้องการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และเก็บข้อมูลบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ด้วยความละเอียดสูง แบบจำลองวางอยู่บนที่รองรับที่สามารถปรับทิศทางที่ลมเข้ามาได้ (Turn table) ผลการศึกษาอาจแสดงอยู่ในรูปเส้น Contour ที่มีความดันเท่ากัน และใช้สำหรับการออกแบบผนัง หรือกระจก นอกจากนี้สำหรับอาคารที่มีรูปทรงอย่างง่ายและแข็งแรง ผลการศึกษาสามารถใช้แปลงเป็นแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่ออาคารได้



ก.

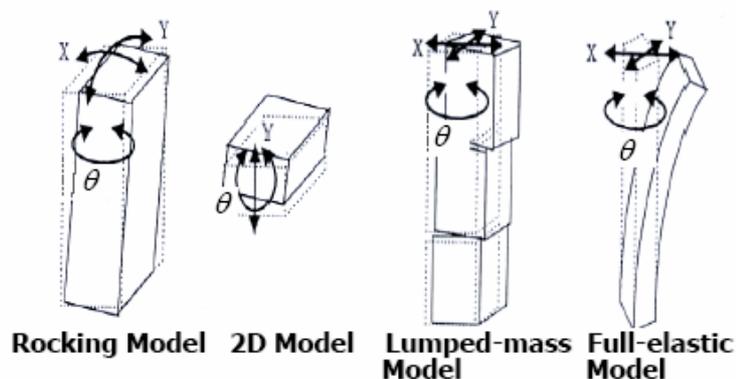


ข.

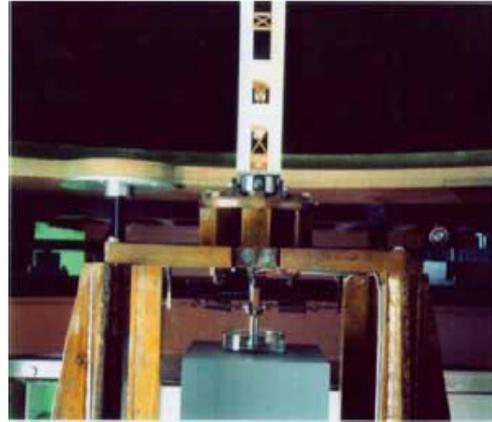
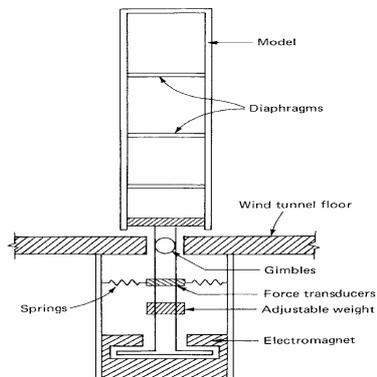
รูปที่ 3.16 การติดตั้งหัววัดความดันบนผิวของแบบจำลองแข็งเพื่อวัดการผันผวนของความดันที่บริเวณหลังคาโค้ง (รูป ก) และผนังรอบโครงสร้างเนื่องจากแรงลม (รูป ข)

3.4.4.2 การทดสอบด้วยแบบจำลองยืดหยุ่น (Aeroelastic Model)

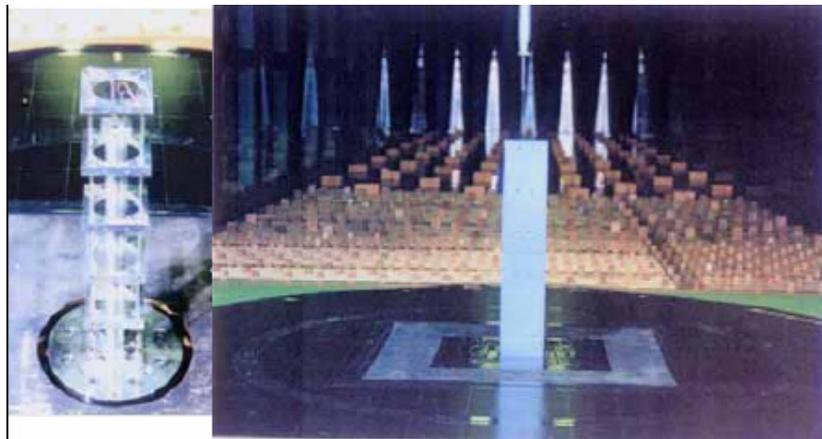
การทดสอบประเภทนี้ใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างที่มีการตอบสนองต่อแรงพลศาสตร์สูง เช่น อาคารสูง สะพานช่วงยาว โครงสร้างที่มีความชะลูดสูง ซึ่งการตอบสนองต่อแรงลมของโครงสร้างเหล่านี้ทำให้เกิดแรงที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโครงสร้างเองด้วย (Self-excited Force) ซึ่งส่งผลให้แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งการทดสอบจะต้องจำลองย่อขนาดของโครงสร้าง และคำนึงถึงสัดส่วนของ มวล ความถี่ธรรมชาติ และอัตราความหน่วงของแบบจำลองเทียบกับโครงสร้างจริงด้วย การทดสอบมักศึกษาผลการตอบสนองของแบบจำลองภายใต้แรงลมที่ระดับความรุนแรงต่างๆ โดยพิจารณาเทียบเป็นคาบเวลาการเกิดซ้ำต่างๆ เช่น 10 ปี 50 ปี หรือ 100 ปี เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมต่อการใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้าง ตัวอย่างและชนิดของแบบจำลองยืดหยุ่นแสดงในรูปที่ 3.17 ถึง 3.20



รูปที่ 3.17 ชนิดของแบบจำลองยืดหยุ่น



รูปที่ 3.18 แบบจำลองยึดหยุ่นชนิด Rocking Model



รูปที่ 3.19 แบบจำลองยึดหยุ่นของอาคารสูงชนิด Lump-mass Model



(ก)



(ข)

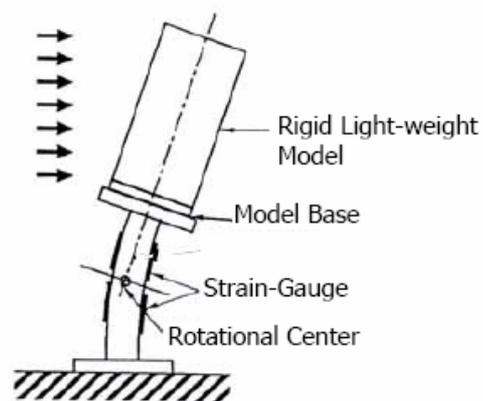
รูปที่ 3.20 สะพาน Akashi Kaikyo (ก) แบบจำลองยึดหยุ่นของสะพานในอุโมงค์ลม
(ข) การโค้งตัวด้านข้างของสะพานภายในอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.21 แบบจำลองหน้าตัดแบบ Sectional Model

3.4.4.3 การทดสอบด้วยวิธี High-Frequency Force Balance

เป็นวิธีที่ใช้เพียงแบบจำลองที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนโครงสร้าง แต่ไม่ต้องจำลองคุณสมบัติด้าน มวล ความถี่ธรรมชาติ และอัตราความหน่วง ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายดังแสดงในรูปที่ 3.22 วิธีนี้เป็นการทดสอบวัดแรงที่กระทำที่ฐานของแบบจำลองเพื่อนำไปประมาณค่าแรง และการตอบสนองที่เกิดขึ้นของโครงสร้างจริงตามสมมติฐานของรูปแบบการสั่นไหว (Mode) ที่หนึ่ง มีรูปร่างเป็นเส้นตรง ระบบของแบบจำลองและฐานที่ใช้ต้องสร้างให้มีความถี่ธรรมชาติสูงอย่างน้อย 100 Hz เพื่อไม่ให้มีผลของการตอบสนองแบบกำทอน (Resonance) ต่อการแปรปรวนของลมในช่วงความถี่ที่สนใจ วิธีนี้มีข้อจำกัดคือเหมาะสำหรับปัญหาที่ผลตอบสนองของโครงสร้างไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงลมที่มากระทำ



รูปที่ 3.22 แบบจำลองแบบ High-Frequency Force Balance

3.4.4.4 การทดสอบระดับของแรงลมต่อผู้สัญจร (Pedestrian Wind)

การทดสอบประเภทนี้ใช้ศึกษาทิศทางและความรุนแรงของลมที่มีผลต่อผู้สัญจรบริเวณรอบๆ โครงสร้าง โดยเฉพาะการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก่อนการดำเนินการโครงการ ซึ่งปัญหาอาจเกิดขึ้นเมื่อแนวการเคลื่อนตัวของลมถูกบัง ลมอาจหมุนตัวหรือพัดขึ้นด้วยความเร็วสูง การศึกษาทำได้โดยจำลองรูปร่างภายนอกของอาคารและสภาพแวดล้อม จากนั้นวัดความเร็วลมที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณใกล้เคียงกับอาคารที่ศึกษา ทำการเปรียบเทียบความเร็วลมที่เกิดในกรณีที่มีอาคารและไม่มีอาคารเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจสร้างอาคาร นอกจากนี้แนวการทดลองนี้สามารถใช้ศึกษาการแพร่กระจายของ ก๊าซต่างๆ หรือมลพิษที่แพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อมของแหล่งอุตสาหกรรมที่สภาพภูมิประเทศต่างๆ ได้ด้วย

ตารางที่ 3.3 ชนิดของการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างภายในอุโมงค์ลมและข้อมูลที่ได้

| ชนิดของการทดสอบ | ข้อมูลที่ได้ |
|---|---|
| <p><u>ความดันลม ณ จุดต่างๆ ของผนังโดยรอบของอาคาร (Local Pressure)</u></p> <p>ทดสอบการผันผวนของความดันที่จุดต่างๆ ของโครงสร้างเนื่องจากลมโดยใช้แบบจำลองแข็งและติดตั้งหัววัดความดันจำนวนมาก</p> | <ul style="list-style-type: none"> ความดันลมภายนอกเฉลี่ยและความแปรปรวน ที่จุดต่างๆ รอบอาคาร สำหรับการออกแบบผนังหรือกระจก ผลของช่องเปิดที่มีต่อความดันลมภายในของอาคาร ค่าความดันสุทธิที่กระทำต่อส่วนต่างๆ ของผนังรอบอาคาร |
| <p><u>แรงลมที่กระทำต่อพื้นที่บางส่วนหรือทั้งหมดของอาคาร (Area and Overall Wind Loads)</u></p> <p>ทดสอบแรงลมที่กระทำต่อพื้นที่ส่วนต่างๆ ของอาคาร โดยใช้แบบจำลองในการหาความดันและทำการวิเคราะห์หาค่าแรงลมเฉลี่ยจากข้อมูลความดันที่จุดต่างๆ ในเวลาเดียวกัน</p> | <ul style="list-style-type: none"> ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของแรงลมที่กระทำกับพื้นที่ส่วนต่างๆ ของอาคารจากผลของทั้งความดันภายในและภายนอก แรงลมทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้าง และแรงที่กระทำในแต่ละรูปแบบการสั่นไหวที่ต้องการ ข้อมูลของความดันลมที่ผนังภายนอกในหลายๆ จุดของอาคารที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลาสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าแรงกระทำทางด้านพลศาสตร์ในแต่ละรูปแบบการสั่นไหว เพื่อประมาณผลตอบสนองต่อแรงลมของอาคาร |

| | |
|--|---|
| <p><u>High-Frequency Force Balance</u> วัดแรงที่ฐานของแบบจำลองเพื่อนำไปประมาณค่าแรงและการตอบสนองที่เกิดขึ้นของโครงสร้างจริง โดยแบบจำลองที่ใช้ต้องมีความถี่ธรรมชาติสูงเพื่อไม่ให้มีผลของการตอบสนองแบบกำทอน (Resonance) ต่อการแปรปรวนของลมในช่วงความถี่ที่สนใจ</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ค่าผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้าง • ค่า Spectra ของแรงลมที่กระทำเมื่อสามารถทราบค่าการตอบสนองแบบกำทอน • นิยมใช้ในการหาค่าแรงที่กระทำสำหรับการโค้งตัวด้านข้างและการบิดสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานของอาคารสูง • สามารถนำแรงที่ได้จากการทดสอบนำไปวิเคราะห์หาผลตอบสนองของอาคารเช่น การโค้งตัวด้านข้างและอัตราเร่ง |
| <p><u>Sectional Model Test</u> ทดสอบแบบจำลองหน้าตัดบางส่วนของโครงสร้างที่ติดตั้งอยู่บนสปริงซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติทาง ด้านพลศาสตร์มักใช้กับหน้าตัดโครงสร้างของสะพานช่วงยาว เช่น สะพานขึง และ สะพานแขวน</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ค่าแรงลมและการตอบสนองทั้งแบบเฉื่อยและแบบพลศาสตร์ • ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงที่เกิดจากการกระตุ้นของโครงสร้างเองภายใต้แรงลม (Aerodynamic Derivatives) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางด้าน Aeroelastic |
| <p><u>แบบจำลองยืดหยุ่น (Aeroelastic Model)</u> ทดสอบแบบจำลองยืดหยุ่น โดยจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ ใช้กับอาคาร สะพาน และ โครงสร้างรูปแบบต่างๆ</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ข้อมูลของการตอบสนองของอาคารโดยคำนึงผลของการสั่นไหวร่วมระหว่างโครงสร้างและลม (Motion-dependent or Aeroelastic Forces) ซึ่งไม่สามารถหาได้โดยการทดสอบแบบสถิต • ค่าแรงลมและการตอบสนองของโครงสร้างทั้งแบบเฉื่อยและแบบพลศาสตร์รวมทั้ง การโค้งตัวด้านข้าง การหมุน และ อัตราเร่งของโครงสร้าง • การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ควบคุมการสั่นไหวของอาคารทั้งในแบบแอคทีฟ (Active) และแบบพาสซีฟ (Passive) • ผลกระทบร่วมกันของแรงลมและแรงกระทำอื่นๆ |
| <p><u>ระดับของแรงลมต่อผู้สัญจร (Pedestrian Wind)</u> ทดสอบเพื่อประเมินทิศทางและความ</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ลักษณะการเคลื่อนที่และการไหลของลมรอบอาคารหรือโครงสร้าง • ทิศทางและความรุนแรงของลมจากผลของอาคาร |

| | |
|--|--|
| <p>รุนแรงของลมที่มีผลต่อผู้ที่สัญจรบริเวณรอบๆ โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองย่อส่วนแบบสถิต</p> | <p>เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก่อนการดำเนินการโครงการ รวมถึงการปรับปรุงและแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากอาคาร</p> |
| <p><u>การจำลองสภาพภูมิประเทศ (Terrain and Topographic Test)</u> การทดสอบแบบจำลองย่อส่วนขนาดเล็กของสภาพภูมิประเทศแบบต่างๆ โดยใช้ flow visualization, hot-wire anemometry หรือทั้ง 2 แบบ</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ลักษณะการไหลของลมบริเวณภูมิประเทศแบบต่างๆ รวมถึงการประเมินหาค่าความขรุขระของพื้นที่ • ค่าความสัมพันธ์ของการไหลของลมที่ตำแหน่งและความสูงต่างๆ เพื่อใช้ในการเทียบสอบข้อมูลของสถานีวัดอากาศ • การประเมินค่าพลังงานศักย์ของลม ณ จุดที่ตั้งของโครงการ |

3.4.5 การทดสอบแบบจำลองสะพานในอุโมงค์ลม

การออกแบบสะพานแขวนหรือสะพานจึงต้องออกแบบให้สามารถต้านแรงลากที่เกิดภายใต้แรงลมได้ นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้สามารถทนทานต่อผลกระทบจาก aeroelastic effects ซึ่งได้แก่ torsional divergence, vortex-shedding, flutter, galloping และ buffeting ซึ่งอยู่ในรูปของ self-excited forces การศึกษาผลกระทบของลมนั้นไม่เพียงแต่ผลกระทบของลมเมื่อสะพานสร้างเสร็จแล้วเท่านั้น แต่ต้องศึกษาผลกระทบของลมขณะก่อสร้างด้วย โดยทั่วไปการทดสอบและการวิเคราะห์นั้นมิวัตุประสงค์หลัก คือเพื่อลดความเสี่ยงของสะพานบางส่วนที่สร้างเสร็จแล้วโดยใช้การยึดรั้งชั่วคราวและอุปกรณ์เพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้าง และอีกวัตถุประสงค์หนึ่งก็เพื่อลดความเสี่ยงต่อลมรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นส่วนใหญ่การก่อสร้างจะกระทำในช่วงโอกาสที่จะเกิดพายุน้อยที่สุด

การศึกษาผลกระทบต่างๆ เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะต้องศึกษาผ่านการทดสอบในอุโมงค์ โดยการทดสอบที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ประเภทหลักคือ

3.4.5.1 การทดสอบแบบจำลองทั้งสะพานหรือ full bridge model

เป็นการทดสอบโดยการจำลองสะพานทั้งสะพาน โดยแบบจำลองจะต้องมีขนาดสัดส่วนต่างๆ เหมือนกับสะพานจริงเพียงแต่ย่อส่วนลงมา อัตราส่วนขนาดในการย่อส่วนอยู่ระหว่าง 1/300 ถึง 1/1000 นอกจากนี้จะต้องมีคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และอากาศพลศาสตร์

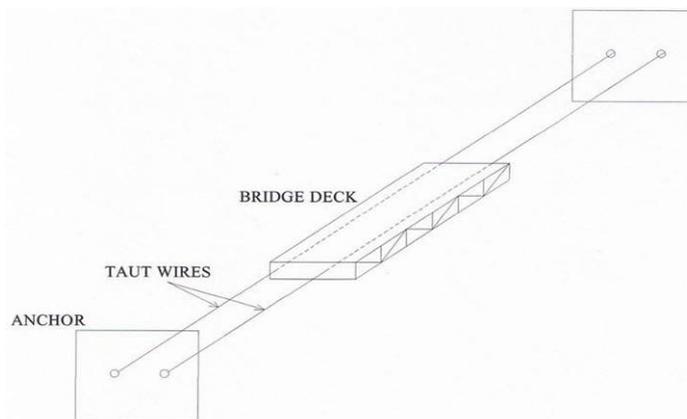
ต่างๆ คล้ายคลึงกับสะพานจริง อันได้แก่ การกระจายมวลของสะพาน (mass distribution) ความถี่ลดรูป (reduced frequency) ความหน่วง (mechanic damping) และรูปแบบของการสั่นไหว (vibration mode shape) แต่ค่าก่อสร้างแบบจำลองแบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูง



รูปที่ 3.23 Full bridge model

3.4.5.2 การทดสอบแบบจำลองบางส่วน หรือ three-dimensional partial-bridge model หรือ taut strip model

แบบจำลองแบบนี้จะจำลองบางส่วนของสะพาน เช่น ช่วงหลักของสะพานแล้วยึดหัวและท้ายด้วย taut wires หรือ taut tubes หรือ fine-wire catenary จากรูปที่ 3.24 และโดยปรกติแล้วจะใช้ทดสอบรูปแบบการสั่นไหวในแนวตั้งและการบิด การทดสอบจะเป็นการทดสอบภายใต้สภาพแบบ 3 มิติภายในอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.24 Taut strip model [Davenport et al, 1992]

3.4.5.3 การทดสอบแบบจำลองหน้าตัด หรือ section model

แบบจำลองแบบนี้เป็นการจำลองสะพานเพียงบางช่วง โดยความยาวที่จะใช้ขึ้นอยู่กับขนาดของอุโมงค์ลม อัตราส่วนขนาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1/50 ถึง 1/25 การติดตั้งจะติดตั้งโดยใช้สปริงติดที่ปลายทั้งสองด้านของสะพานให้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงและบิดได้ และมีแผ่นปิดที่หัวท้ายของแบบจำลองเพื่อลดผลกระทบทางอากาศพลศาสตร์ที่หัวท้ายของแบบจำลอง ลักษณะแบบนี้จึงเป็นการทดสอบแบบ 2 มิติ แบบจำลองแบบนี้มีราคาถูกกว่าสองแบบแรก นอกจากนี้ section model ยังสามารถใช้ศึกษาผลกระทบของแรงลมต่อบางโครงสร้างที่ชะลุดและมี aspect ratio สูงได้เป็นอย่างดีและใช้หาค่าต่างๆ ทางอากาศพลศาสตร์ ข้อดีของ section model อีกอย่างก็คือสามารถสร้างได้ง่ายและสามารถสร้างแบบจำลองได้ใหญ่กว่าแบบแรกทำให้สามารถสร้างรายละเอียดต่างๆ ของสะพานได้ถูกต้องกว่า ข้อเสียของการทดสอบแบบจำลองแบบนี้ คือไม่สามารถหาคูณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นที่ อับทเมนต์ ตอม่อ และทาวเวอร์ของสะพาน อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งเหล่านี้ได้รับผลกระทบจากแรงลมค่อนข้างน้อย

ความจริงแล้วการทดสอบแบบ section model นี้ให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือมากกว่าเมื่อเทียบกับสองวิธีแรกในแง่การทดสอบหาค่าการตอบสนองเดียวกัน เนื่องจากการที่สามารถสร้างรายละเอียดต่างๆ ให้เหมือนกับสะพานจริงได้ดีกว่านั่นเอง



รูปที่ 3.25 Section Model

3.4.6 ข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกัน (Similarity Requirements)

เพื่อให้ผลที่ได้รับจากการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างภายในอุโมงค์ลม สามารถเป็นตัวแทนของผลที่เกิดขึ้นในสภาพจริงได้ จึงได้มีการตั้งข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกันขึ้นเพื่อจะควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องให้มีความสอดคล้องกันทั้งในต้นแบบ (Prototype) และแบบจำลอง (Model)

3.4.6.1 ทฤษฎีการจำลอง

จากทฤษฎีทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Structural Dynamics) และ อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่สำหรับการสั่นไหวในรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (Fundamental Mode) ได้ดังต่อไปนี้ [เทพมังกร และคณะ, 2539]

$$m\ddot{x} + 2m\omega\xi\dot{x} + m\omega^2x = \int_0^H \left[\left(\frac{1}{2} \rho \bar{U} \right) DC(t, z) \right] \phi(z) dz \quad (3.62)$$

- โดยที่
- m คือมวลประสิทธิผล (Modal Mass) ของอาคารในรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน
 - ω คือ ความถี่ธรรมชาติ (Fundamental Frequency) ของอาคารสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที
 - ρ คือ ความหนาแน่นของมวลอากาศ มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 - ξ คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio)
 - x คือ การโก่งตัวด้านข้างที่ระดับยอดอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร
 - H คือ ความสูงของอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร
 - z คือ ความสูงจากพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตร
 - $\phi(z)$ คือรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน
 - \bar{U} คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับยอดอาคาร มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
 - D คือ ขนาดด้านกว้างของอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร
 - $C(t, z)$ คือ Normalized Wind Force เป็น ฟังก์ชันกับความสูงและเวลา

เทอมด้านขวามือของสมการที่ (3.62) คือ แรงประสิทธิผล ของอาคารในรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน โดยที่เทอมในวงเล็บ [] คือ แรงลมที่แพร่กระจาย ที่ระดับความสูง z และเวลา t

Normalized wind force เป็น ฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงอาคาร (ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม) และลักษณะสภาพของลมที่เข้ามาปะทะ เช่น ลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยที่แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดิน และสภาพความแปรปรวนของความเร็วลมในรูปของความเข้มข้นของความแปรปรวนตามความสูงจากพื้นดิน โดยถ้ากำหนดให้

$$\eta = \frac{x}{H} \quad \text{การโก่งตัวไร้หน่วย (Dimensionless Displacement)}$$

$$\kappa = \frac{z}{H} \quad \text{ความสูงไร้หน่วย (Dimensionless Height)}$$

$$\tau = \omega t \quad \text{เวลาไร้หน่วย (Dimensionless Time)}$$

และ $\tilde{c}(\tau, \kappa) = C(t = \omega\tau, z = \kappa H)$

$$\tilde{\phi}(\kappa) = \phi(z = \kappa H)$$

สามารถเขียนสมการ (3.62) ให้อยู่ในรูปของ สมการไร้หน่วย (Dimensionless Equation) ได้ดังนี้

$$\ddot{\eta} + 2\xi\dot{\eta} + \eta = \frac{1}{2}\rho \left(\frac{D^2 H}{m} \right) \left(\frac{\bar{U}}{\omega D} \right)^2 \left(\frac{D}{L} \right) \int_0^1 \tilde{c}(\tau, \kappa) \tilde{\phi}(\kappa) d\kappa \quad (3.63)$$

ในทำนองเดียวกันสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ (3.63) ได้เช่น เดียวกัน และเมื่อทำการปรับให้สัมประสิทธิ์ของเทอมในสมการ (3.63) เท่ากับในต้นแบบ (อาคารจริง) สมการการเคลื่อนที่จะเป็นสมการเดียวกัน นั่นหมายความว่า พฤติกรรมการสั่นไหวของแบบจำลองภายใต้แรงลม จะเหมือนกับการสั่นไหวของต้นแบบ

สำหรับเทอมสุดท้ายคือ $\int_0^1 \tilde{c}(\tau, \kappa) \phi(\kappa) d\kappa$ ซึ่งค่า $\tilde{c}(\tau, \kappa)$ คือ Normalized Wind

Force จะเหมือนกันในกรณีที่รูปร่างภายนอก (Geometric Shape) ของแบบจำลองและต้นแบบ มีความสัมพันธ์กันตามการย่อส่วนมิติที่ใช้ และลักษณะของความเร็วลมเฉลี่ยที่แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดิน และสภาพความแปรปรวนของความเร็วลมในรูปของความเข้มข้นของความแปรปรวนตามความสูงจากพื้นดิน มีความสัมพันธ์กันตามการย่อส่วนมิติ ดังกล่าวด้วย ส่วนค่า $\tilde{\phi}(\kappa)$ จะมีความแตกต่างกันบ้าง แต่สามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวประกอบแก้ไขรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape Correction Factor) [Wind Tunnel Studies, 1999]

3.4.6.2 การย่อส่วน

ในการย่อส่วน โครงสร้างนั้นอาศัยหลักการกลศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะทางด้านกลไกของแรงอันได้แก่ แรงยืดหยุ่น (elastic force) แรงเฉื่อย (inertia force) ของอากาศ และโครงสร้าง แรงหนืด (viscosity force) และแรงหน่วง (damping force) จำลองจากโครงสร้างจริงมาเป็นแบบจำลองโดยคุณลักษณะดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลง จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถย่อส่วนคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้างได้ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนขนาด อัตราส่วนความหนาแน่น อัตราส่วนความหน่วง

ในการทดสอบ ได้มีการกำหนดเงื่อนไข (Criteria) และ อัตราส่วนการย่อส่วน (Scale Ratio) ที่ใช้ดังนี้ โดยที่สัญลักษณ์ตัวห้อยล่าง m และ p หมายถึงคุณสมบัติของแบบจำลองและคุณสมบัติของต้นแบบ ตามลำดับ

- 1) การทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งมีความหนาแน่นของอากาศปกติ

$$\frac{(\rho)_m}{(\rho)_p} = \lambda_\rho \quad (3.64)$$

โดย λ_ρ คือการย่อส่วนความหนาแน่นอากาศ (Density Scale) = 1

- 2) การจำลองรูปร่างภายนอกกระทำโดยใช้ การย่อส่วนมิติ (Length Scale) เดียวกัน ทั้ง ความกว้างและความยาว

$$\left(\frac{D}{L}\right)_m = \left(\frac{D}{L}\right)_p \quad ; \quad \frac{D_m}{D_p} = \frac{L_m}{L_p} = \lambda_L = \text{การย่อส่วนมิติ} \quad (3.65)$$

- 3) การจำลองได้กำหนดให้ ความหนาแน่นมวลประสิทธิผล (Modal Mass Density) เท่ากัน

$$\left(\frac{m}{D^2H}\right)_m = \left(\frac{m}{D^2H}\right)_p \quad (3.66)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad m_m = \frac{(D^2H)_m}{(D^2H)_p} m_p = \lambda_L^3 m_p \quad (3.67)$$

- 4) การจำลองได้กำหนดให้ ความเร็วไร้หน่วย (Reduced Velocity) เท่ากัน

$$\left(\frac{\bar{U}}{\omega D}\right)_m = \left(\frac{\bar{U}}{\omega D}\right)_p \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \frac{\bar{U}_m}{\bar{U}_p} &= \left(\frac{\omega_m}{\omega_p} \right) \left(\frac{D_m}{D_p} \right) \\ \lambda_V &= \lambda_n \lambda_L \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad \lambda_n &= \frac{\omega_m}{\omega_p} = \text{การย่อส่วนความถี่ (Frequency scale) และ} \\ \lambda_V &= \frac{\bar{U}_m}{\bar{U}_p} = \text{การย่อส่วนความเร็วลม (Velocity scale)} \end{aligned}$$

ดังนั้น เมื่อเลือก การย่อส่วนมิติ และการย่อส่วนความเร็ว ให้เหมาะสมกับขนาดและความเร็วของอุโมงค์ลมตามลำดับ จะสามารถคำนวณการย่อส่วนความถี่ได้ตามสมการ (3.69) เช่นในการทดสอบกำหนดให้ การย่อส่วนมิติ มีค่าเท่ากับ $1/300$ และเลือกการย่อส่วนความเร็ว $= \sqrt{\lambda_L} = \frac{1}{\sqrt{300}}$ เพื่อให้การจำลองถูกต้องตามทฤษฎี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้

$$\begin{aligned} m_m &= \frac{1}{300^3} m_p \\ \lambda_n &= \frac{\lambda_V}{\lambda_L} = 1 / \sqrt{300} / 1/300 = \sqrt{300} \end{aligned}$$

5) การจำลองได้กำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) เท่ากัน

$$(\xi)_m = (\xi)_p \quad (3.70)$$

6) ในบางกรณี โดยเฉพาะสำหรับสะพานแขวน ซึ่งผลของแรงโน้มถ่วงของโลกมีผลต่อความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของโครงสร้าง เมื่อใช้แบบจำลองเต็มส่วนต้องคำนึงถึงความคล้ายคลึงกันของตัวเลข Froude

$$\left(\frac{\bar{U}^2}{Dg} \right)_m = \left(\frac{\bar{U}^2}{Dg} \right)_p$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\lambda_V^2}{\lambda_L \lambda_g} = 1 \quad (3.71)$$

โดยที่ λ_g คือการย่อส่วนอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Scale) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_L} \quad (3.72)$$

- 7) ในกรณีของโครงสร้างที่มีรูปทรงภายนอกไม่เป็นเหลี่ยม (non-sharp-edge shapes) เช่นรูปทรงกลม (Circular or Rounded Shapes) ต้องคำนึงถึงความคล้ายคลึงกันของตัวเลข Reynolds

$$\left(\frac{\bar{U}D}{\nu}\right)_m = \left(\frac{\bar{U}D}{\nu}\right)_p \quad (3.73)$$

เมื่อ ν = Kinematics Molecular Viscosity of the Fluid เมื่อทำการทดสอบในอุโมงค์ลมที่มีความหนาแน่นของอากาศปกติ ดังนั้น

$$\lambda_\nu \lambda_L = 1 \quad (3.74)$$

จากการพิจารณาการย่อส่วนดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถอธิบายการตอบสนองของอาคารของแบบจำลอง และของต้นแบบได้ดังนี้

- อัตราส่วนความเร่งที่เกิดขึ้นในแบบจำลองและในต้นแบบ

$$\frac{(\omega^2 x)_m}{(\omega^2 x)_p} = \lambda_m \cdot \lambda_L \quad (3.75)$$

- อัตราส่วนของการโก่งตัวด้านข้างที่เกิดขึ้นในแบบจำลองและในอาคาร

$$\frac{(x)_m}{(x)_p} = \lambda_L \quad (3.76)$$

บทที่ 4

วิธีการวิจัย

จากวัตถุประสงค์และขอบเขตในการทำวิจัย สามารถที่จะกำหนดขั้นตอนในการวิจัย เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการทำวิจัยได้ดังนี้

- 1) การออกแบบและจัดทำแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
- 2) การออกแบบและการติดตั้งมวลหน่วง (TMD)
- 3) การปรับปรุงหน้าตัดสะพาน Akashi kaikyo ทางด้านอากาศพลศาสตร์
- 4) การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าของแบบจำลองสะพานในอุโมงค์ลม
- 5) การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

4.1 การออกแบบและจัดทำแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

แบบจำลองสะพานแบบ Section Model นั้นได้ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของสะพานแขวนเมื่อมีลมมากระทำ ซึ่งการเคลื่อนที่ของสะพานนั้นได้ก่อให้เกิดผลกระทบกับตัวสะพานอย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองแบบ Section Model เป็นแบบจำลองที่มีสัดส่วนของโครงสร้างเหมือนกับสะพานจริงเพียงแต่ย่อส่วนลงมา และต้องมีพฤติกรรมสามารถใช้ทำนายการตอบสนองของโครงสร้างจริงได้ ดังนั้นแบบจำลองนี้ต้องออกแบบให้มีพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับสะพานจริงดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.1.1 พารามิเตอร์ที่คล้ายคลึงกันในแบบจำลองสะพานและในสะพานจริง

กฎของความคล้ายคลึงที่ใช้ในการย่อส่วนของแบบจำลองนั้นสามารถหาได้จากกฎทางกลศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะทางด้านกลไกของแรงอันได้แก่ แรงยืดหยุ่น (elastic force) แรงเฉื่อย (inertia force) ของอากาศและโครงสร้าง แรงหนืด (viscosity force) และแรงหน่วง (damping force) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเหล่านี้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทั้งนี้ก็เพื่อให้แน่ใจได้ว่าแบบจำลองสะพานนั้นมีความคล้ายคลึงกับสะพานจริง

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่คล้ายคลึงกันของแบบจำลองสะพานและสะพานจริง

| Parameter | Symbol | Physical meaning |
|---|-----------------------|---|
| 1.Elasticity | $\frac{E}{\rho U^2}$ | <u>Elastic force of the structure</u> Inertia force of the air |
| 2.Inertia (Density ratio) | $\frac{\rho_s}{\rho}$ | <u>Inertia force of the structure</u> Inertia force of the air |
| 3.Gravitational (Froude number) | $\frac{U^2}{gL}$ | <u>Inertia force of the air</u> Gravitational force of the structure |
| 4.Vicosity (Reynolds number) | $\frac{UL}{\nu}$ | <u>Inertia force of the air</u> Viscous force of the air |
| 5.Structural damping (Logarithmic decrement) | δ_s | <u>Dissipated energy per cycle</u> Total energy of oscillation |

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสของยัง U คือ ค่าความเร็วลม L คือ ขนาดของโครงสร้าง ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ ρ, ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศและของโครงสร้างตามลำดับ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ δ_s คือ Logarithmic decrement

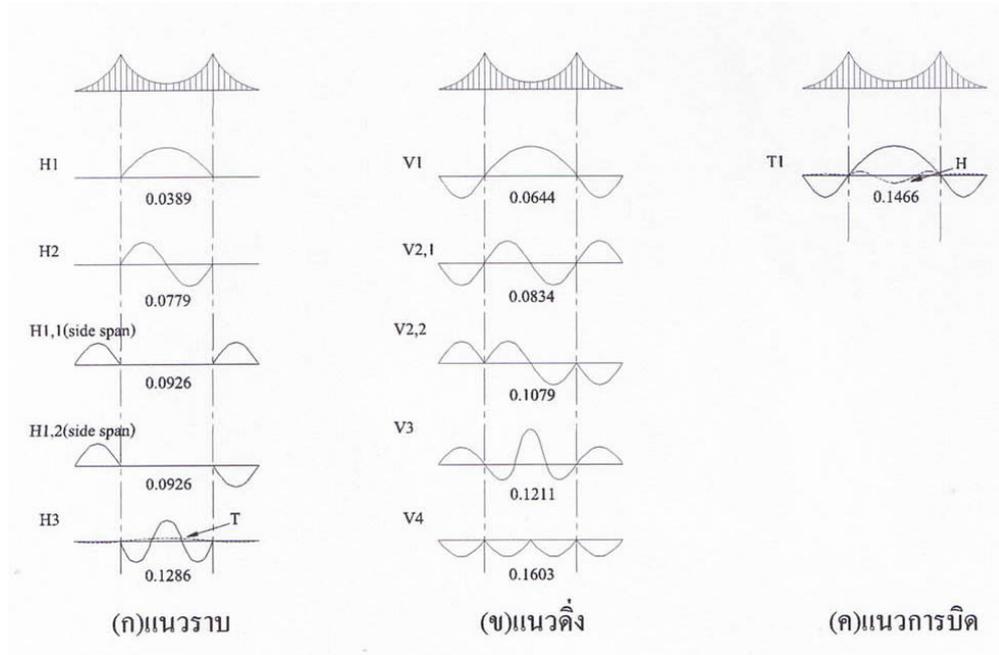
4.1.2 ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน Akashi kaikyō และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน Akashi kaikyō สามารถหาได้จากโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างชั้นสูงแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยหลายชิ้นได้หาไว้แล้ว ในงานวิจัยนี้จะนำความถี่ธรรมชาติที่ได้หาไว้จากงานวิจัยของ พิระศักดิ์ พานิชไตรภพ (2543) มาประกอบในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 4.1

ในงานวิจัยนี้จะนำความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน Akashi kaikyō ในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1(mode 1) ทั้งในแนวตั้ง (V1) และรูปแบบการสั่นไหวแนวตั้งที่ 3 (V3) และแนวการบิด (T1) และนำมาหาอัตราส่วนความถี่เพื่อทำการจัดทำแบบจำลองสะพานและออกแบบสปริง เพื่อให้ได้ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองสะพานตามที่ได้ย่อส่วนมา ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ส่วนความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมได้ใช้รูปแบบการการสั่นไหวที่ 1 ทั้งแนวตั้งและในแนวการบิด (V1, T1) ดังแสดงตารางที่ 4.3 ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองได้การคำนวณจากอัตราส่วนความถี่ที่เลือกใช้ แต่เนื่องจาก สปริงที่นำมาใช้ มีความคลาดเคลื่อนจากที่คำนวณได้ ความถี่ตามแนวตั้ง (V1) จึงคลาดเคลื่อนจากที่

คำนวณไว้เล็กน้อย ดังนั้นเพื่อคงสัดส่วนของความถี่ในแนวดิ่งกับแนวการบิดของสะพานไว้คงเดิม จึงทำการปรับระยะห่างระหว่างสปริงเพื่อให้ความถี่ในแนวการบิดที่ต้องการ



รูปที่ 4.1 ความถี่ธรรมชาติ(Hz) และรูปแบบการสั่นไหวของสะพาน Akashi kaikyo

4.1.3 การย่อส่วนของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวน อุตสาหกรรม

ในการศึกษาเสถียรภาพทางอากาศพลศาสตร์ของสะพาน ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องย่อส่วนแบบจำลองสะพานให้เหมาะสมโดยที่อัตราส่วนที่ใช้ย่อส่วนได้แก่ อัตราส่วนของขนาด (Length scale, λ_L) อัตราส่วนความหนาแน่น (Density scale, λ_p) อัตราส่วนมวลของโมเมนต์ความเฉื่อย (Mass moment of inertia scale, λ_I) อัตราส่วนความเร็วลม (Velocity scale, λ_v) อัตราส่วนความถี่ (Frequency scale, λ_f) อัตราส่วนความหน่วง (Damping scale, λ_s) ทั้งนี้เพื่อรายละเอียดของโครงสร้างต่างๆ ของสะพานสามารถสร้างได้ โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่เป็นโครงถักของสะพาน Akashi kaikyo ที่ค่อนข้างสร้างยาก ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้อัตราส่วนของขนาดเท่ากับ 1/50 หรือขนาดของแบบจำลองสะพานมีขนาด 1/50 ของสะพานจริง ส่วนสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมใช้อัตราส่วนของขนาดเท่ากับ 1/90 เนื่องจากสร้างรายละเอียดต่างๆ ได้ง่ายกว่าและเพื่อให้มีน้ำหนักเบา อัตราส่วนอื่นๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติในการย่อส่วนของแบบจำลองสะพาน Akashi kaiyo

| คุณสมบัติ | สัญลักษณ์ | สะพานจริง | อัตราส่วนย่อ | แบบจำลอง |
|--|--------------|-----------|--------------|----------|
| ความกว้าง (m) | B | 35.5 | 1/50 | 0.71 |
| ความสูง (m) | H | 14 | 1/50 | 0.28 |
| ความยาว (m) | L | 115 | 1/50 | 2.30 |
| มวลต่อหน่วยความยาว (kg/m) | M | 29,560 | $1/50^3$ | 11.83 |
| ความหน่วง %critical | ξ | 4.98 | 1 | 4.98 |
| มวลโมเมนต์ของความเฉื่อย (kg.m ² /m) | I_0 | 5,343,191 | $1/50^5$ | 0.855 |
| ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง, V1 (Hz) | f_{v1} | 0.0644 | $\sqrt{50}$ | 0.4554 |
| ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง, V3 (Hz) | f_{v3} | 0.1211 | $\sqrt{50}$ | 0.8563 |
| ความถี่ธรรมชาติในการบิด, T1 (Hz) | f_{θ} | 0.1466 | $\sqrt{50}$ | 1.0366 |
| ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง, V4 (Hz) | f_{v4} | 0.0644 | 10 | 0.6440 |
| ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง, T2 (Hz) | f_{t2} | 0.1466 | 10 | 1.4660 |

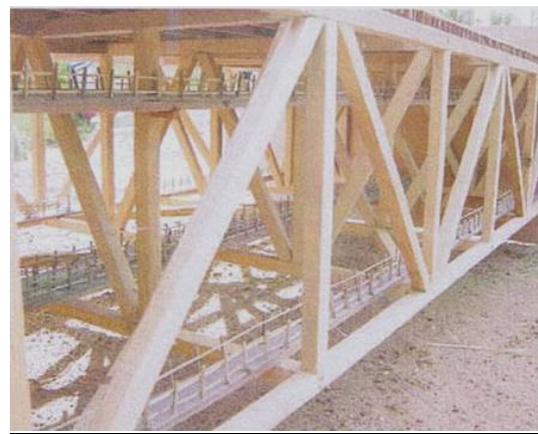
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติในการย่อส่วนของแบบจำลองสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

| คุณสมบัติ | สัญลักษณ์ | สะพานจริง | อัตราส่วนย่อ | แบบจำลอง |
|--|--------------|--------------------|-------------------------|----------|
| ความกว้าง (m) | B | 35.9 | 1/90 | 0.20 |
| ความสูง (m) | H | 3.26 | 1/90 | 0.035 |
| ความยาว (m) | L | 226.8 | 1/90 | 2.52 |
| มวลต่อหน่วยความยาว (kg/m) | M | 43,000 | $1/90^3$ | 5.09 |
| ความหน่วง % critical | ξ | N.A. | N.A. | 0.342 |
| มวลโมเมนต์ของความเฉื่อย (kg.m ² /m) | I_0 | 4.11×10^9 | 1.875×10^{-11} | 0.077 |
| ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง, V1 (Hz) | f_{v1} | 0.3760 | 5.72 | 2.1490 |
| ความถี่ธรรมชาติในการบิด, T1 (Hz) | f_{θ} | 0.8500 | 5.67 | 4.8175 |

จากอัตราส่วนความถี่จะเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วลมและอัตราส่วนขนาด ดังนั้นในการทดลองนั้น เราสามารถเลือกใช้อัตราส่วนขนาดและอัตราส่วนความเร็วลมต่างกันได้ เช่นใช้อัตราส่วนขนาด 1/50 แต่อัตราส่วนความเร็วลม 1/15 ได้ตามความเหมาะสม

ในการทดสอบในสะพาน Akashi kaikyo จึงได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 แบบคือ ใช้อัตราส่วนขนาด 1/50 และใช้อัตราส่วนอื่นๆ ตามสัดส่วนของอัตราส่วนขนาดเป็นหลักดังแสดงในตารางที่ 4.2 อีกแบบหนึ่งคือเลือกอัตราส่วนความถี่ค่าหนึ่งและใช้อัตราส่วนขนาด 1/50 แล้วนำไปหาอัตราส่วนความเร็วลม ในการทดสอบแบบที่ 2 นี้เลือกอัตราส่วนความถี่ 10 ซึ่งมาจากสปริงที่ใช้ทดสอบมีค่าสตีเฟนส 2,750 N/m และมวลของแบบจำลองสะพานเท่ากับ 21 kg จะให้ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง (V4) และแนวการบิด (T2) ของแบบจำลองสะพาน เท่ากับ 0.6440 Hz และ 1.4660 Hz ตามลำดับ และเพื่อพิสูจน์ว่าเราสามารถเลือกใช้อัตราส่วนความถี่และอัตราส่วนความเร็วลมได้อย่างอิสระ จึงจะนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันว่าการทดสอบทั้ง 2 แบบนั้นสะพานจะเกิด vortex shedding ที่ความเร็วลมเดียวกันและเกิด flutter instability ที่ความเร็วลมเดียวกันด้วยหรือไม่

เมื่อได้ขนาดของแบบจำลองสะพานแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือจัดทำแบบก่อสร้างเพื่อนำไปจัดสร้างต่อไป ในการจัดสร้างสะพาน Akashi kaikyo ได้เลือกใช้ไม้ฉลากลึงซึ่งมีน้ำหนักเบามาสร้างเป็นโครงสร้างของโครง truss ของสะพาน พื้นผิวจราจร คานขวาง และคานชอยใช้ไม้อัดหนา 2 ม.ม. และได้ใช้ไม้ไผ่หลาวเป็นส่วนของราวสะพาน ส่วนทางเดินใต้สะพานที่ใช้สำหรับซ่อมบำรุงนั้นใช้มุงลวดประกบสองชั้นเป็นพื้นทางเดิน ซึ่งในโครงสร้างจริงนั้นเป็นโครงเหล็กแบบ flatbar เชื่อมสานเป็นตะแกรง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมใช้ไม้อัดความหนา 2 ม.ม. ทำพื้นผิวจราจร และคานชอย ส่วนคานขวางใช้ไม้อัดขนาด 4 ม.ม. ราวสะพาน ทำด้วยลวดอลูมิเนียมขนาด 1 ม.ม. และในส่วนของ Girder ข้าง ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 0.1 ม.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo ก่อนติดตั้งในอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.3 แบบจำลองวงแหวนอุตสาหกรรม ก่อนติดตั้งในอุโมงค์ลม

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นถึงภาพของแบบจำลองสะพานที่สร้างเสร็จแล้วพร้อมที่จะนำไปติดตั้งเพื่อทดสอบในอุโมงค์ลมแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบสปริงที่ใช้แทนสติเฟนสของสะพาน

4.1.4 การออกแบบสปริงเพื่อใช้ในแทนสติเฟนสของแบบจำลองสะพาน

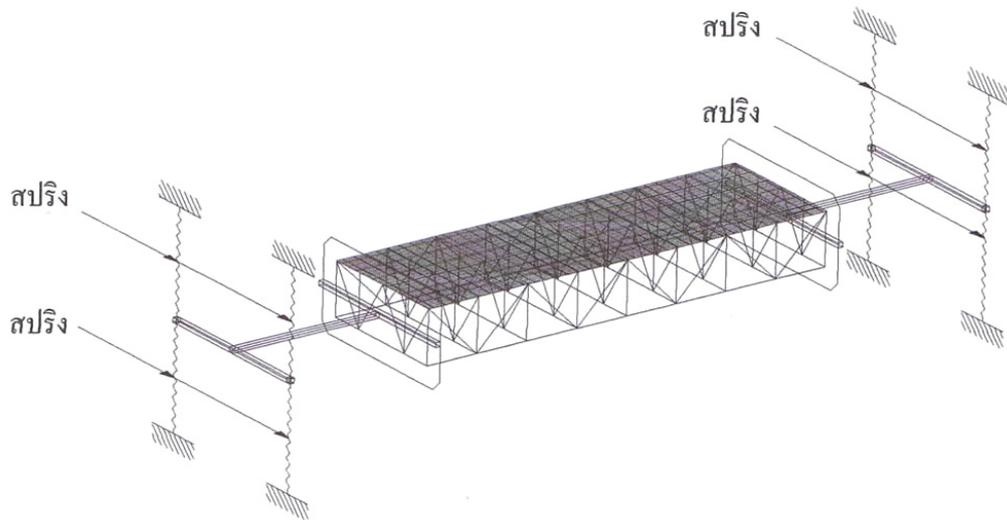
4.1.4.1 การออกแบบขนาดของสปริง

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการออกแบบสปริงของสะพาน Akashi kaikyo ซึ่งในการทดสอบแบบจำลองสะพานแบบ section model นั้นเราจะต้องทำแบบจำลองสะพานนั้นให้ได้ความถี่ธรรมชาติทางแนวดิ่งและแนวนอนเท่ากับที่ออกแบบไว้ โดยใช้สปริงในการแทนสติเฟนสของสะพานแล้วใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.1) ไปหาสติเฟนสของสปริงที่ต้องการ

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4.1)$$

เมื่อ ω คือความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองสะพาน K คือสติเฟนสรวมของสปริง และ m คือมวลของแบบจำลองสะพาน

ในการติดตั้งสปริงเข้ากับแบบจำลองสะพานต้องใช้สปริงทั้งหมด 8 ตัว ด้านละ 4 ตัว ดังรูปที่ 4.4 ยึดเข้ากับโครงสร้างที่รองรับตัวสะพานซึ่งเป็นท่ออลูมิเนียมขนาด 1 นิ้ว อีกด้านหนึ่งของสปริงก็ยึดเข้ากับที่รองรับของอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.4 การติดตั้งสปริงเข้ากับแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyō

ดังนั้นสปริงแต่ละตัวจะมีค่าสตีเฟเนส, $k=K/8$ และในการออกแบบสปริงนั้นจะออกแบบขนาดลวดของสปริง เส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนรอบของสปริงโดยใช้สมการที่ (4.2) ดังนี้

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (4.2)$$

เมื่อ k คือสตีเฟเนสของสปริงแต่ละตัว (kg/m) G คือโมดูลัสของแรงเฉือน (ksc) d คือ ขนาดของลวดสปริง (cm) n คือ จำนวนรอบของสปริง และ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเกลียวสปริง (cm) และค่า G หาได้จากสมการที่ (4.3)

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4.3)$$

เมื่อ E คือโมดูลัสของยังของลวดที่ใช้ทำสปริง มีค่าเท่ากับ 2.1×10^6 ksc และ μ คือ อัตราส่วนปัวซองของลวดที่ใช้ทำสปริง มีค่าเท่ากับ 0.3 ดังนั้น G จะเท่ากับ 0.8×10^6 ksc

เมื่อได้ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองสะพานจากตารางที่ 4.2 ซึ่งเท่ากับ 0.4554 Hz ในแนวตั้งและ 1.0366 Hz ในแนวราบแล้ว ก็นำมาหาค่าสตีเฟเนสของสปริงที่จะใช้ได้ดังนี้

$$K = m\omega^2 \quad (4.4)$$

เมื่อ $K = 8k$ ดังนั้นสปริงแต่ละตัวจะมีค่าสตีเฟเนสเท่ากับ

$$k = \frac{m\omega^2}{8} \quad (4.5)$$

เมื่อ มวลของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyō รวมอุปกรณ์รองรับ เท่ากับ 21 kg ดังนั้นเมื่อแทนค่า m และ ω ลงในสมการที่ (4.5) จะได้

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{21 \times (0.4554 \times 2\pi)^2}{8} \\
 &= 21.53 \quad \text{N/m} \\
 &= 2.20 \quad \text{kg/m} \\
 &= 0.022 \quad \text{kg/cm}
 \end{aligned}$$

ออกแบบสปริงได้เลือกใช้ลวดของสปริง, d ขนาด 0.2 cm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวสปริง, D ขนาด 4.0 cm ดังนั้นก็จะสามารถหาจำนวนรอบของสปริงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{Gd^4}{8kD^3} \quad (4.6) \\
 &= \frac{0.8 \times 10^6 \times 0.2^4}{8 \times 0.022 \times 4^3} \\
 &= 114
 \end{aligned}$$

4.1.4.2 การหาระยะห่างของสปริง

ในการกำหนดระยะห่างของสปริงนั้น ก็เพื่อให้แบบจำลองสะพานมีการบิดตัวตามความถี่ธรรมชาติในแนวการบิดตามที่ได้อำนาจไว้ตามตารางที่ 4.2 เราสามารถหาค่าระยะห่างของสปริงได้จากค่าของมวลโมเมนต์ของความถี่ของแบบจำลองสะพาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.7)-(4.9) ดังนี้

$$I = \frac{k_\theta}{(2\pi f_\theta)^2} \quad (4.7)$$

เมื่อ I คือ มวลโมเมนต์ของความถี่ของแบบจำลองสะพาน k_θ คือ ค่าสติเฟนในแนวการบิดของแบบจำลองสะพาน และ f_θ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติในแนวการบิดของแบบจำลองสะพาน

$$k_\theta = a^2 k_h \quad (4.8)$$

เมื่อ k_h คือ ค่าสติเฟนในแนวตั้งของแบบจำลองสะพาน มีค่าตามสมการที่ (4.9) และ a คือค่าระยะห่างของสปริงถึงศูนย์กลางของแบบจำลองสะพาน ดังรูปที่ 4.5

$$k_h = (2\pi f_h)^2 \mu \quad (4.9)$$

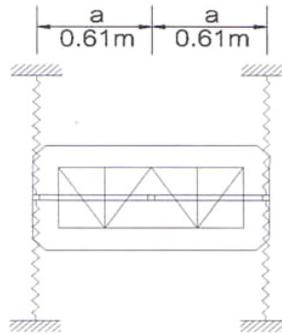
เมื่อ f_h คือ ค่าความถี่ธรรมชาติในแนวตั้งของแบบจำลองสะพาน และ μ คือ น้ำหนักของแบบจำลองสะพานต่อหน่วยความยาว

ดังนั้น เราจะสามารถหาค่าระยะห่างของสปริง, $2a$ ได้ดังดังนี้

$$2a = 2 \sqrt{\frac{(2\pi f_\theta)^2 I}{(2\pi f_h)^2 \mu}}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{(2\pi \times 1.0366)^2 \times 0.855}{(2\pi \times 0.4554)^2 \times 11.83}}$$

$$= 1.22 \text{ m}$$



รูปที่ 4.5 แสดงระยะการติดตั้งสปริงเข้ากับแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo

ในการออกแบบสปริงในความสัมพันธ์ในการสั้น V3, T1 และ V4, T2 ก็ใช้หลักการออกแบบสปริงข้างต้นเช่นเดียวกัน โดยสรุปไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปการออกแบบสปริงตามความถี่ต่างๆ

| ความถี่ธรรมชาติในการสั้น (Hz) | สปริงที่ใช้ในการทดสอบ | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------|----------|------------------|------|
| | ขนาดลวด (cm) | เส้นผ่า ศก.(cm) | จำนวนรอบ | ระยะห่างสปริง(m) | |
| สะพาน Akashi kaikyo | | | | | |
| V1,T1 | 0.4554,1.0366 | 0.2 | 4.0 | 114 | 1.22 |
| V3,T1 | 0.8563,1.0366 | 0.2 | 4.0 | 32 | 0.74 |
| V4,T2 | 0.6640,1.4660 | 0.2 | 4.0 | 57 | 1.40 |
| สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม | | | | | |
| V1, T1 | 2.1490,4.8175 | 0.14 | 1.3 | 322 | 0.52 |

4.1.5 การออกแบบและการติดตั้งมวลหน่วง (Tuned Mass Damper; TMD)

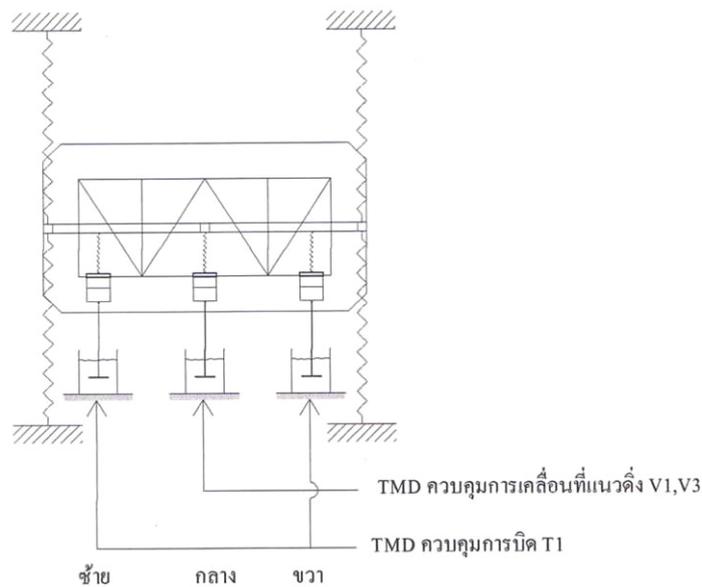
มวลหน่วงหรือ TMD นี้จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในเรื่องการควบคุมการสั่นไหวของสะพาน ว่าเป็นตัวที่ช่วยลดการสั่นไหวของสะพานนั้น ในงานวิจัยนี้จะควบคุมการสั่นไหวของแบบจำลองสะพานเมื่อรับแรงลมโดยใช้ TMD นี้ โดยออกแบบ TMD 2 แบบ คือ

- 1) TMD แบบที่มวลยึดติดกับตัวสะพานแต่ตัวหน่วงไม่ยึดติดกับตัวสะพาน (รูปที่ 4.6-4.7)
- 2) TMD แบบที่มวลและตัวหน่วงยึดติดกับตัวสะพาน (รูปที่ 4.8)

โดยหลักการและทางทฤษฎีแล้ว TMD ทั้งสองรูปแบบเหมือนกัน แตกต่างเพียงรายละเอียดของวัสดุที่ทำมวล ตัวหน่วง และการติดตั้งเท่านั้น ในแง่ของความสามารถในการลดการสั่นไหวของสะพานนั้นได้ผลเหมือนกัน

4.1.5.1 TMD แบบที่มวลยึดติดกับตัวสะพานแต่ตัวหน่วงไม่ยึดติดกับตัวสะพาน (แบบที่ 1) สำหรับสะพาน Akashi kaikyo

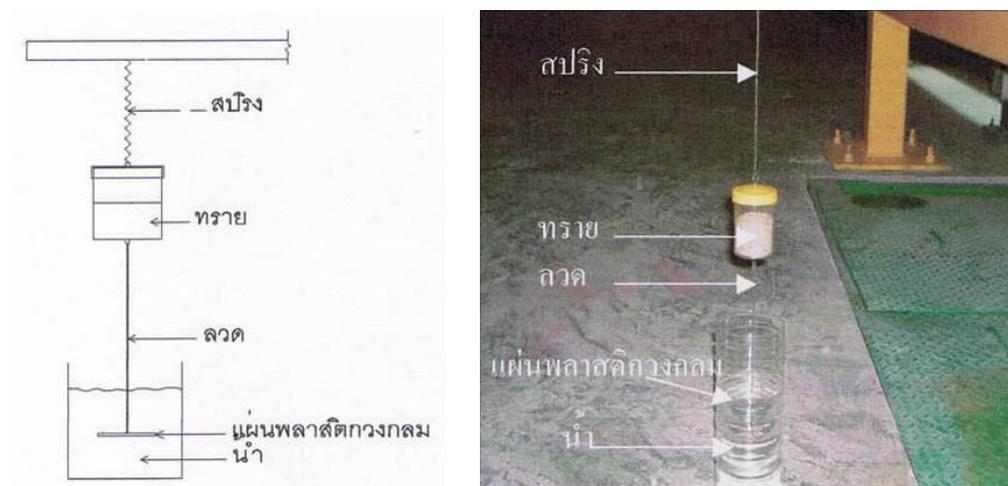
TMD แบบนี้ใช้ติดตั้งสำหรับสะพาน Akashi kaikyo มีทั้งหมด 6 ชุด คือ ควบคุมการสั่นไหวในแนวดิ่งใน 2 รูปแบบการสั่นไหวหรือ 2 mode shape คือ V1 และ V3 ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 0.4552 Hz และ 0.8563 Hz ตามลำดับ และควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดที่ 1 หรือ T1 ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 1.0366 Hz และกำหนดให้มวลของ TMD ในแต่ละชุดมีมวล 1% และ 3% ของน้ำหนักของแบบจำลองสะพาน แต่ละชุดจะติดตั้งสองด้านหัวและท้ายสะพานคู่ตำแหน่งการติดตั้ง รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง TMD เข้ากับสะพานที่ด้านหัวและด้านท้ายสะพาน

1) วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำ TMD แบบที่ 1 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo

อุปกรณ์ที่ใช้ทำ TMD เราใช้ทรายในการทำมวลของ TMD โดยบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติกทรงกระบอกปิดฝา ด้านบนของฝาดัดขอเกี่ยวเพื่อใช้ติดสปริง อีกด้านของสปริงติดเข้ากับแกนอลูมิเนียมของสะพาน ส่วนด้านล่างของกล่องพลาสติกขอเกี่ยวเช่นเดียวกันเพื่อติดกับก้านชกของตัวหน่วง(damper) ในส่วนของตัวหน่วงเราใช้น้ำเป็นของเหลวหนืดเพื่อให้แผ่นพลาสติกวงกลมติดกับลวดที่ใช้ทำเป็นก้านเคลื่อนที่ผ่านรูรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของ TMD แบบที่ 1

2) การออกแบบ TMD แบบที่ 1 ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง V1, V3 และในแนวการบิด T1 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า TMD ที่ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้งจะติดที่ตรงกลางของสะพานมีอยู่ 2 ตัวด้านหัวและด้านท้ายด้านละตัว ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวการบิดจะติด TMD ที่ด้านหัวและด้านท้ายด้านละ 2 ตัวซ้าย-ขวา และการออกแบบ TMD จะใช้ตารางที่ 3.2 ในกรณี Randomly force vibration เนื่องจากการทดสอบเป็นการทดสอบภายใต้ลมที่ทำให้เกิดแรงกระทำที่ไม่คงที่กับสะพาน

2.1) TMD ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง V1 ด้วยมวล (mass ratio; μ) 1%

2.1.1) อัตราส่วนความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสม (tuning ratio; γ_{opt}) และความถี่ธรรมชาติของ TMD (V1) , ω_t สามารถหาได้จากสมการที่ (4.10) และ (4.21) ดังนี้

$$\gamma_{opt} = \sqrt{\frac{\mu + 2}{2(\mu + 1)^2}} \quad (4.10)$$

$$\gamma = \frac{\omega_t}{\omega_s} \quad (4.11)$$

เมื่อ μ คือ mass ratio หรืออัตราส่วนมวลของ TMD ต่อมวลของแบบจำลองสะพาน ω_t คือความถี่ธรรมชาติของ TMD และ ω_s คือความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองสะพาน V1 มีค่าเท่ากับ 0.4554 Hz เราสามารถหามวลของ TMD (V1) ที่ต้องการได้จากสมการที่ (4.12)

$$\mu = \frac{m_t}{m_s} \quad (4.12)$$

เมื่อ m_t คือ มวลของ TMD (V1) และ m_s คือมวลของแบบจำลองสะพาน (21kg) กำหนดอัตราส่วนมวลของ TMD (V1) , μ เป็น 1% ของน้ำหนักของแบบจำลองสะพาน
ดังนั้น มวลของ TMD (V1);

$$\begin{aligned} m_t &= 0.01 \times 21 \\ &= 0.210 \text{ kg} \end{aligned}$$

เราใช้ TMD (V1) 2 ตัวด้านหัวและท้ายของสะพาน ดังนั้นแต่ละตัวมีมวลเท่ากับ 105g ดังนั้นจะหาอัตราส่วนความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสม, γ_{opt} ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_{opt} &= \sqrt{\frac{(0.01 + 2)}{2(0.01 + 1)^2}} \\ &= 0.9926 \end{aligned}$$

และความถี่ธรรมชาติของ TMD (V1);

$$\begin{aligned} \omega_t &= 0.9926 \times 0.4554 \\ &= 0.4520 \text{ Hz} \end{aligned}$$

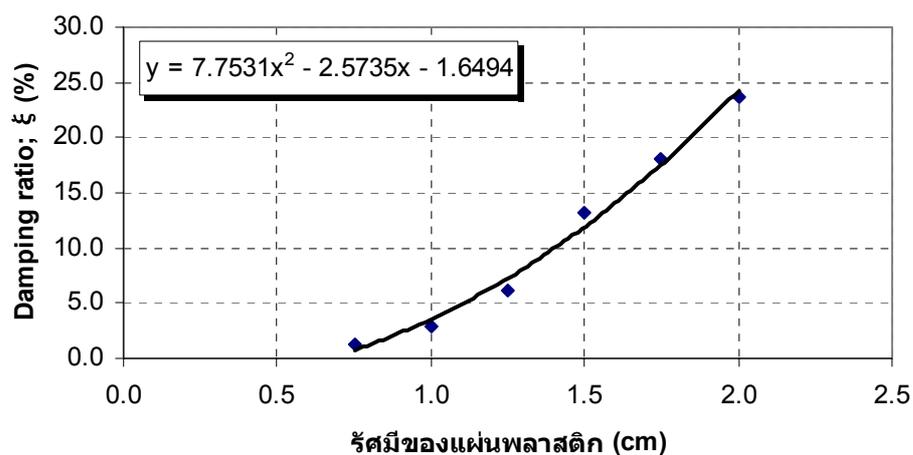
2.1.2) อัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสม (damping ratio; ξ_t) ของ TMD (V1) หาได้จากสมการที่ (4.13) ดังนี้

$$\begin{aligned} \xi_t &= \sqrt{\frac{\mu(3\mu + 4)}{8(\mu + 1)(\mu + 2)}} \quad (4.13) \\ &= \sqrt{\frac{0.01(3 \times 0.01 + 4)}{8(0.01 + 1)(0.01 + 2)}} \\ &= 0.0498 \\ &= 4.98\% \end{aligned}$$

ในการออกแบบ damper ของ TMD (V1) นั้น เราใช้งานวิจัยของ โสภาค กาญจนโสน (2543) มาเป็นแนวทางในการออกแบบ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำเป็นของเหลวใน damper และใช้แผ่นพลาสติกวงกลมขนาดต่างๆ กันติดกับก้านชัก แล้วปล่อยให้ TMD เคลื่อนที่อิสระผ่านน้ำ และหาความหน่วงออกมาเป็น Damping ratio; ξ ซึ่งในการหาความหน่วงนั้น หากจากการทำ free vibration ของ TMD แต่ละตัว แล้วเก็บผลของค่าการเคลื่อนที่ด้วย laser displacement sensor แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าความหน่วงจากโปรแกรม Matlab จากนั้นเปลี่ยนขนาดของแผ่นพลาสติกวงกลมหลายๆค่า เพื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของแผ่นพลาสติกวงกลมกับความหน่วง ซึ่งได้ผลในการทดสอบดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.5 ค่าความหน่วงของ TMD (V1), $\mu = 1\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่างๆ

| ขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) | Damping ratio; ξ (%) |
|------------------------------|--------------------------|
| 0.75 | 1.34 |
| 1.00 | 2.98 |
| 1.25 | 6.08 |
| 1.50 | 13.21 |
| 1.75 | 17.98 |
| 2.00 | 23.71 |



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V1), $\mu = 1\%$

จากรูปที่ 4.8 พบว่าจะต้องใช้แผ่นพลาสติกวงกลมรัศมีขนาด 1.10 cm เพื่อได้ค่า ξ เท่ากับ 4.98%

2.1.3) ในส่วนของความถี่ธรรมชาติของ TMD (V1) จะต้องออกแบบสปริงให้ได้ความถี่ธรรมชาติที่ต้องการ โดยใช้หลักการเดียวกันกับสปริงของแบบจำลองสะพานจากสมการที่ (4.1) จะได้

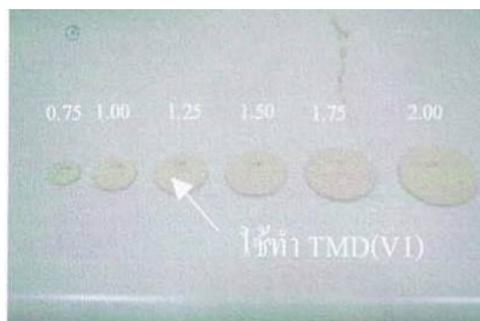
$$k_i = m_i \omega_i^2 \quad (4.14)$$

เมื่อ k_i คือค่าสตีเฟนของสปริงของ TMD (V1) m_i คือมวลของ TMD (V1) แต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 0.105 kg และ ω_i คือความถี่ธรรมชาติของ TMD (V1) มีค่าเท่ากับ 0.4520 Hz ดังนั้น

$$\begin{aligned} k_i &= 0.105 \times (2\pi \times 0.4520)^2 \\ &= 0.847 \quad N/m \\ &= 0.00086 \quad kg/cm \end{aligned}$$

กำหนดให้ขนาดลวดสปริง, d เท่ากับ 0.03 cm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวสปริง, D เท่ากับ 0.5 cm และใช้สมการที่ (4.3) และ (4.15) หาขนาดจำนวนรอบของสปริงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} n &= \frac{Gd^4}{8k_i D^3} \quad (4.15) \\ &= \frac{0.8 \times 10^6 \times 0.03^4}{8 \times 0.00086 \times 0.5^3} \\ &= 754 \end{aligned}$$



(ก) แผ่นพลาสติกขนาดต่างๆของ damper



(ข) มวลและสปริงของ TMD

รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบของ TMD ควคุม (V1), $\mu = 1\%$

2.2) TMD ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง V1 ด้วย $\mu = 3\%$ และแนวตั้ง V3 และแนวการบิด T1 ด้วย $\mu = 1\%$ และ 3%

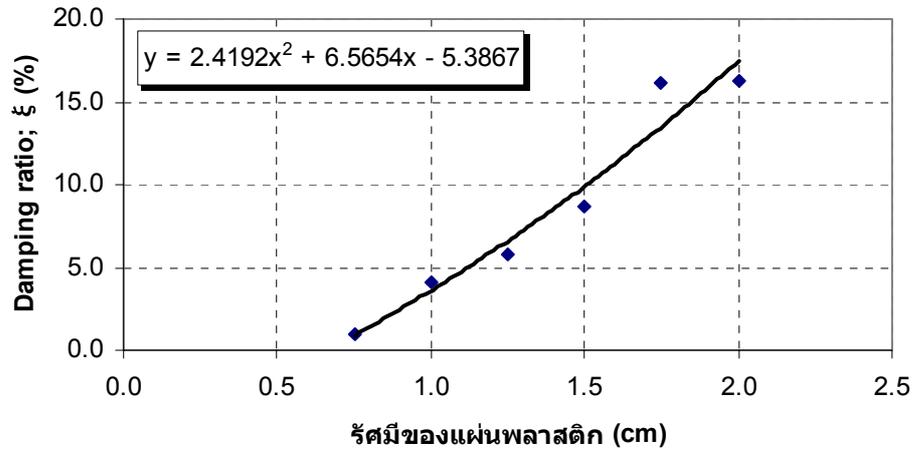
ในทำนองเดียวกัน การออกแบบ TMD ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง V1 ด้วย $\mu = 3\%$ และแนวตั้ง V3 และแนวการบิด T1 ด้วย $\mu = 1\%$ และ 3% สามารถใช้หลักการการออกแบบและวิธีการทำเช่นเดียวกับ V1 ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางการออกแบบ TMD แบบที่ 1

| TMD | Mass ratio; μ | Mass (g) /set | Tuning ratio; γ_{opt} | Natural Frequency ; ω_t (Hz) | Damping ratio; ξ_{opt} (%critical) |
|-----|----------------------|------------------|---------------------------------|---|---|
| V1 | 1% | 105 | 0.9926 | 0.4520 | 4.98 |
| V1 | 3% | 315 | 0.9781 | 0.4454 | 8.56 |
| V3 | 1% | 105 | 0.9926 | 0.8499 | 4.98 |
| V3 | 3% | 315 | 0.9781 | 0.8376 | 8.56 |
| T1 | 1% | 52.5 | 0.9926 | 1.0289 | 4.98 |
| T1 | 3% | 157.5 | 0.9781 | 1.0139 | 8.56 |

ตารางที่ 4.7 ค่าความหน่วงของ TMD (V3), $\mu = 1\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่างๆ

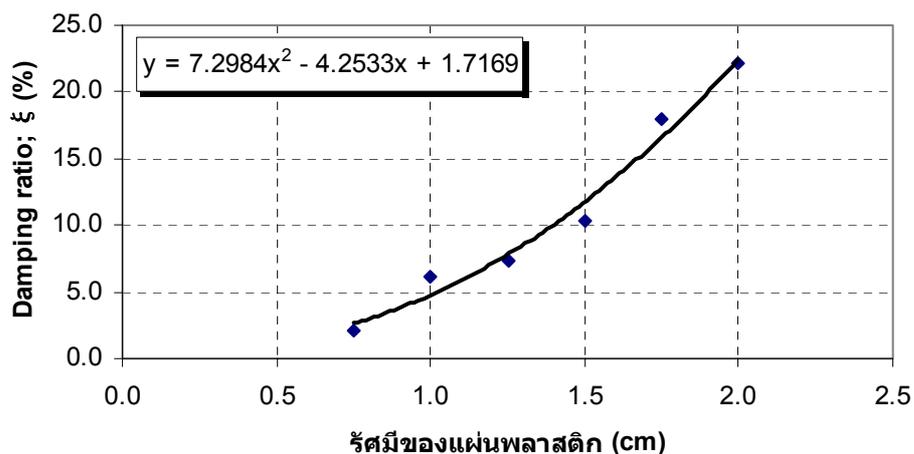
| ขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) | Damping ratio; ξ (%) |
|------------------------------|--------------------------|
| 0.75 | 0.987 |
| 1.00 | 4.043 |
| 1.25 | 5.841 |
| 1.50 | 8.626 |
| 1.75 | 16.122 |
| 2.00 | 16.313 |



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ζ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V3), $\mu = 1\%$

ตารางที่ 4.8 ค่าความหน่วงของ TMD (T1), $\mu = 1\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่างๆ

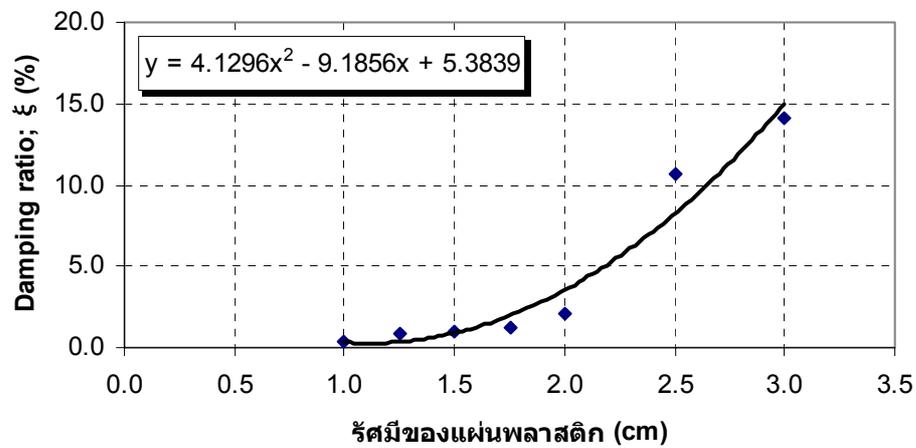
| ขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) | Damping ratio; ζ (%) |
|------------------------------|----------------------------|
| 0.75 | 0.987 |
| 1.00 | 4.043 |
| 1.25 | 5.841 |
| 1.50 | 8.626 |
| 1.75 | 16.122 |
| 2.00 | 16.313 |



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ζ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (T1), $\mu = 1\%$

ตารางที่ 4.9 ค่าความหน่วงของ TMD (V1), $\mu = 3\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่างๆ

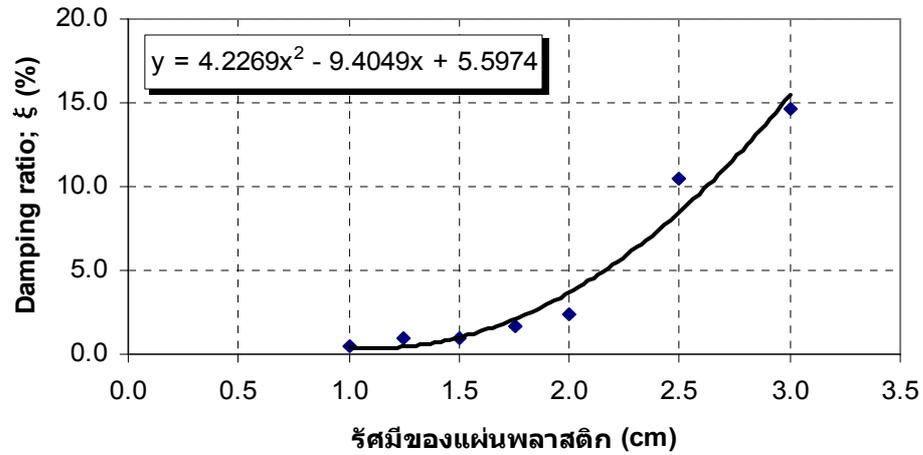
| ขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) | Damping ratio; ξ (%) |
|------------------------------|--------------------------|
| 1.00 | 0.340 |
| 1.25 | 0.837 |
| 1.50 | 0.941 |
| 1.75 | 1.286 |
| 2.00 | 2.114 |
| 2.50 | 10.632 |
| 3.00 | 14.080 |



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V1), $\mu = 3\%$

ตารางที่ 4.10 ค่าความหน่วงของ TMD (V3), $\mu = 3\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่างๆ

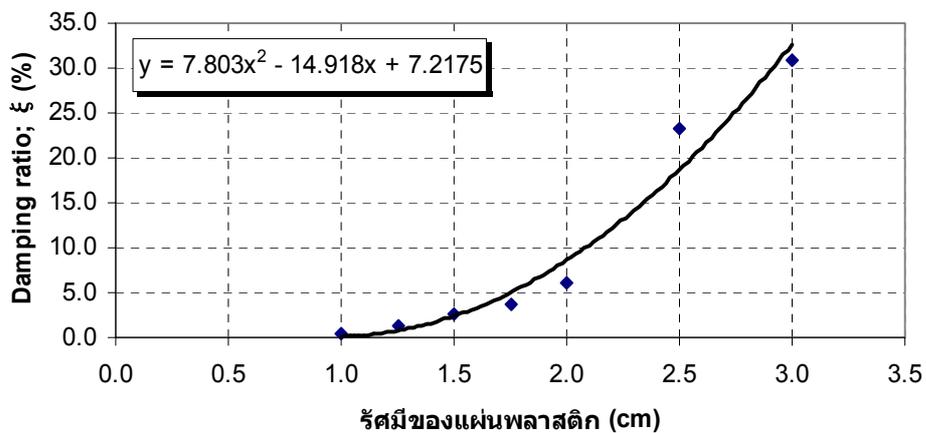
| ขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) | Damping ratio; ξ (%) |
|------------------------------|--------------------------|
| 1.00 | 0.418 |
| 1.25 | 0.941 |
| 1.50 | 0.973 |
| 1.75 | 1.665 |
| 2.00 | 2.408 |
| 2.50 | 10.482 |
| 3.00 | 14.687 |



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (V3), $\mu = 3\%$

ตารางที่ 4.11 ค่าความหน่วงของ TMD (T1), $\mu = 3\%$ ที่หน้าตัดของแผ่นพลาสติกขนาดต่างๆ

| ขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) | Damping ratio; ξ (%) |
|------------------------------|--------------------------|
| 1.00 | 0.493 |
| 1.25 | 1.201 |
| 1.50 | 2.677 |
| 1.75 | 3.660 |
| 2.00 | 6.015 |
| 2.50 | 23.277 |
| 3.00 | 30.920 |



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Damping ratio; ξ กับขนาดรัศมีของแผ่นพลาสติก (cm) ของ TMD (T1), $\mu = 3\%$

จากวิธีในการหาขนาดของแผ่นพลาสติกสำหรับ damper และการหาขนาดของสปริง เพื่อให้ความถี่ธรรมชาติของ TMD ที่ต้องการดังแสดงไว้ในข้อที่ 2.1.1) – 2.1.3) สามารถสรุปขนาดของแผ่นพลาสติก damper และขนาดของสปริงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ขนาดของ damper plate และสปริงของ TMD แบบที่ 1

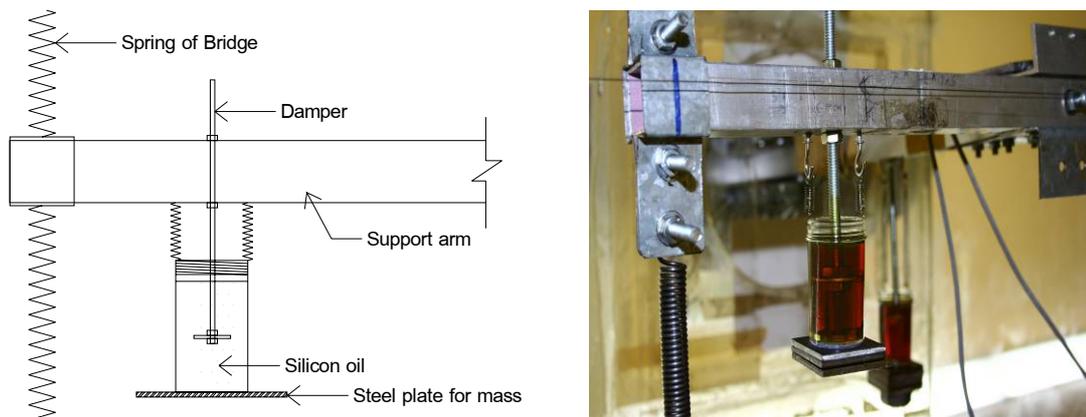
| TMD | Mass ratio; μ | Spring d, D, L (cm) | Radius of damper plate (cm) | Natural Frequency ; ω_t (Hz) (Target) | Natural Frequency ; ω_t (Hz) (Measured) | Damping ratio; ξ_{opt} (%critical) (Target) | Damping ratio; ξ_{opt} (%critical) (Measured) |
|-----|----------------------|---------------------------|---|---|---|--|--|
| V1 | 1% | 0.03, 0.5, 22.5 | 1.11 | 0.4520 | 0.4536 | 4.98 | 4.78 |
| V1 | 3% | 0.03, 0.5, 7.7 | 2.18 | 0.4454 | 0.4467 | 8.56 | 8.49 |
| V3 | 1% | 0.03, 0.5, 6.4 | 1.12 | 0.8499 | 0.8534 | 4.98 | 4.87 |
| V3 | 3% | 0.03, 0.5, 2.2 | 2.16 | 0.8376 | 0.8434 | 8.56 | 8.36 |
| T1 | 1% | 0.03, 0.5, 8.7 | 1.02 | 1.0289 | 1.0537 | 4.98 | 4.79 |
| T1 | 3% | 0.03, 0.5, 3.0 | 1.75 | 1.0139 | 1.0356 | 8.56 | 8.71 |

4.1.5.2 TMD แบบที่มีมวลและตัวหน่วงยึดติดกับตัวสะพาน (แบบที่ 2) สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

TMD แบบนี้ใช้ติดตั้งสำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม มีทั้งหมด 10 ชุด คือ ควบคุมการสั่นไหวในแนวตั้ง V1 และแนวราบ T1 ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 2.1490 Hz และ 4.8175 Hz ตามลำดับ และกำหนดให้มวลของ TMD ในแต่ละโหมดความถี่มีมวล 1%, 2% และ 4% ของน้ำหนักของแบบจำลองสะพาน นอกจากนี้ที่ มวล 1% ยังเปลี่ยนค่าความหน่วง 3 ค่า คือ $< \xi_{opt}$, ξ_{opt} และ $> \xi_{opt}$ แต่ละชุดจะติดทั้งสองด้านหัวและท้ายสะพาน เช่นเดียวกับสะพาน Akashi kaikyō

1) วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำ TMD แบบที่ 2 สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

อุปกรณ์ที่ใช้ทำ TMD เราใช้แผ่นเหล็กและน็อตเป็นมวลของ TMD โดยบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติกทรงกระบอกเปิดฝา ด้านขอบของกล่องเจาะรูสำหรับติดสปริง อีกด้านของสปริงติดเข้ากับแกนอลูมิเนียมของสะพาน ส่วนก้านชกของตัวหน่วง (damper) ติดอยู่กับแกนอลูมิเนียมของสะพาน ในส่วนของตัวหน่วงเราใช้น้ำมันพืช และ น้ำมัน silicone oil เป็นของเหลวหนืดเพื่อให้แผ่นเหล็กวงกลมติดกับแท่งเหล็กที่ใช้ทำเป็นก้านเคลื่อนที่ผ่านรูรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ส่วนประกอบของ TMD แบบที่ 2

2) การออกแบบ TMD แบบที่ 2 ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง V1 และในแนว
การบิด T1 สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

การออกแบบ TMD แบบนี้ใช้วิธีการคำนวณเหมือนกับ TMD แบบที่ 1 แตกต่าง
กันที่วัสดุที่ใช้ทำมวล และตัวหน่วง ส่วนในการหาขนาดของแหวนเหล็กสำหรับ damper
นั้น ใช้วิธีเปลี่ยนขนาดแล้ววัดค่าหาความหน่วงโดยโปรแกรม Matlab จนได้ค่า
ความหน่วงที่ต้องการ ส่วนการติดตั้ง TMD ก็เช่นเดียวกับ TMD แบบที่ 1 คือ TMD ที่
ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้งจะติดตั้งที่ตรงกลางของสะพานมืออยู่ 2 ตัวด้านหัวและด้านท้าย
ด้านละตัว ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวการบิดจะติดตั้ง TMD ที่ด้านหัวและด้านท้าย
ด้านละ 2 ตัว ซ้าย-ขวา

ตารางที่ 4.13 ตารางการออกแบบ TMD แบบที่ 2

| TMD | Mass ratio; μ | Mass (g) /set | Tuning ratio; γ_{opt} | Natural Frequency ; ω_t (Hz) | Damping ratio; ξ_{opt} (%critical) |
|-----|----------------------|------------------|---------------------------------|---|---|
| V1 | 1% | 64.2 | 0.993 | 2.1330 | (< ξ_{opt}) |
| V1 | 1% | 64.2 | 0.993 | 2.1330 | 4.98 |
| V1 | 1% | 64.2 | 0.993 | 2.1330 | (> ξ_{opt}) |
| V1 | 2% | 128.4 | 0.985 | 2.1174 | 7.02 |
| V1 | 4% | 256.8 | 0.971 | 2.0869 | 9.85 |
| T1 | 1% | 32.1 | 0.993 | 4.7817 | (< ξ_{opt}) |
| T1 | 1% | 32.1 | 0.993 | 4.7817 | 4.98 |
| T1 | 1% | 32.1 | 0.993 | 4.7817 | (> ξ_{opt}) |
| T1 | 2% | 64.2 | 0.985 | 4.7466 | 7.02 |
| T1 | 4% | 128.4 | 0.971 | 4.6783 | 9.85 |

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงขนาดของ damper plate และสปริงของ TMD แบบที่ 2

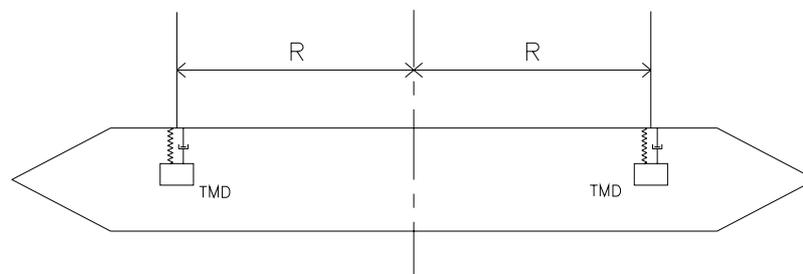
| TMD | Mass ratio; μ | Spring d, D, L (cm) | Radius of damper plate (cm) | Natural Frequency ; ω_t (Hz) (Target) | Natural Frequency ; ω_t (Hz) (Measured) | Damping ratio; ξ_{opt} (%critical) (Target) | Damping ratio; ξ_{opt} (%critical) (Measured) |
|-----|-------------------|---------------------|-----------------------------|--|--|---|---|
| V1 | 1% | 0.03, 0.5, 1.5 | 0.725 | 2.1330 | 2.1220 | (< ξ_{opt}) | 2.63 |
| V1 | 1% | 0.03, 0.5, 1.5 | 0.85 | 2.1330 | 2.0816 | 4.98 | 5.09 |
| V1 | 1% | 0.03, 0.5, 1.5 | 0.95 | 2.1330 | 2.0290 | (> ξ_{opt}) | 8.47 |
| V1 | 2% | 0.03, 0.5, 1.7 | 0.725 | 2.1174 | 2.1022 | 7.02 | 7.16 |
| V1 | 4% | 0.035, 0.5, 2.5 | 0.85 | 2.0869 | 2.1241 | 9.85 | 9.84 |
| T1 | 1% | 0.03, 0.5, 0.5 | 0.725 | 4.7817 | 4.7650 | (< ξ_{opt}) | 2.75 |
| T1 | 1% | 0.03, 0.5, 0.5 | 0.85 | 4.7817 | 4.7812 | 4.98 | 4.94 |
| T1 | 1% | 0.03, 0.5, 0.5 | 0.95 | 4.7817 | 4.6550 | (> ξ_{opt}) | 8.66 |
| T1 | 2% | 0.03, 0.5, 0.75 | 0.725 | 4.7466 | 4.7087 | 7.02 | 6.92 |
| T1 | 4% | 0.03, 0.5, 0.35 | 0.85 | 4.6783 | 4.6916 | 9.85 | 9.28 |

4.1.5.3 ระยะที่ติดตั้ง TMD สำหรับแนวการบิด T1

การติดตั้ง TMD สำหรับแนวการบิดอาศัยหลักการ การติดตั้งที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของมวลสะพานแต่ละด้านทั้งซ้ายและขวาหรือมวลโมเมนต์ของความเฉื่อย (Mass moment of inertia) ดังสมการที่ (4.16)

$$I = m_s R^2 \quad (4.16)$$

เมื่อ I คือ มวลโมเมนต์ของความเฉื่อย, m_s คือ 0.5 เท่าของมวลของสะพาน และ R คือ ระยะของจุดศูนย์กลางถ่วงของมวลสะพานแต่ละด้าน ดังนั้นสามารถสรุประยะที่ติดตั้ง TMD (T1) ของสะพาน Akashi kaikyō และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมได้ตารางที่ 4.15



รูปที่ 4.16 ระยะการติดตั้ง TMD (T1)

ตารางที่ 4.15 ระยะการติดตั้ง TMD (T1)

| TMD | I (kg.m ² /m) | m_s (kg/m) | R (m) |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------|------------|
| สะพาน Akashi kaikyo T1 | 0.855 | 5.915 | 0.380 |
| สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม T1 | 0.077 | 2.545 | 0.174 |

4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดค่า ของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo ในอุโมงค์ลม

การทดสอบแบบจำลองสะพานในอุโมงค์ลมนั้นมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบใช้ในการทดสอบหลายๆ ตัว ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าเคลื่อนที่ (Laser displacement sensor) คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์วัดค่าการเคลื่อนที่กับคอมพิวเตอร์ (Terminal block, BNC-2090) อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล (Data Acquisition Card, DAQ card) อุปกรณ์ในการวัดความเร่ง (Accelerometer) และอุปกรณ์จับยึดสปริงกับแกนอลูมิเนียมที่สามารถเลื่อนเข้าออกได้ทำให้ง่ายต่อการปรับระยะระหว่างสปริง นอกจากอุปกรณ์หลักเหล่านี้แล้วยังมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Labview ที่ใช้แสดงผลการเคลื่อนที่ของแบบจำลองสะพาน อุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 อุปกรณ์ในการวัดค่าเคลื่อนที่ (Laser displacement sensor)

Laser displacement sensor ที่ใช้ยี่ห้อ KEYENCE มี sensor head รุ่น LB-300 มีตัวควบคุมรุ่น LB-1000 มีระยะการวัด ± 100 mm. ค่าที่ได้จะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า โดยที่ 1 Volt เท่ากับการเคลื่อนที่ 20.7 mm. สำหรับ sensor no.072 และ 18.5 mm. สำหรับ sensor no.084 ในการทดสอบจะใช้ 2 ตัวโดยหาค่าการเคลื่อนที่ของแกนอลูมิเนียมสองจุดห่างจากศูนย์กลางของแบบจำลองสะพานข้างละ 60 cm. สำหรับสะพาน Akashi kaikyo และ 19 cm สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม การวัดค่าการเคลื่อนที่จะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ วัดค่าการเคลื่อนที่แนวตั้งและวัดค่ามุมในการบิดของแบบจำลองสะพาน การวัดค่าเคลื่อนที่ในแนวตั้งจะหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าการเคลื่อนที่ของ Laser displacement sensor ทั้ง 2 ตัว ส่วนค่ามุมในการ

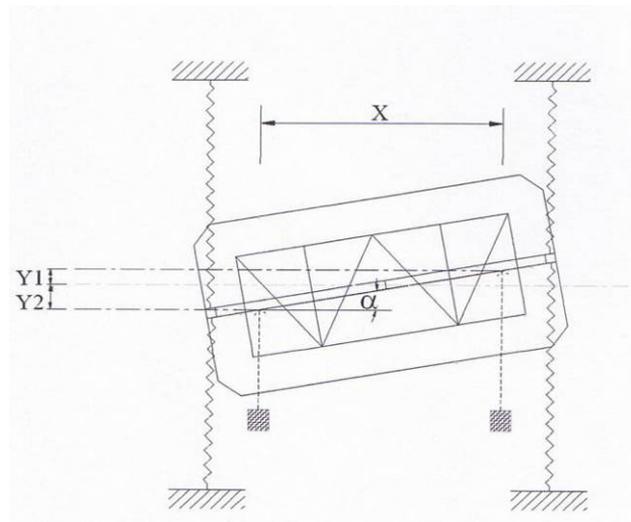
บิดหาได้จาก \arctan ของค่าการเคลื่อนที่รวมของ Laser displacement sensor ทั้ง 2 ตัว หารด้วยระยะห่างของ Laser displacement sensor ทั้ง 2 ตัวนั้น จากรูปที่ 4.17

- 1) การวัดค่าเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแบบจำลองสะพาน, y

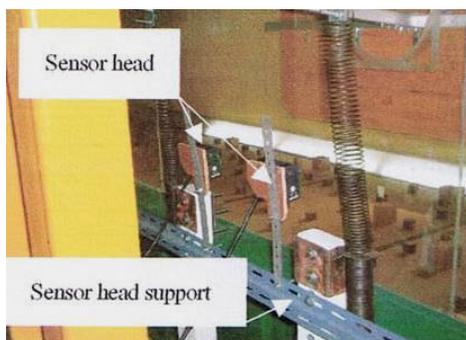
$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (4.17)$$

- 2) การวัดค่าในการบิดของแบบจำลองสะพาน, α

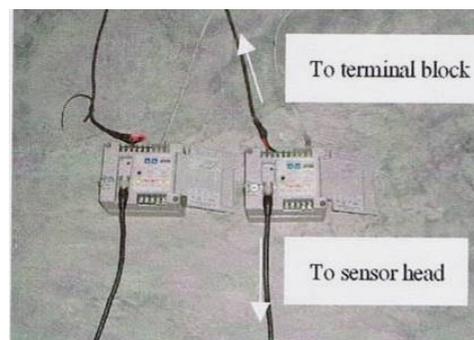
$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y_1 + y_2}{x}\right) \quad (4.18)$$



รูปที่ 4.17 การหาค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและมุมในการบิดของสะพาน

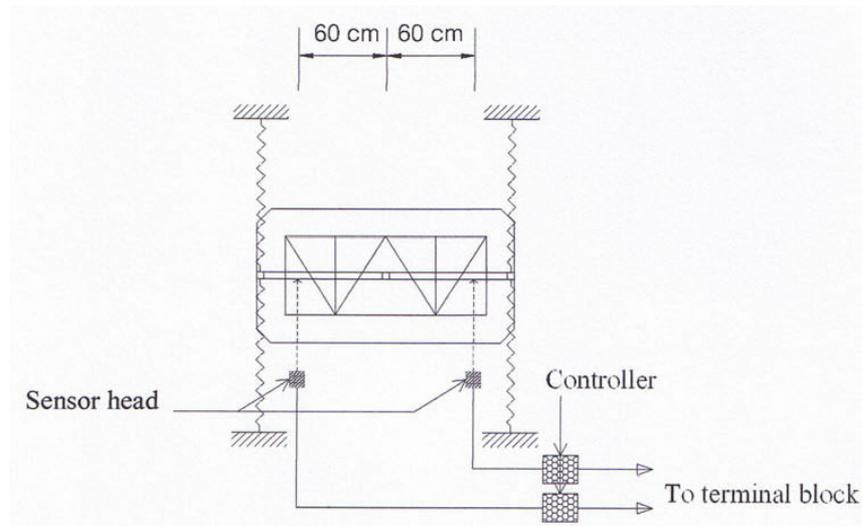


(ก) Sensor head รุ่น LB-300



(ข) ตัวควบคุมรุ่น LB-1000

รูปที่ 4.18 Laser displacement sensor



รูปที่ 4.19 แผนผังการติดตั้ง Laser displacement sensor

4.2.2 อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์วัดค่าการเคลื่อนที่กับคอมพิวเตอร์ (Terminal block)

Terminal block ที่ใช้ ของ National Instrument รุ่น BNC-2090 มีช่องสัญญาณ 9 ช่อง ตั้งแต่ CH0-CH8 ในการทดสอบใช้เพียง 2 สัญญาณคือ CH0 และ CH1 สำหรับรับสัญญาณจาก Laser displacement sensor ทั้ง 2 ตัว จาก Terminal block จะต่อเข้า DAQ card ที่ติดอยู่กับคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 4.20 Terminal block

4.2.3 อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล(Data Acquisition Card,DAQ card)

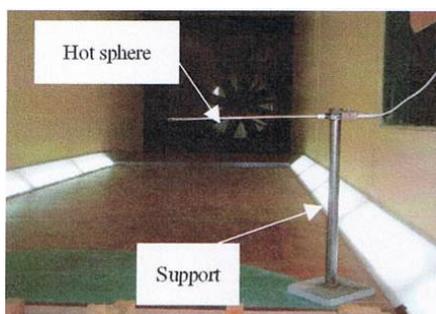
DAQ card ที่ใช้ของ National Instrument รุ่น PCI-6034E มีหน้าที่ในการรับสัญญาณไฟฟ้าจาก Terminal block แล้วแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลทำงานร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Labview ในการแสดงผล



รูปที่ 4.21 DAQ card

4.2.4 อุปกรณ์ในการวัดความเร็วลม (Accelerometer)

ในการวัดความเร็วลมในอุโมงค์ลมนั้น ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Accelerometer ยี่ห้อ Flow Master ค่าความเร็วลมที่วัดได้จะเป็นความเร็วลมเฉลี่ยในหน่วย m/s ในการวัดความเร็วลมจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า Hot sphere ติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์จับยึดไม่ให้เคลื่อนที่ บริเวณที่ติดตั้งแบบจำลองสะพานทำหน้าที่วัดค่าความเร็วลมแล้วแสดงผลความเร็วลมที่จอมอนิเตอร์ของเครื่อง Accelerometer



(ก) Hot sphere

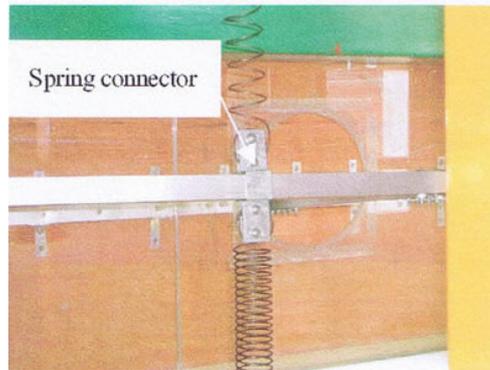


(ข) Accelerometer

รูปที่ 4.22 Accelerometer

4.2.5 อุปกรณ์จับยึดสปริงกับกับแกนอลูมิเนียม (Spring connector)

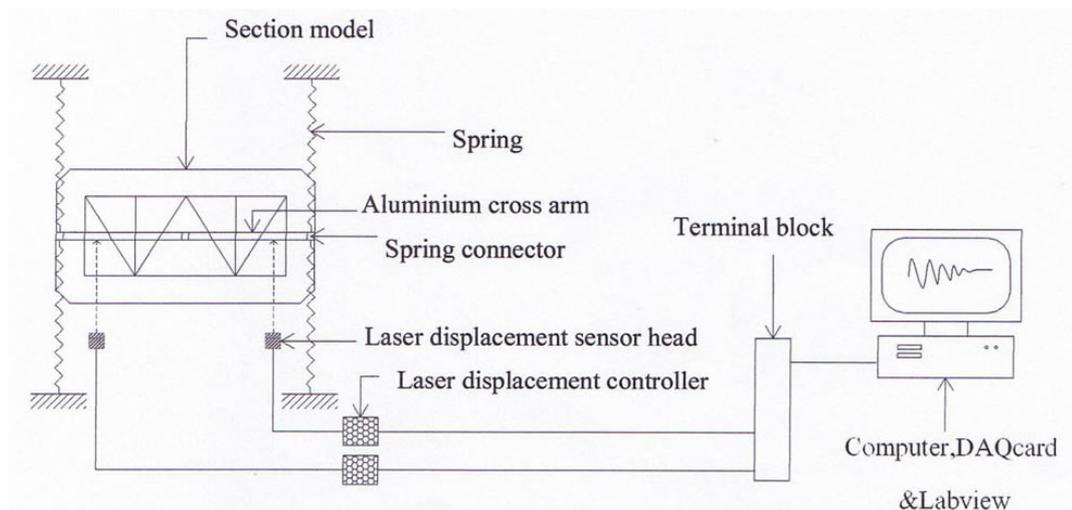
อุปกรณ์นี้ทำหน้าที่ยึดแกนอลูมิเนียมที่ต่อออกมาจากสะพานเข้ากับสปริง ออกแบบให้เลื่อนเข้าออกได้ทำให้สามารถปรับระยะห่างระหว่างสปริงได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.22 Spring connector

4.2.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Labview

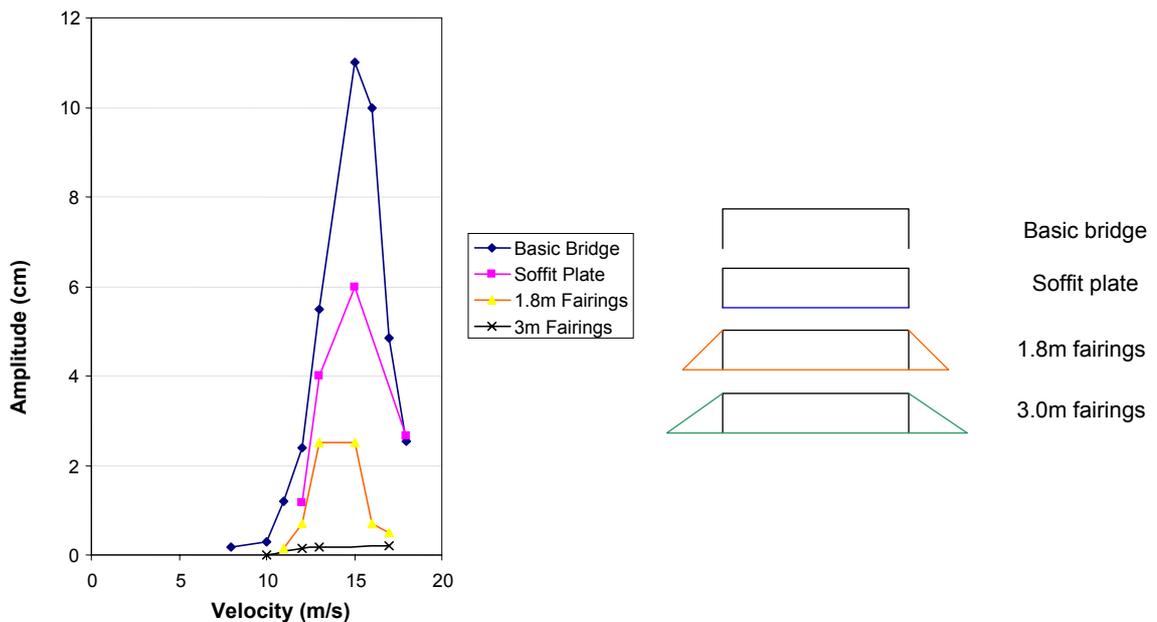
ทำงานร่วมกับ DAQ card แสดงผลสัญญาณดิจิทัลเป็นค่าการเคลื่อนที่ตามระยะเวลา ในการทดสอบนั้นสัญญาณดิจิทัลจะถูกบันทึกในอัตรา 250 ค่า/วินาที และสามารถบันทึกไฟล์เป็นแบบเท็กซ์ไฟล์ ซึ่งจะสามารถใช้โปรแกรม Matlab หรือ Microsoft Excel ในการจัดทำเป็นกราฟการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาต่อไปได้



รูปที่ 4.23 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบวัดค่า

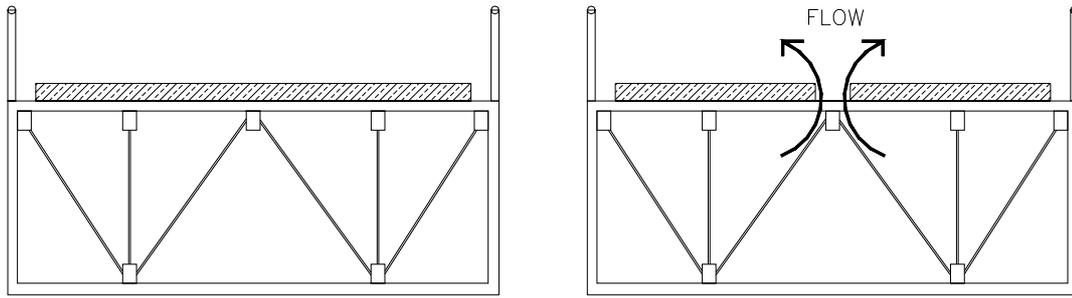
4.3 การปรับปรุงหน้าตัดของสะพาน Akashi kaikyo ทางด้านอากาศพลศาสตร์

การปรับปรุงหน้าตัดสะพานมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สะพานตอบสนองทางด้านอากาศพลศาสตร์ดีขึ้น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่ม Fairing ที่ด้านข้างสะพาน เช่น สะพาน Long's Creek Bridge ที่ได้มีการศึกษาในด้านการปรับแต่งหน้าตัดเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับสะพานโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยทำการเพิ่ม Fairings หลายแบบ และเพิ่มแผ่นรองให้ลมไหลผ่านด้านล่างของสะพานได้สะดวก อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบหน้าตัดที่ปรับแต่งแต่ละแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.24 หรือ การเพิ่มช่องเปิดที่กลางสะพานเพื่อให้ลมไหลผ่านได้ดีขึ้นของสะพาน Akashi kaikyo



รูปที่ 4.24 กราฟการตอบสนองของสะพาน Long's Creek Bridge ภายใต้การปรับแต่งหน้าตัด สะพานแบบต่างๆ [Simiu and Scanlan, 1996]

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะการเพิ่มช่องเปิด ขนาดความกว้าง 10 cm กลางสะพานของสะพาน Akashi kaikyo เท่านั้น ดูรูปที่ 4.25



(ก) ไม่มีช่องเปิดกลางสะพาน
(ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน)

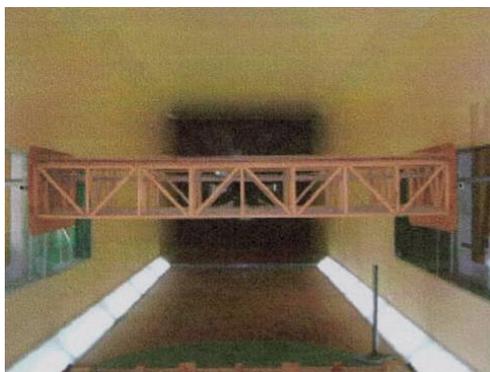
(ข) มีช่องเปิดกลางสะพาน
(หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน)

รูปที่ 4.25 สะพาน Akashi kaikyo มีและไม่มีช่องเปิดกลางสะพาน

4.4 การทดสอบแบบจำลองสะพานในอุโมงค์ลม

4.4.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้ใช้อุโมงค์ลมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (TU-AIT) โดยมีขนาดหน้าตัด กว้าง 2.5 m. สูง 2.5 m. และมีความยาวในการทดสอบ 25 m. สามารถทดสอบได้ที่ความเร็วสูงสุด 20 m/s การทดสอบแบบจำลองสะพานจะติดตั้งแบบจำลองสะพานภายในอุโมงค์ลมโดยใช้สปริงยึดแกนอลูมิเนียมทั้ง 4 คู่แล้วเปิดพัดลมให้พัดเข้าปะทะสะพาน แล้ววัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งโดยเครื่อง Laser displacement sensor 2 ตัว ในส่วนของการลดการสั่นไหวของสะพานโดยการติดตั้ง TMD นั้นจะติดตั้งที่แกนอลูมิเนียมของสะพานที่อยู่ภายในอุโมงค์ลม จึงไม่มีผลกระทบของลมกับ TMD



(ก) สะพาน Akashi kaikyo



(ข) สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

รูปที่ 4.26 สะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมติดตั้งในอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.27 อุโมงค์ลม

4.4.2 รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบจะดำเนินการ โดยการเริ่มจากการหาความถี่ธรรมชาติทั้งในแนวตั้ง V1 และ V3 โดยการรั้งสะพานไว้ในแนวตั้งที่ระยะหนึ่ง แล้วปล่อยให้สะพานเคลื่อนที่อิสระตามแนวตั้ง (ความเร็วลม, $V=0\text{m/s}$) แล้วบันทึกค่าการเคลื่อนที่ และหาความถี่ธรรมชาติในแนวการบิด T1 โดยการรั้งสะพานแบบบิดแล้วปล่อยให้สะพานเคลื่อนที่อิสระตามแนวการบิดแล้วบันทึกค่าการเคลื่อนที่ จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มความเร็วลมทีละ 10 rpm พร้อมบันทึกค่าการเคลื่อนที่ จนสะพานเริ่มสั่นไหวแล้วค่อยๆ เพิ่มความเร็วลมเป็นทีละ 5 rpm และบันทึกค่าการเคลื่อนที่ หากต้องการความละเอียดกว่านี้อาจเปลี่ยนช่วงความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่านี้ได้ตามความเหมาะสม จนกระทั่งสะพานเกิดการเสถียรภาพ (Flutter instability)

การทดสอบเป็นการหาการตอบสนองภายใต้ความเร็วลมต่างๆ ซึ่งแบ่งเป็นรายละเอียดได้ดังนี้

สะพาน Akashi kaikyo

- 1) แบบจำลองสะพานที่ยังไม่ปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติด TMD ที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V1 และในแนวการบิด T1
- 2) แบบจำลองสะพานที่ไม่ติด TMD ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 3 รูปแบบย่อย คือ
 - 2.1) ติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V1 และในแนวการบิด T1
 - 2.2) ติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V3 และในแนวการบิด T1
 - 2.3) ติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V4 และในแนวการบิด T2
- 3) ติด TMD มวล 1% และ 3% ที่แบบจำลองสะพาน ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 5 รูปแบบคือ

- 3.1) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
- 3.2) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 3.3) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V3 อย่างเดียว
- 3.4) ติด TMD มวล 3% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
- 3.5) ติด TMD มวล 3% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V3 และในแนวการบิด T1
- 4) แปรผันมุมปะทะของลม ที่ $\alpha = -3^\circ, \pm 0^\circ$ และ $+3^\circ$ เมื่อติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V3 และในแนวการบิด T1

สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

- 1) แบบจำลองสะพานที่ไม่ติด TMD ที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 2) ติด TMD มวล 1%, 2% และ 4% ที่แบบจำลองสะพาน ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 9 รูปแบบ คือ
 - 2.1) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 อย่างเดียว
 - 2.2) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
 - 2.3) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
 - 2.4) ติด TMD มวล 2 % ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 อย่างเดียว
 - 2.5) ติด TMD มวล 2% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
 - 2.6) ติด TMD มวล 2% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
 - 2.7) ติด TMD มวล 4% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 อย่างเดียว
 - 2.8) ติด TMD มวล 4% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวการบิด T1 อย่างเดียว
 - 2.9) ติด TMD มวล 4% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 3) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1 ที่แบบจำลองสะพานโดยแปรผันค่าความหน่วงเพิ่มอีก 2 ค่า คือ ความหน่วงน้อยกว่าและมากกว่ามวลหน่วงที่เหมาะสม

4.4.3 การบันทึกข้อมูล

การทดสอบในแต่ละกรณี แต่ละความเร็วลมที่ทดสอบจะกระทำ 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะเก็บข้อมูล ในอัตรา 250 ค่า/วินาที เป็นเวลา 1.5 นาที แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

4.4.4 การหาค่าการเคลื่อนที่ของแบบจำลองสะพาน

จากที่กล่าวไว้ว่าค่าที่วัดได้จาก Laser displacement sensor นั้นจะเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า 1 Volt เท่ากับการเคลื่อนที่ 20.7 mm. สำหรับ sensor no.072 และ 18.5 mm. สำหรับ sensor no.084 ดังนั้นถ้าต้องการค่าเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแบบจำลองสะพานก็นำค่าที่วัดได้คูณด้วยค่าดังกล่าว ก็จะได้ค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแบบจำลองสะพาน ส่วนค่ามุมในการบิดก็เช่นเดียวกันก็นำผลรวมของค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งทั้งสองคูณด้วย 20.7 mm และ 18.5 mm แล้วหารด้วยระยะห่างระหว่าง sensor head 1 ดังแสดงในสมการที่ 4.17 และ 4.18 ในเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบวัดค่า

4.4.5 การหาความถี่ในการสั่นไหวและความหน่วงของแบบจำลองสะพาน

ในผลการทดสอบได้ใช้โปรแกรม laser_ring_cov.m (ดังแสดงในภาคผนวก ง) ที่เขียนจากโปรแกรม Matlab มาช่วยในการหาความถี่ในการสั่นและค่าความหน่วงของแบบจำลองสะพาน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากนำผลการทดสอบทั้งหมดมาหา มิได้นำเฉพาะบางค่ามาหาเหมือนกับวิธีคำนวณข้างต้นและใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าด้วย

บทที่ 5

ผลการวิจัย

การทดสอบเป็นการหาการตอบสนองภายใต้ความเร็วลมต่างๆ ซึ่งแบ่งเป็นรายละเอียดได้ดังนี้

สะพาน Akashi kaikyo

- 1) แบบจำลองสะพานที่ยังไม่ปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติด TMD ที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 2) แบบจำลองสะพานที่ไม่ติด TMD ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 3 รูปแบบย่อย คือ
 - 2.1) ติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
 - 2.2) ติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V3 และในแนวการบิด T1
 - 2.3) ติดตั้งสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V4 และในแนวการบิด T2
- 3) ติด TMD มวล 1% และ 3% ที่แบบจำลองสะพาน ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 5 รูปแบบ คือ
 - 3.1) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
 - 3.2) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
 - 3.3) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V3 อย่างเดียว
 - 3.4) ติด TMD มวล 3% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
 - 3.5) ติด TMD มวล 3% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V3 และในแนวการบิด T1

สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

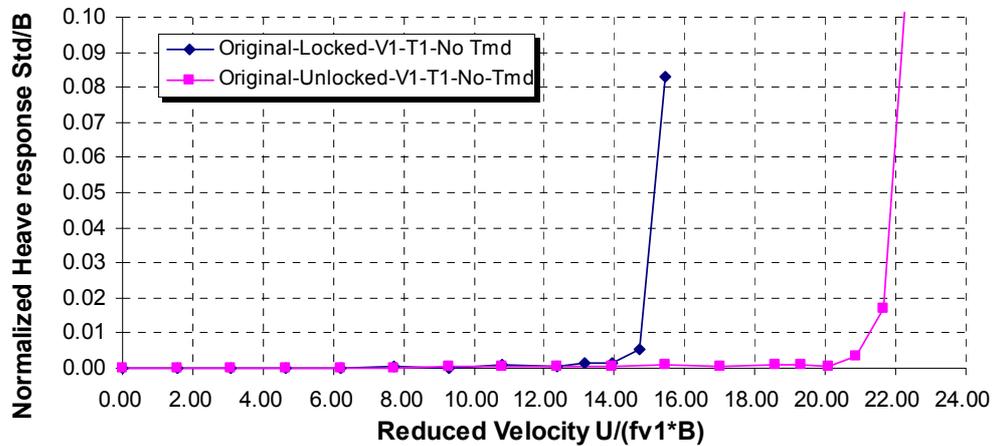
- 1) แบบจำลองสะพานที่ไม่ติด TMD ที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 2) ติด TMD มวล 1%, 2% และ 4% ที่แบบจำลองสะพาน ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 9 รูปแบบ คือ
 - 2.1) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 อย่างเดียว
 - 2.2) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว

- 2.3) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 2.4) ติด TMD มวล 2 % ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 อย่างเดียว
- 2.5) ติด TMD มวล 2% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง T1 อย่างเดียว
- 2.6) ติด TMD มวล 2% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 2.7) ติด TMD มวล 4% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 อย่างเดียว
- 2.8) ติด TMD มวล 4% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวการบิด T1 อย่างเดียว
- 2.9) ติด TMD มวล 4% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1
- 3) ติด TMD มวล 1% ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง V1 และในแนวการบิด T1 ที่แบบจำลองสะพานโดยแปรผันค่าความหน่วงเพิ่มอีก 2 ค่า คือ ความหน่วงน้อยกว่าและมากกว่ามวลหน่วงที่เหมาะสม

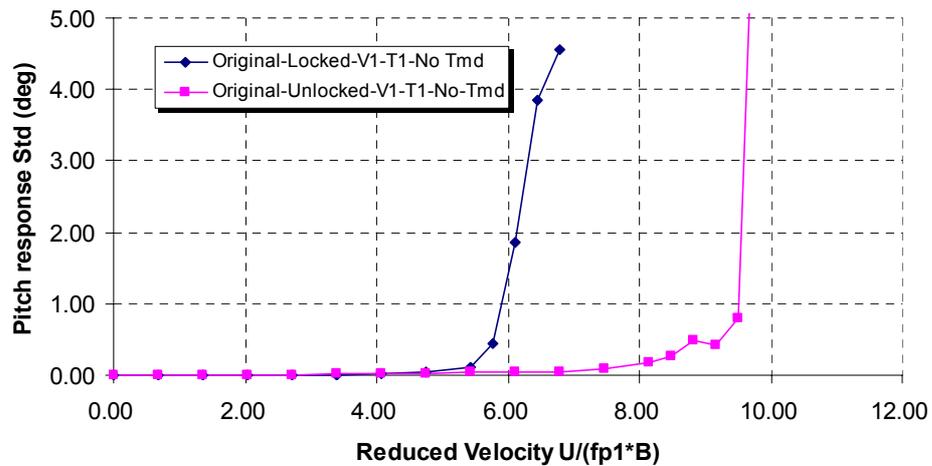
ผลการทดสอบจะแสดงการเปรียบเทียบผลของติดตั้ง TMD ที่มีมวลต่างกันเปรียบเทียบกรณีที่ไม่ติดตั้ง TMD และผลของการปรับปรุงหน้าตัดโดยการเปิดช่องตรงกลางสะพานของสะพาน Akashi kaikyo ซึ่งจะแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลดรูป (Reduced velocity; $U/f*B$) กับ ระยะการเคลื่อนที่แนวดิ่งลดรูป (Normalized Heave) และการบิด (Pitch) นอกจากนี้ยังแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเร็วลดรูป (Reduced velocity; $U/f*B$) กับความหน่วง ในกรณีของสะพานที่ไม่ติดตั้ง TMD และหลังที่ติดตั้ง TMD

5.1 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและมุมการบิดของแบบจำลองสะพาน Akashi kaikyo

5.1.1 ติดตั้งสะพานที่ความถี่ V1-T1

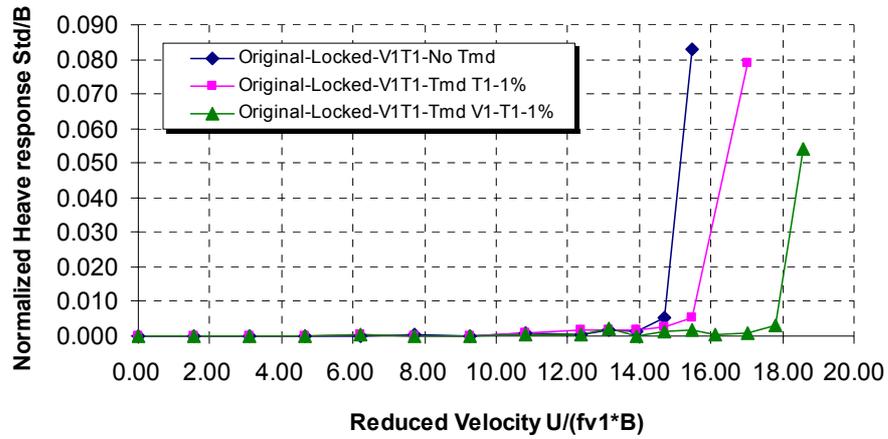


(ก) การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

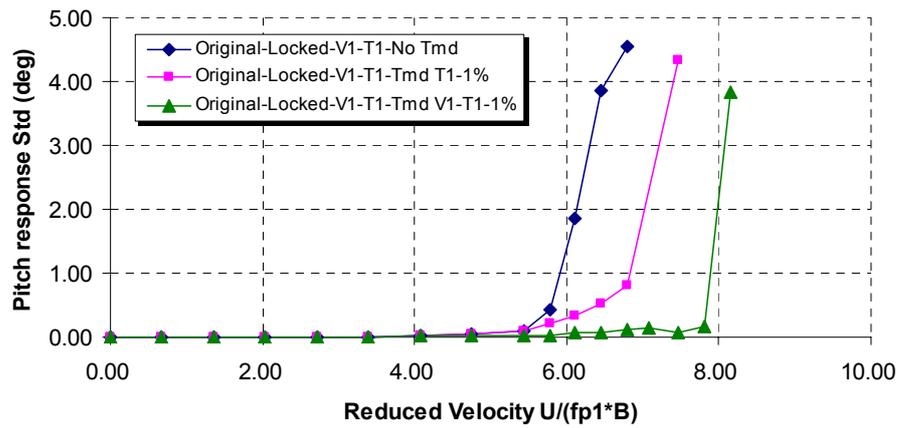


(ข) การบิด

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีการยึดกับไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติดตั้ง TMD

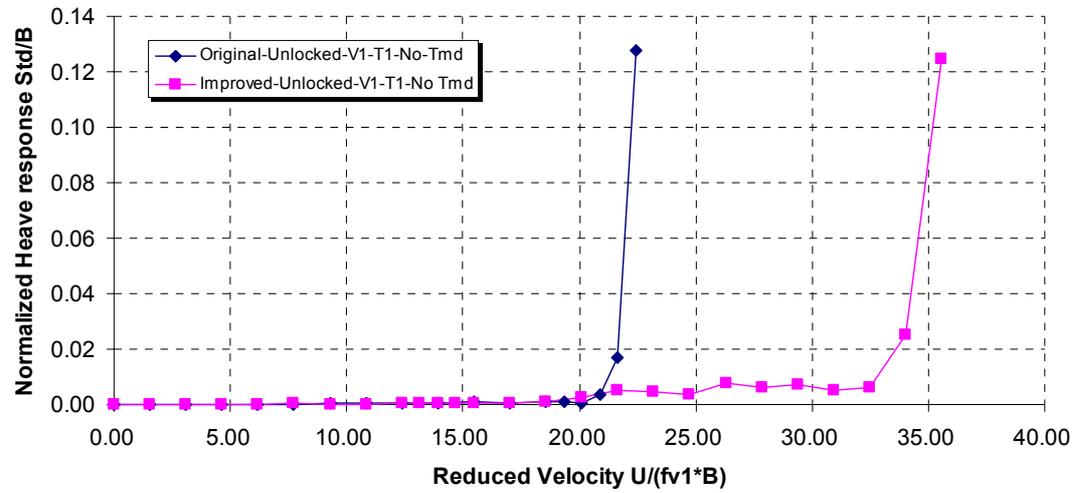


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

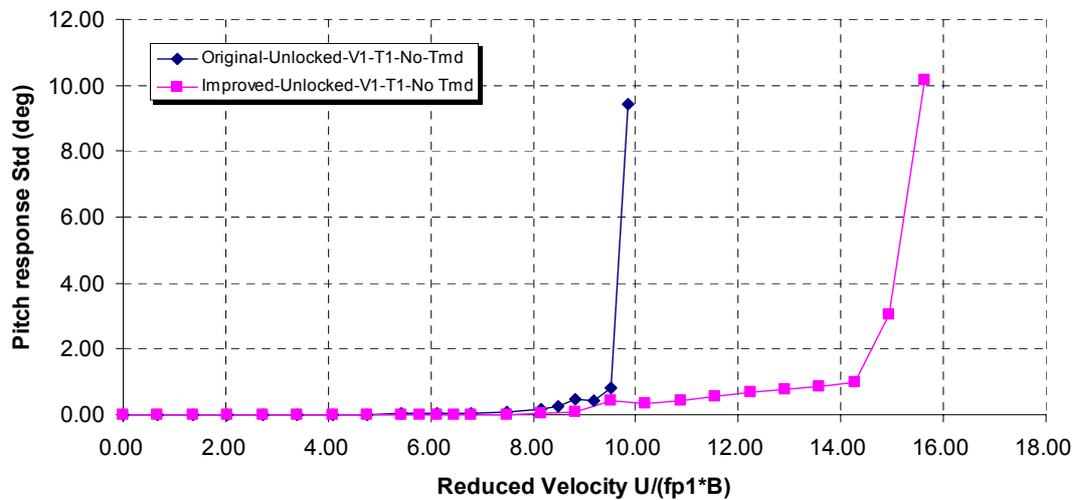


(ข) การบิด

รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อมีการยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและติดตั้ง TMD มวล 1%



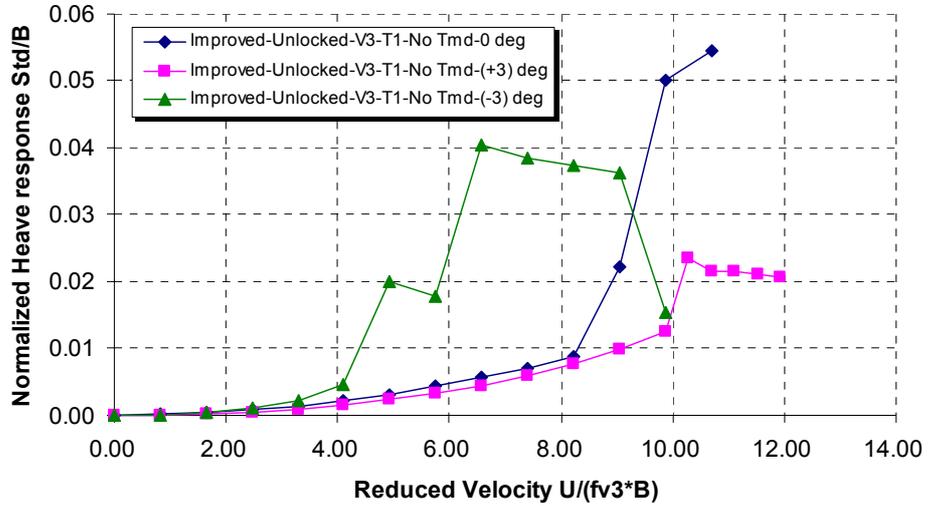
(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง



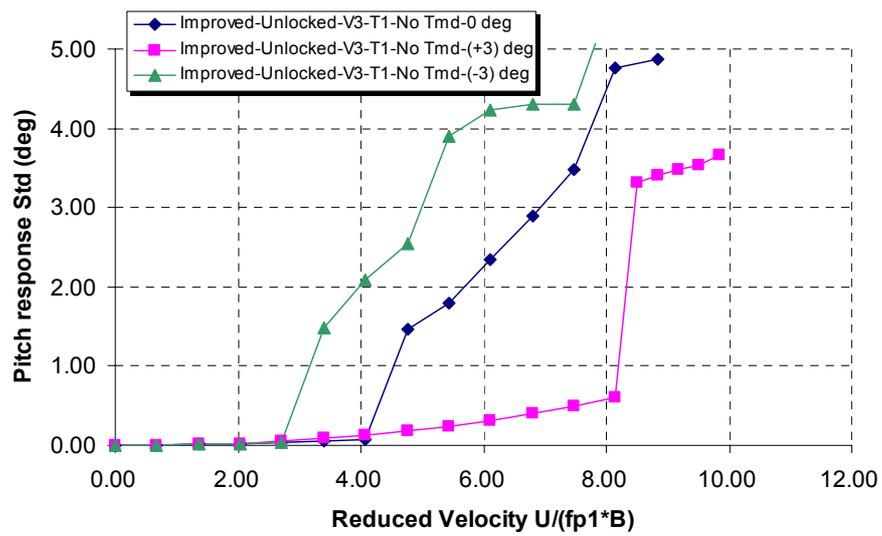
(ข) การบิด

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนและหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติดตั้ง TMD

5.1.2 ติดตั้งสะพานที่ความถี่ V3-T1

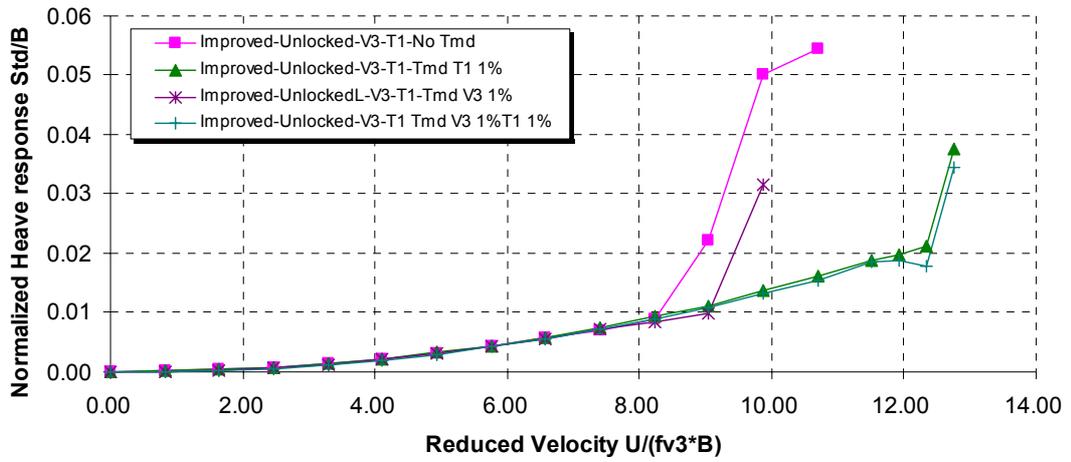


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

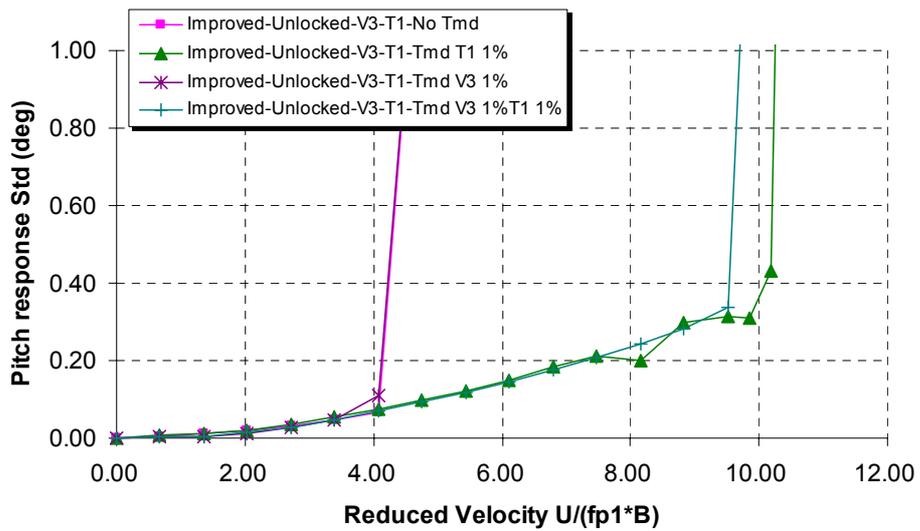


(ข) การบิด

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ไม่ติดตั้ง TMD และแปรผันมุมปะทะ

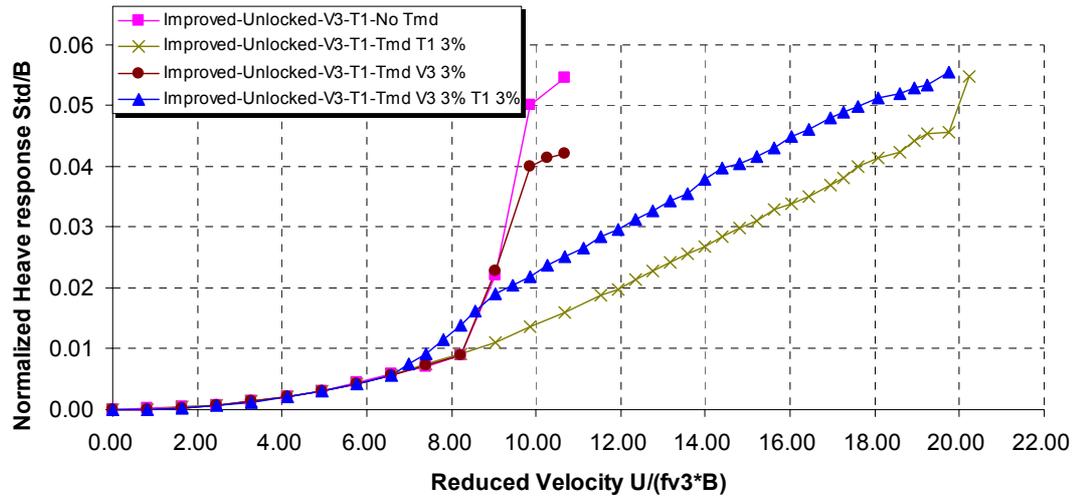


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

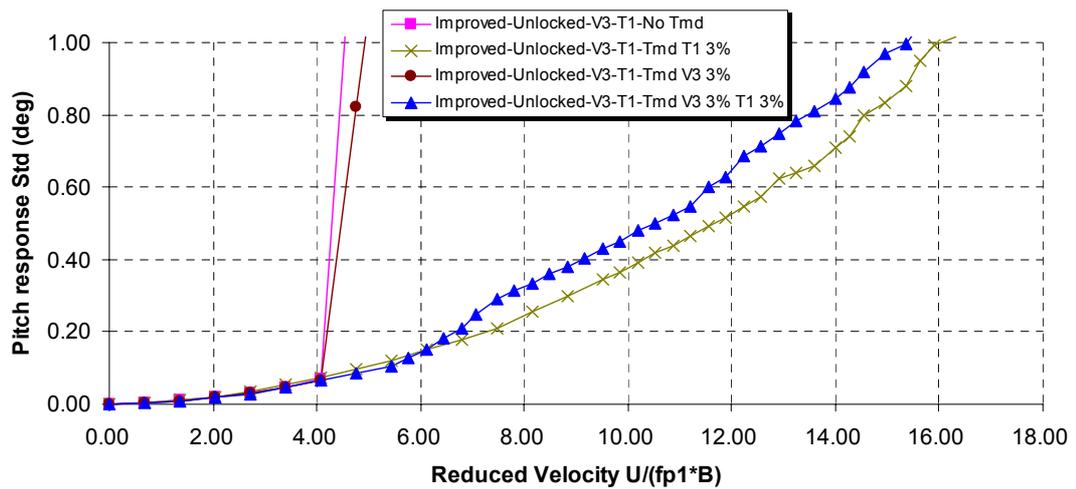


(ข) การบิด

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ติดตั้ง TMD มวล 1%

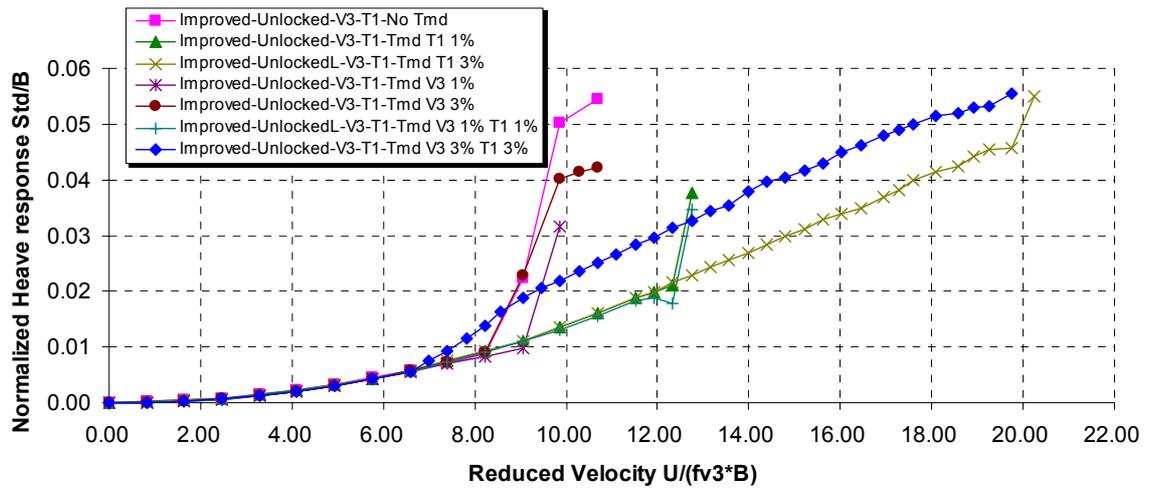


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

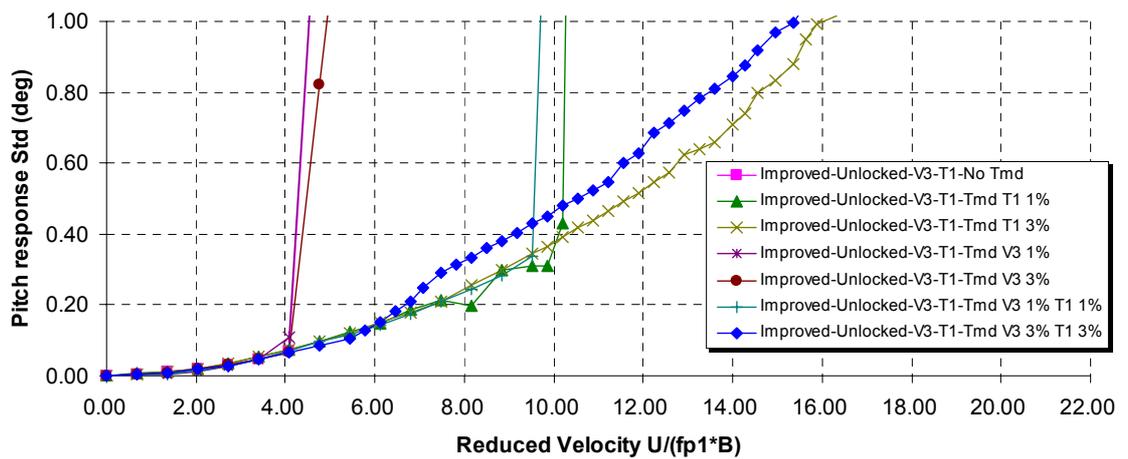


(ข) การบิด

รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่มียึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ติดตั้ง TMD มวล 3%

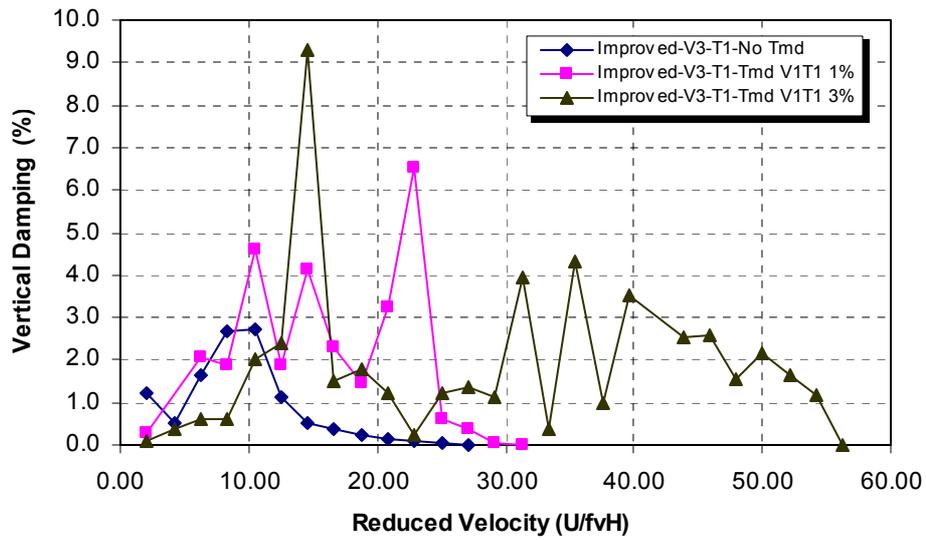


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

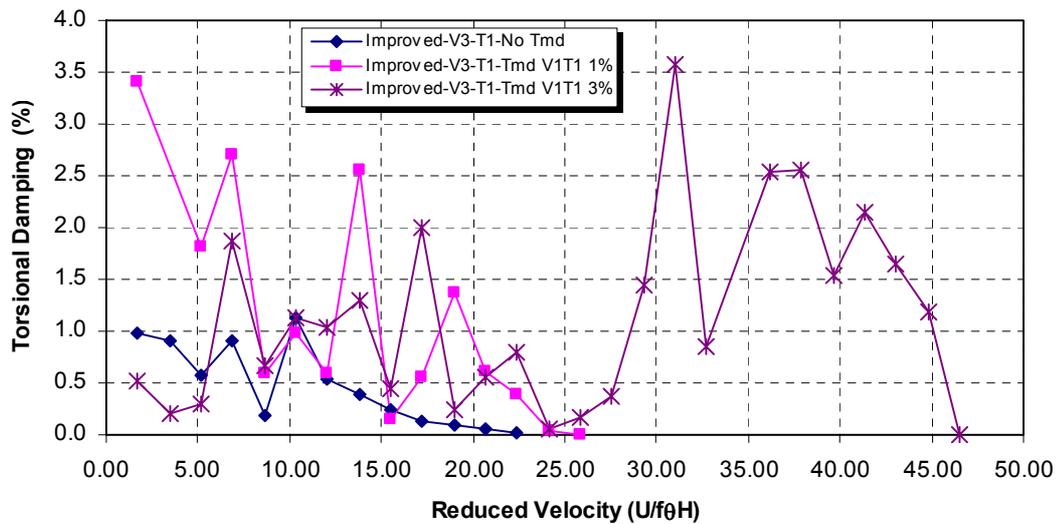


(ข) การบิด

รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่มีค้ำยันข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ติดตั้ง TMD แปรผันมวล 1% และ 3%



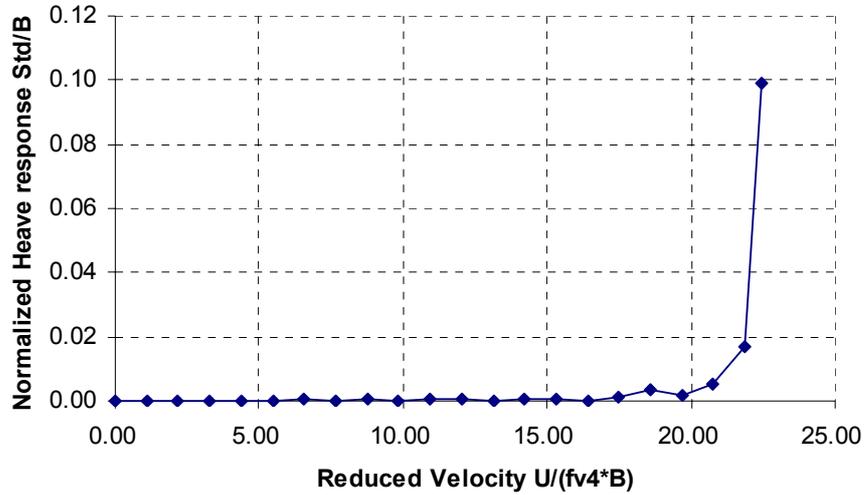
(ก) ความหน่วงแนวตั้ง



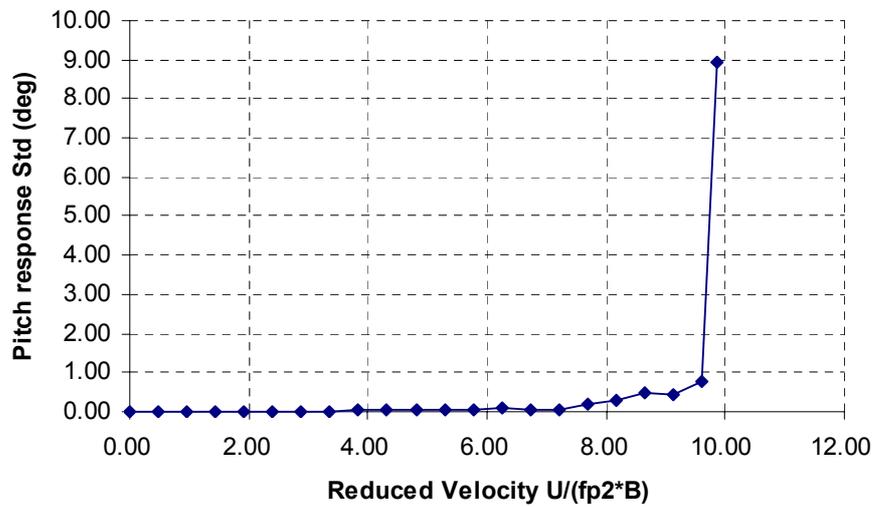
(ข) ความหน่วงการบิด

รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลของความหน่วงสะพาน Akashi kaikyو (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% และ 3%

5.1.3 ติดตั้งสะพานที่ความถี่ V4-T2



(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง



(ข) การบิด

รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อไม่ยึดด้านข้างของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V4-T2) ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และไม่ติดตั้ง TMD

ตารางที่ 5.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo
 (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) แบบยึดและไม่ยึดด้านข้างสะพาน เมื่อไม่ติดตั้ง TMD

| Reduced Velocity (U/fvB) | Normalized Heave (Std/B) No TMD (original section) | | Reduced Velocity (U/ftB) | Pitch Std (deg) No TMD (original section) | |
|-----------------------------|---|----------|-----------------------------|--|----------|
| | Locked | Unlocked | | Locked | Unlocked |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 |
| 1.55 | 0.0001 | 0.0000 | 0.68 | 0.0025 | 0.0023 |
| 3.09 | 0.0000 | 0.0000 | 1.36 | 0.0052 | 0.0031 |
| 4.64 | 0.0000 | 0.0000 | 2.04 | 0.0076 | 0.0052 |
| 6.19 | 0.0001 | 0.0001 | 2.72 | 0.0070 | 0.0051 |
| 7.73 | 0.0003 | 0.0000 | 3.40 | 0.0105 | 0.0139 |
| 9.28 | 0.0000 | 0.0005 | 4.08 | 0.0150 | 0.0157 |
| 10.82 | 0.0010 | 0.0003 | 4.76 | 0.0384 | 0.0204 |
| 12.37 | 0.0003 | 0.0006 | 5.43 | 0.0997 | 0.0435 |
| 13.92 | 0.0012 | 0.0003 | 6.11 | 1.8580 | 0.0520 |
| 15.46 | 0.0831 | 0.0008 | 6.79 | 4.5572 | 0.0452 |
| 17.01 | - | 0.0006 | 7.47 | - | 0.0904 |
| 18.56 | - | 0.0010 | 8.15 | - | 0.1744 |
| 19.33 | - | 0.0010 | 8.49 | - | 0.2683 |
| 20.10 | - | 0.0004 | 8.83 | - | 0.4776 |
| 20.88 | - | 0.0034 | 9.17 | - | 0.4274 |
| 21.65 | - | 0.0168 | 9.51 | - | 0.7949 |
| 22.42 | - | 0.1275 | 9.85 | - | 9.4494 |

ตารางที่ 5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) แบบไม่ยึดด้านข้างสะพานก่อนและหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน เมื่อไม่ติดตั้ง TMD

| Reduced Velocity (U/fvB) | Normalized Heave (Std/B) No TMD (unlocked) | | Reduced Velocity (U/ftB) | Pitch Std (deg) No TMD (unlocked) | |
|-----------------------------|---|----------|-----------------------------|--------------------------------------|----------|
| | Original | Improved | | Original | Improved |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 |
| 1.55 | 0.0000 | 0.0001 | 0.68 | 0.0023 | 0.0025 |
| 3.09 | 0.0000 | 0.0000 | 1.36 | 0.0031 | 0.0052 |
| 4.64 | 0.0001 | 0.0000 | 2.04 | 0.0052 | 0.0076 |
| 6.19 | 0.0001 | 0.0001 | 2.72 | 0.0051 | 0.0070 |
| 7.73 | 0.0000 | 0.0003 | 3.40 | 0.0139 | 0.0105 |
| 9.28 | 0.0005 | 0.0000 | 4.08 | 0.0157 | 0.0150 |
| 10.82 | 0.0003 | 0.0000 | 4.76 | 0.0204 | 0.0076 |
| 12.37 | 0.0006 | 0.0004 | 5.43 | 0.0435 | 0.0070 |
| 13.92 | 0.0003 | 0.0004 | 6.11 | 0.0520 | 0.0150 |
| 15.46 | 0.0008 | 0.0004 | 6.79 | 0.0452 | 0.0070 |
| 17.01 | 0.0006 | 0.0007 | 7.47 | 0.0904 | 0.0105 |
| 18.56 | 0.0010 | 0.0009 | 8.15 | 0.1744 | 0.0384 |
| 20.10 | 0.0004 | 0.0024 | 8.83 | 0.4776 | 0.0997 |
| 21.65 | 0.0168 | 0.0049 | 9.51 | 0.7949 | 0.4357 |
| 23.20 | - | 0.0049 | 10.19 | - | 0.3445 |
| 24.74 | - | 0.0037 | 10.87 | - | 0.4144 |
| 26.29 | - | 0.0077 | 11.55 | - | 0.5656 |
| 27.83 | - | 0.0063 | 12.23 | - | 0.6653 |
| 29.38 | - | 0.0072 | 12.91 | - | 0.7650 |
| 30.93 | - | 0.0051 | 13.59 | - | 0.8647 |
| 32.47 | - | 0.0062 | 14.27 | - | 0.9644 |
| 34.02 | - | 0.0252 | 14.95 | - | 3.0640 |
| 35.57 | - | 0.1246 | 15.63 | - | 10.1691 |

ตารางที่ 5.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1) แบบยึดด้านข้างสะพานก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%

| Reduced Velocity (U/fvB) | Normalized Heave (Std/B) Original section (Locked) | | | Reduced Velocity (U/ftB) | Pitch Std (deg) Original section (Locked) | | |
|-----------------------------|---|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | No TMD | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 | | No TMD | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 |
| 1.55 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.68 | 0.0025 | 0.0013 | 0.0017 |
| 3.09 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0000 | 1.36 | 0.0052 | 0.0050 | 0.0017 |
| 4.64 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 2.04 | 0.0076 | 0.0018 | 0.0017 |
| 6.19 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0006 | 2.72 | 0.0070 | 0.0039 | 0.0055 |
| 7.73 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 | 3.40 | 0.0105 | 0.0071 | 0.0064 |
| 9.28 | 0.0012 | 0.0002 | 0.0010 | 4.08 | 0.0150 | 0.0196 | 0.0163 |
| 10.82 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0005 | 4.76 | 0.0384 | 0.0365 | 0.0237 |
| 12.37 | 0.0013 | 0.0016 | 0.0002 | 5.43 | 0.0997 | 0.0947 | 0.0233 |
| 13.14 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0020 | 5.77 | 0.4357 | 0.2239 | 0.0275 |
| 13.92 | 0.0012 | 0.0018 | 0.0001 | 6.11 | 1.8580 | 0.3215 | 0.0743 |
| 14.69 | 0.0055 | 0.0028 | 0.0011 | 6.45 | 3.8482 | 0.5301 | 0.0604 |
| 15.46 | 0.0831 | 0.0052 | 0.0016 | 6.79 | 4.5572 | 0.8058 | 0.1141 |
| 17.01 | - | 0.0789 | 0.0010 | 7.47 | - | 4.3293 | 0.0740 |
| 17.78 | - | - | 0.0031 | 7.81 | - | - | 0.1748 |
| 18.56 | - | - | 0.0542 | 8.15 | - | - | 3.8300 |

ตารางที่ 5.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo
(ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) แบบไม่ยึดด้านข้างสะพานหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%

| Reduced Velocity (U/fvB) | Normalized Heave (Std/B) Improved section (Unlocked) | | | | Reduced Velocity (U/ftB) | Pitch Std (deg) Improved section (Unlocked) | | | |
|-----------------------------|---|---------|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|---------|-----------|
| | No TMD | TMD1%V3 | TMD1%T1 | TMD1%V3T1 | | No TMD | TMD1%V3 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.82 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0002 | 0.0000 | 0.68 | 0.0041 | 0.0023 | 0.0059 | 0.0021 |
| 1.64 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0005 | 0.0002 | 1.36 | 0.0100 | 0.0048 | 0.0121 | 0.0046 |
| 2.47 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0008 | 0.0006 | 2.04 | 0.0179 | 0.0119 | 0.0199 | 0.0147 |
| 3.29 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0014 | 0.0011 | 2.72 | 0.0305 | 0.0269 | 0.0339 | 0.0281 |
| 4.11 | 0.0022 | 0.0021 | 0.0022 | 0.0020 | 3.40 | 0.0478 | 0.0451 | 0.0543 | 0.0484 |
| 4.93 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0030 | 4.08 | 0.0685 | 0.1093 | 0.0754 | 0.0702 |
| 5.76 | 0.0044 | 0.0043 | 0.0044 | 0.0043 | 4.76 | 1.4590 | 1.4749 | 0.0980 | 0.0956 |
| 6.58 | 0.0058 | 0.0056 | 0.0057 | 0.0055 | 5.43 | 1.7879 | 1.6172 | 0.1227 | 0.1158 |
| 7.40 | 0.0071 | 0.0071 | 0.0075 | 0.0072 | 6.11 | 2.3416 | 1.8908 | 0.1491 | 0.1441 |
| 8.22 | 0.0089 | 0.0084 | 0.0093 | 0.0090 | 6.79 | 2.8927 | 2.5565 | 0.1847 | 0.1758 |
| 9.05 | 0.0222 | 0.0099 | 0.0111 | 0.0110 | 7.47 | 3.4734 | 3.3992 | 0.2133 | 0.2088 |
| 9.87 | 0.0502 | 0.0316 | 0.0137 | 0.0132 | 8.15 | 4.7545 | 4.1252 | 0.1996 | 0.2450 |
| 10.69 | 0.0546 | - | 0.0162 | 0.0155 | 8.83 | 4.8643 | - | 0.2991 | 0.2832 |
| 11.51 | - | - | 0.0187 | 0.0184 | 9.51 | - | - | 0.3118 | 0.3388 |
| 11.92 | - | - | 0.0198 | 0.0188 | 9.85 | - | - | 0.3116 | 1.5604 |
| 12.34 | - | - | 0.0212 | 0.0179 | 10.19 | - | - | 0.4316 | 2.5160 |
| 12.75 | - | - | 0.0377 | 0.0345 | 10.53 | - | - | 3.3737 | 3.0722 |

ตารางที่ 5.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) แบบไม่ยึดด้านข้างสะพานหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 3%

| Reduced Velocity (U/fvB) | Normalized Heave (Std/B) Improved section (Unlocked) | | | | Reduced Velocity (U/ftB) | Pitch Std (deg) Improved section (Unlocked) | | | |
|-----------------------------|---|---------|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|---------|-----------|
| | No TMD | TMD3%V3 | TMD3%T1 | TMD3%V3T1 | | No TMD | TMD3%V3 | TMD3%T1 | TMD3%V1T1 |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.82 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.68 | 0.0041 | 0.0043 | 0.0055 | 0.0032 |
| 1.64 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 | 1.36 | 0.0100 | 0.0092 | 0.0132 | 0.0085 |
| 2.47 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 2.04 | 0.0179 | 0.0175 | 0.0196 | 0.0175 |
| 3.29 | 0.0014 | 0.0013 | 0.0013 | 0.0012 | 2.72 | 0.0305 | 0.0300 | 0.0334 | 0.0279 |
| 4.11 | 0.0022 | 0.0020 | 0.0021 | 0.0021 | 3.40 | 0.0478 | 0.0448 | 0.0529 | 0.0458 |
| 4.93 | 0.0032 | 0.0030 | 0.0032 | 0.0031 | 4.08 | 0.0685 | 0.0642 | 0.0755 | 0.0649 |
| 5.76 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0043 | 0.0042 | 4.76 | 1.4590 | 0.8232 | 0.0988 | 0.0838 |
| 6.58 | 0.0058 | 0.0057 | 0.0057 | 0.0056 | 5.43 | 1.7879 | 1.5522 | 0.1220 | 0.1040 |
| 7.40 | 0.0071 | 0.0073 | 0.0074 | 0.0092 | 6.11 | 2.3416 | 1.8296 | 0.1500 | 0.1510 |
| 8.22 | 0.0089 | 0.0089 | 0.0092 | 0.0139 | 6.79 | 2.8927 | 2.3376 | 0.1786 | 0.2104 |
| 9.05 | 0.0222 | 0.0229 | 0.0111 | 0.0189 | 7.47 | 3.4734 | 3.3826 | 0.2111 | 0.2901 |
| 9.87 | 0.0502 | 0.0401 | 0.0136 | 0.0218 | 8.15 | 4.7545 | 3.5712 | 0.2551 | 0.3323 |
| 10.69 | 0.0546 | 0.0421 | 0.0160 | 0.0251 | 8.83 | 4.8643 | 3.5103 | 0.2969 | 0.3817 |
| 11.51 | - | - | 0.0188 | 0.0285 | 9.51 | - | - | 0.3459 | 0.4312 |
| 11.92 | - | - | 0.0198 | 0.0296 | 9.85 | - | - | 0.3626 | 0.4483 |
| 12.34 | - | - | 0.0215 | 0.0314 | 10.19 | - | - | 0.3914 | 0.4796 |
| 12.75 | - | - | 0.0228 | 0.0327 | 10.53 | - | - | 0.4175 | 0.4993 |
| 13.16 | - | - | 0.0243 | 0.0344 | 10.87 | - | - | 0.4382 | 0.5225 |
| 13.57 | - | - | 0.0256 | 0.0355 | 11.21 | - | - | 0.4646 | 0.5465 |
| 13.98 | - | - | 0.0269 | 0.0379 | 11.55 | - | - | 0.4927 | 0.6011 |
| 14.39 | - | - | 0.0284 | 0.0397 | 11.89 | - | - | 0.5148 | 0.6284 |
| 14.80 | - | - | 0.0298 | 0.0405 | 12.23 | - | - | 0.5473 | 0.6873 |

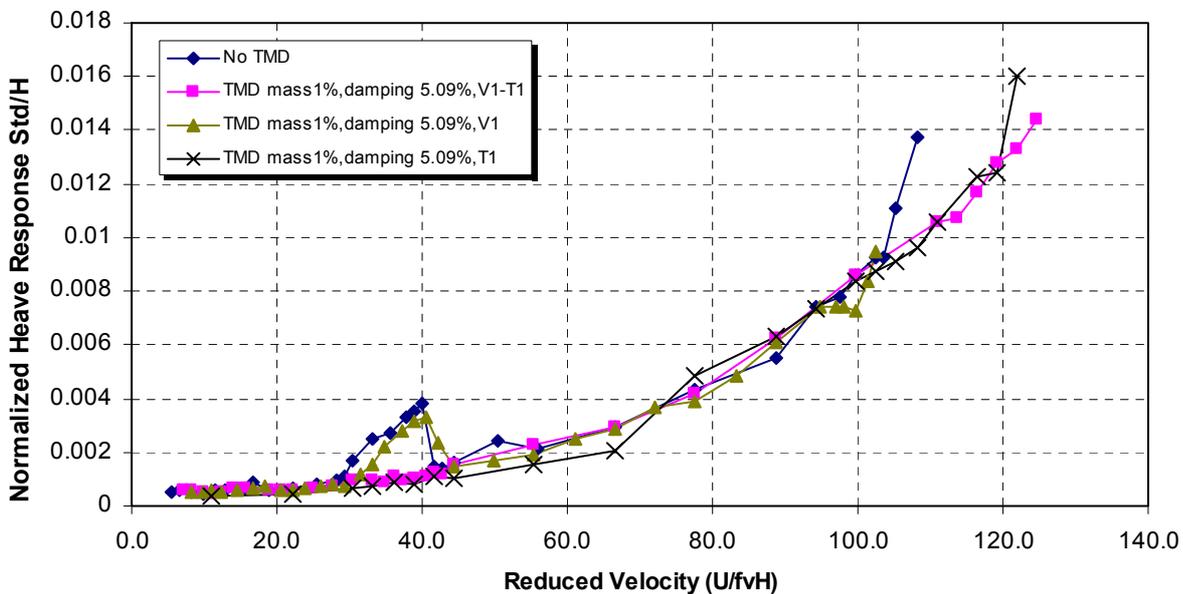
| | | | | | | | | | |
|-------|---|---|--------|--------|-------|---|---|--------|--------|
| 15.21 | - | - | 0.0311 | 0.0417 | 12.57 | - | - | 0.5742 | 0.7129 |
| 15.63 | - | - | 0.0328 | 0.0430 | 12.91 | - | - | 0.6241 | 0.7477 |
| 16.04 | - | - | 0.0340 | 0.0450 | 13.25 | - | - | 0.6391 | 0.7836 |
| 16.45 | - | - | 0.0350 | 0.0461 | 13.59 | - | - | 0.6576 | 0.8097 |
| 16.94 | - | - | 0.0369 | 0.0479 | 13.99 | - | - | 0.7102 | 0.8453 |
| 17.27 | - | - | 0.0380 | 0.0490 | 14.27 | - | - | 0.7395 | 0.8756 |
| 17.60 | - | - | 0.0400 | 0.0499 | 14.54 | - | - | 0.7972 | 0.9194 |
| 18.09 | - | - | 0.0415 | 0.0514 | 14.95 | - | - | 0.8347 | 0.9693 |
| 18.59 | - | - | 0.0425 | 0.0519 | 15.35 | - | - | 0.8816 | 0.9954 |
| 18.92 | - | - | 0.0443 | 0.0529 | 15.63 | - | - | 0.9484 | 1.0509 |
| 19.24 | - | - | 0.0454 | 0.0533 | 15.90 | - | - | 0.9937 | 1.0972 |
| 19.74 | - | - | 0.0456 | 0.0554 | 16.30 | - | - | 1.0148 | 1.2941 |

ตารางที่ 5.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพาน Akashi kaikyo (ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1) แบบไม่มียึดด้านข้างสะพานหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน แปรผันมุมปะทะลมและไม่ติดตั้ง TMD

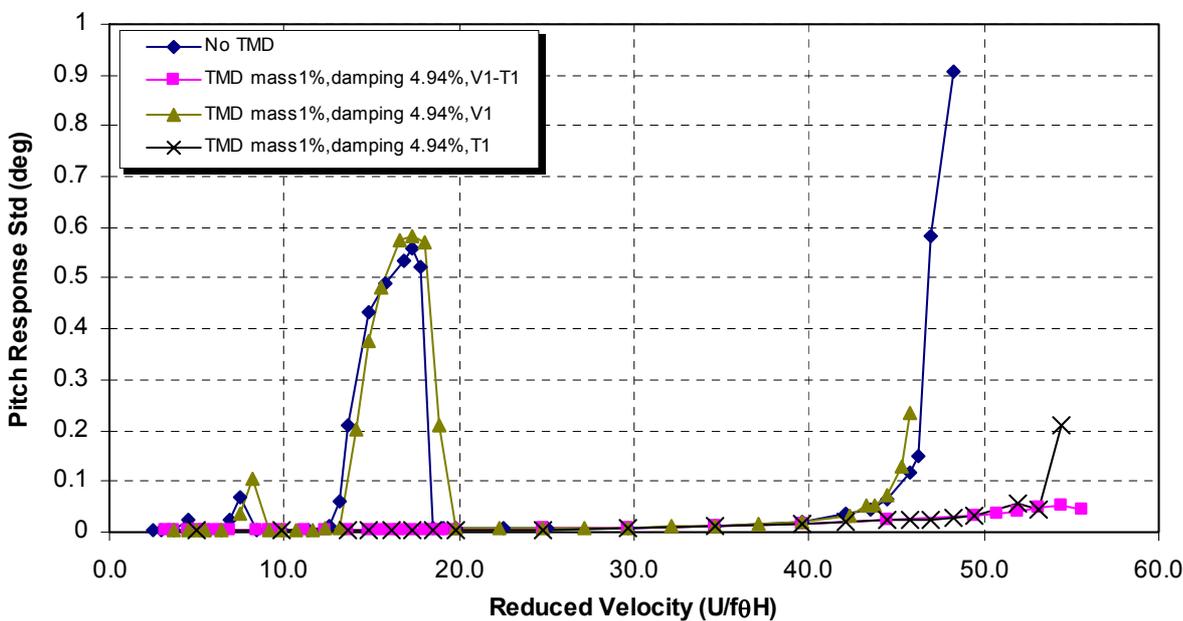
| Reduced Velocity (U/ftB) | Normalized Heave (Std/B) | | | Reduced Velocity (U/ftB) | Pitch Std (deg) | | |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------|
| | Improved section (Unlocked, No TMD) | | | | Improved section (Unlocked, No TMD) | | |
| | $\alpha = -3^\circ$ | $\alpha = \pm 0^\circ$ | $\alpha = +3^\circ$ | | $\alpha = -3^\circ$ | $\alpha = \pm 0^\circ$ | $\alpha = +3^\circ$ |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.82 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0000 | 0.68 | 0.0040 | 0.0041 | 0.0009 |
| 1.64 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0002 | 1.36 | 0.0099 | 0.0100 | 0.0104 |
| 2.47 | 0.0012 | 0.0008 | 0.0005 | 2.04 | 0.0228 | 0.0179 | 0.0249 |
| 3.29 | 0.0022 | 0.0014 | 0.0009 | 2.72 | 0.0410 | 0.0305 | 0.0549 |
| 4.11 | 0.0046 | 0.0022 | 0.0015 | 3.40 | 1.4780 | 0.0478 | 0.0866 |
| 4.93 | 0.0200 | 0.0032 | 0.0023 | 4.08 | 2.0835 | 0.0685 | 0.1308 |
| 5.76 | 0.0177 | 0.0044 | 0.0032 | 4.76 | 2.5420 | 1.4590 | 0.1788 |
| 6.58 | 0.0404 | 0.0058 | 0.0043 | 5.43 | 3.8942 | 1.7879 | 0.2362 |
| 7.40 | 0.0384 | 0.0071 | 0.0059 | 6.11 | 4.2379 | 2.3416 | 0.3165 |
| 8.22 | 0.0373 | 0.0089 | 0.0076 | 6.79 | 4.3131 | 2.8927 | 0.3948 |
| 9.05 | 0.0363 | 0.0222 | 0.0098 | 7.47 | 4.3001 | 3.4734 | 0.4968 |
| 9.87 | 0.0154 | 0.0502 | 0.0125 | 8.15 | 5.7628 | 4.7545 | 0.6122 |
| 10.69 | - | 0.0546 | 0.0215 | 8.83 | - | 4.8643 | 3.4100 |
| 11.10 | - | - | 0.0215 | 9.17 | - | - | 3.4796 |
| 11.51 | - | - | 0.0212 | 9.51 | - | - | 3.5395 |
| 11.92 | - | - | 0.0206 | 9.85 | - | - | 3.6575 |

5.2 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและมุมการบิดของแบบจำลองสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

5.2.1 ติดตั้งสะพานที่ความถี่ V1-T1

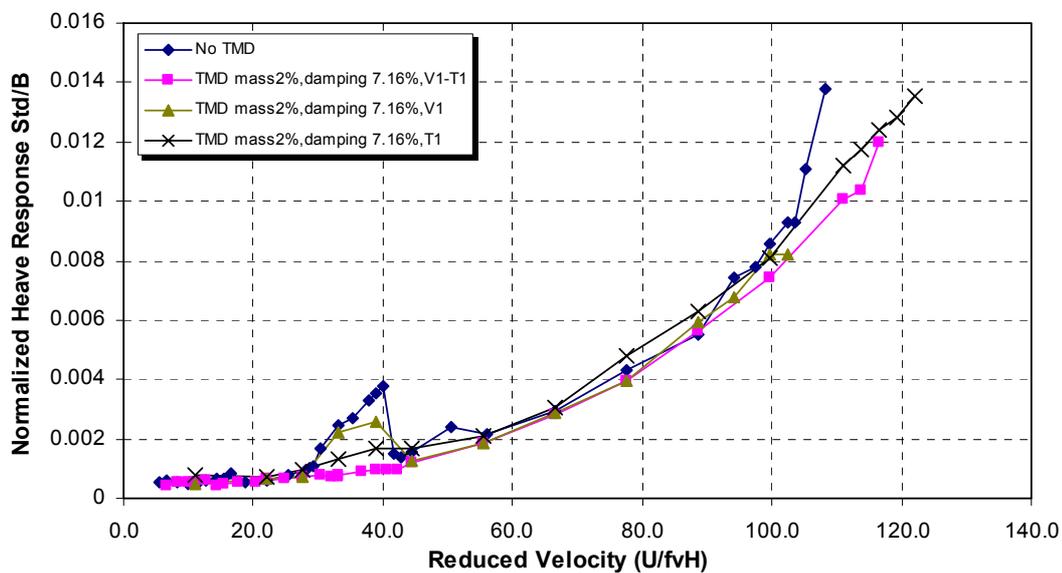


(ก) การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

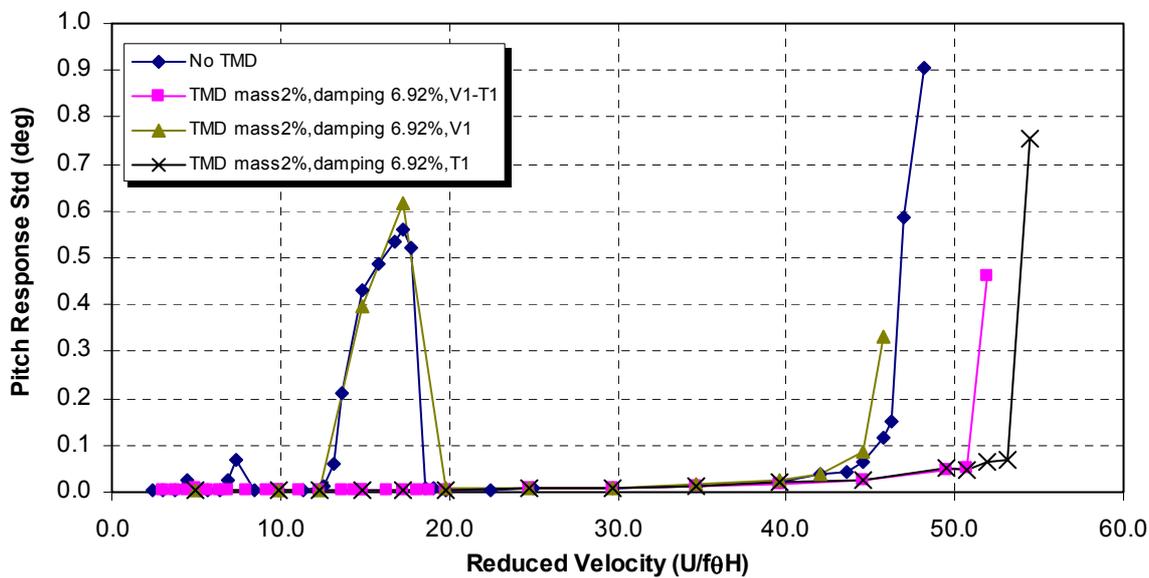


(ข) การบิด

รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%

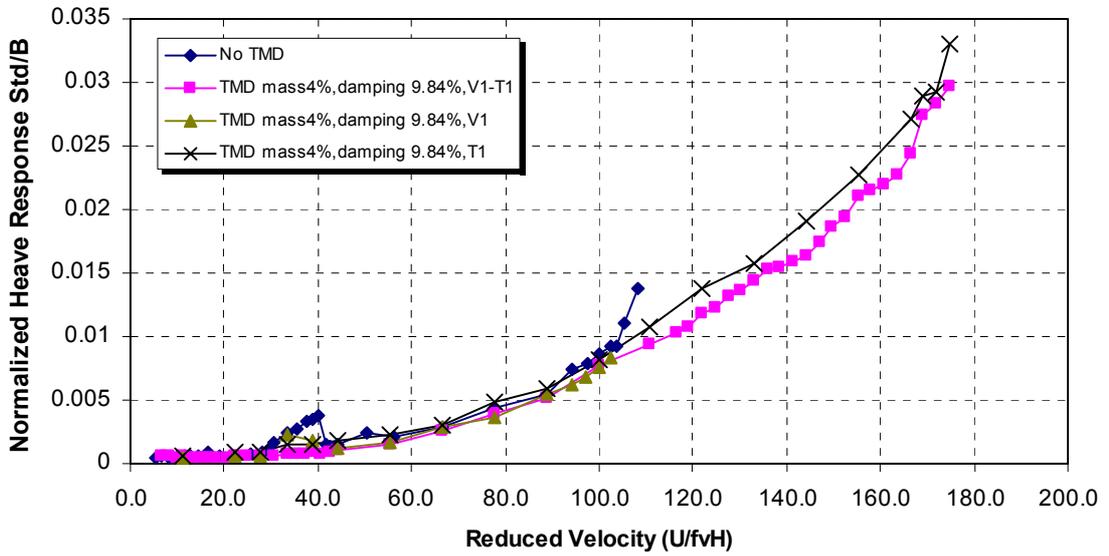


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

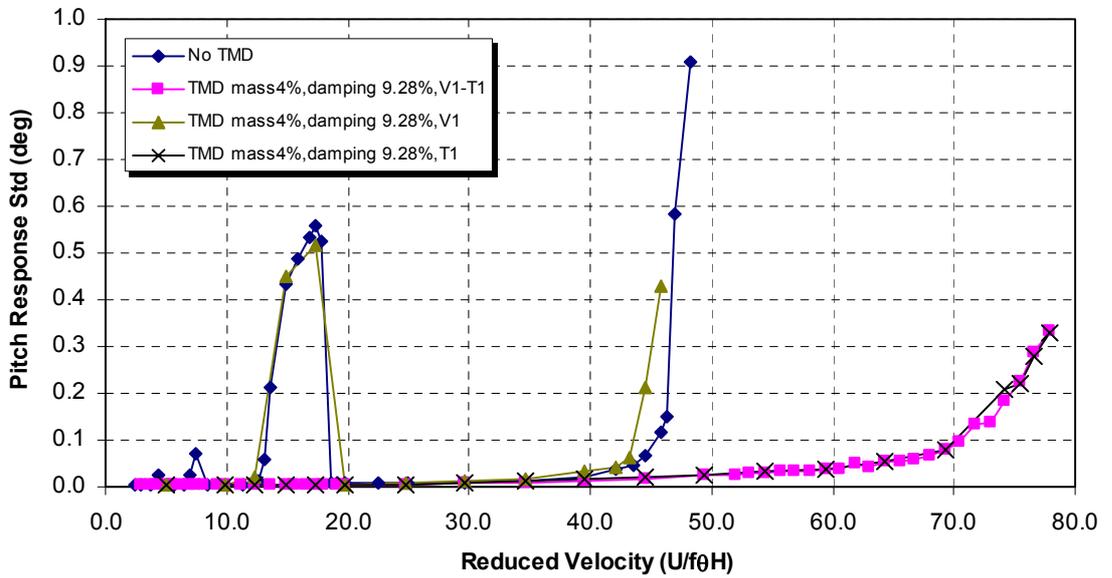


(ข) การบิด

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 2%

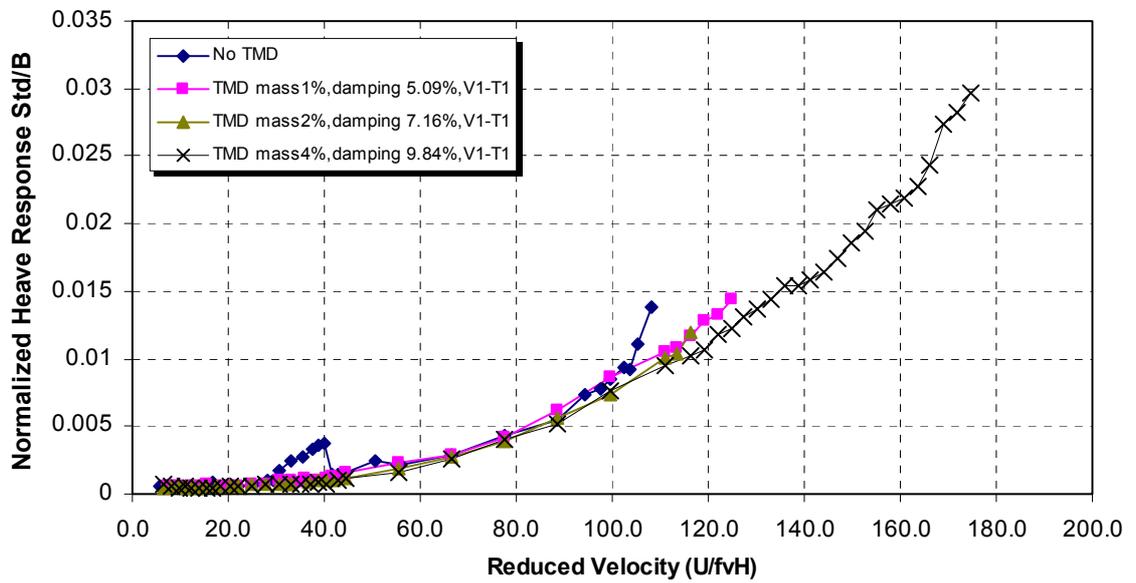


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

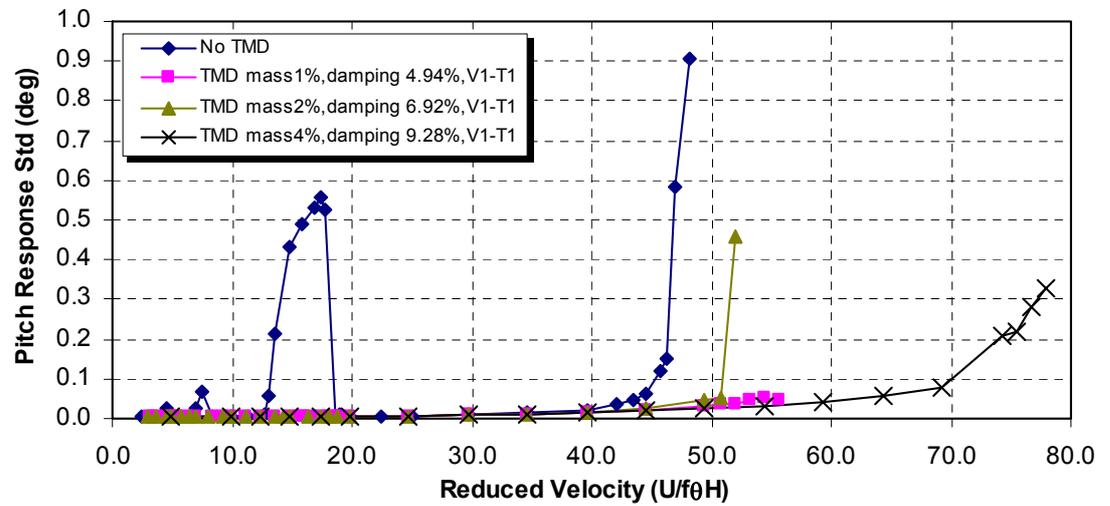


(ข) การบิด

รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลัง ติดตั้ง TMD มวล 4%

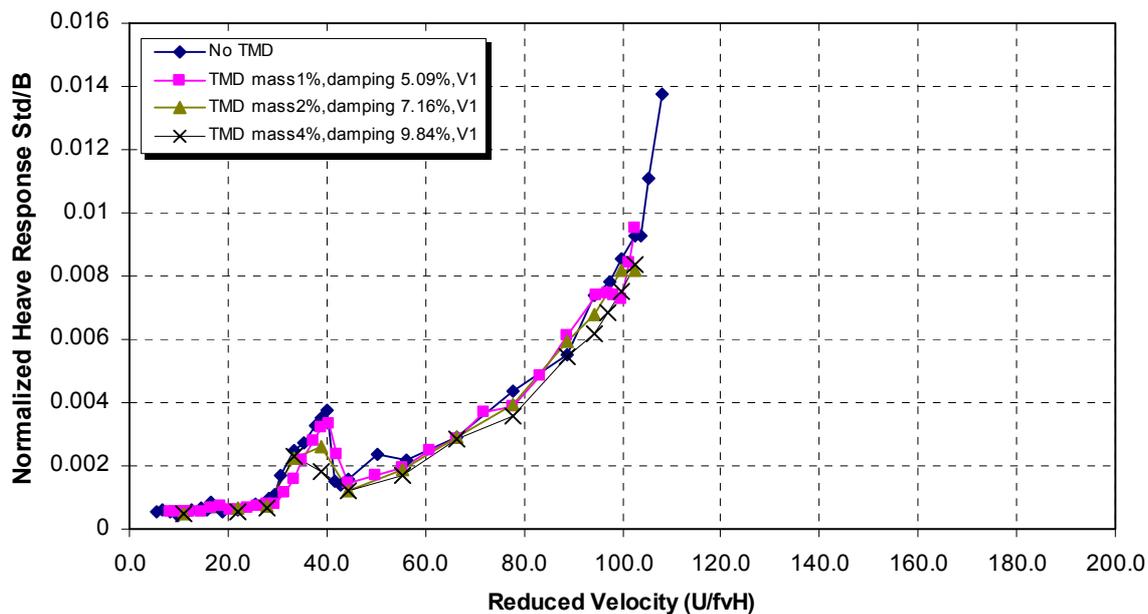


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

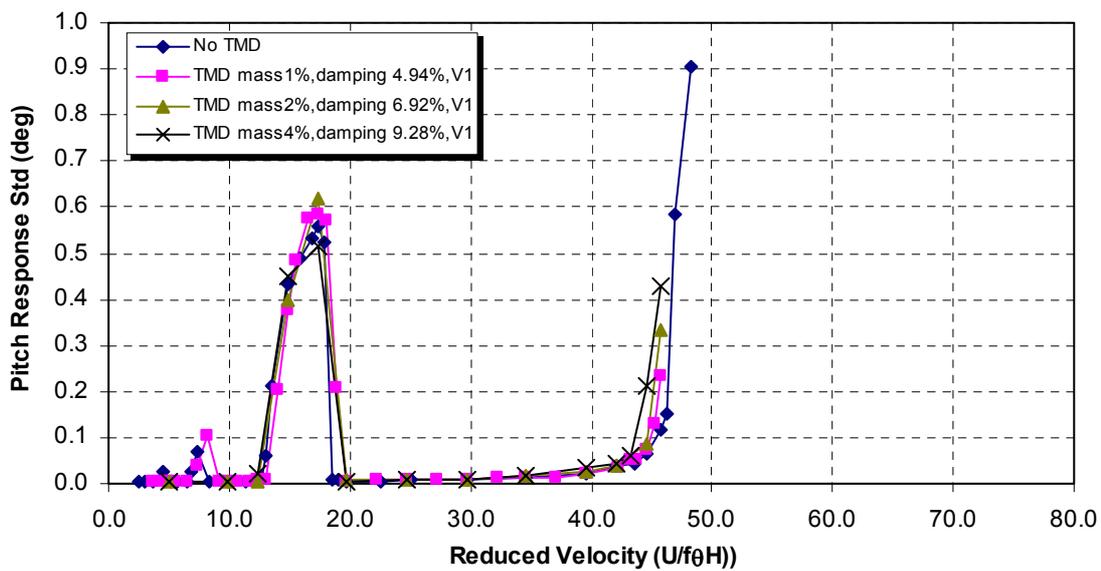


(ข) การบิด

รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ควบคุมทั้งแนวตั้ง V1 และการบิด T1

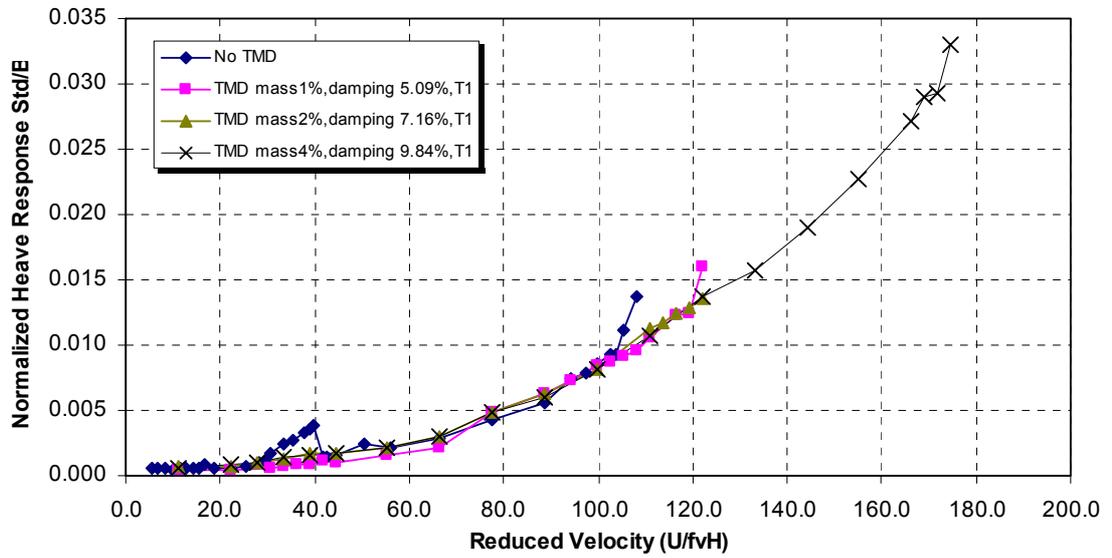


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

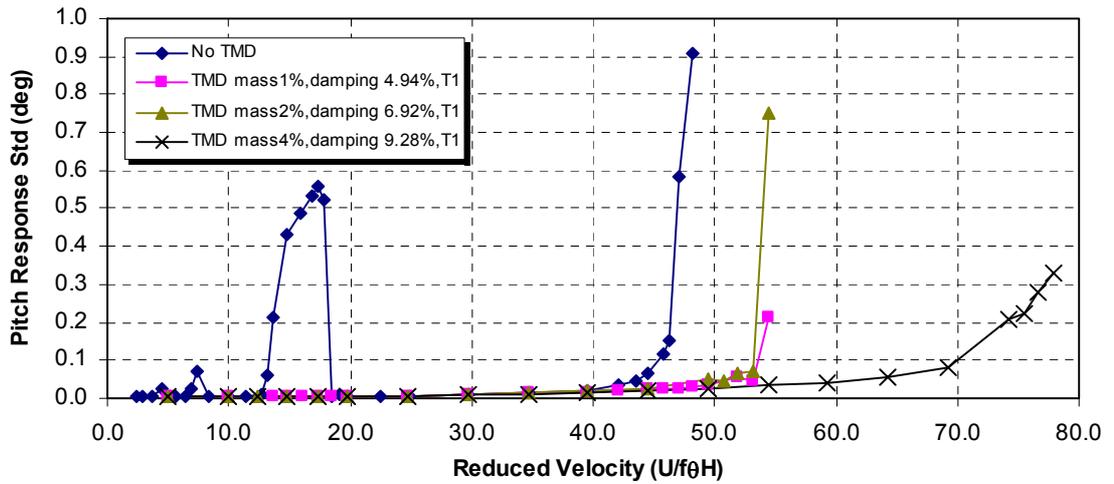


(ข) การบิด

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ควบคุมแนวตั้ง V1

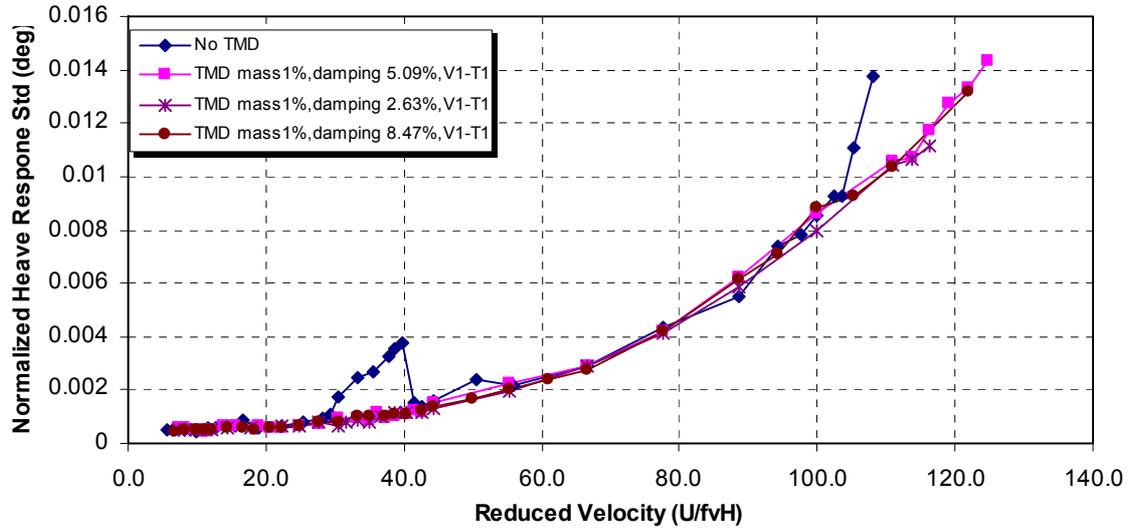


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

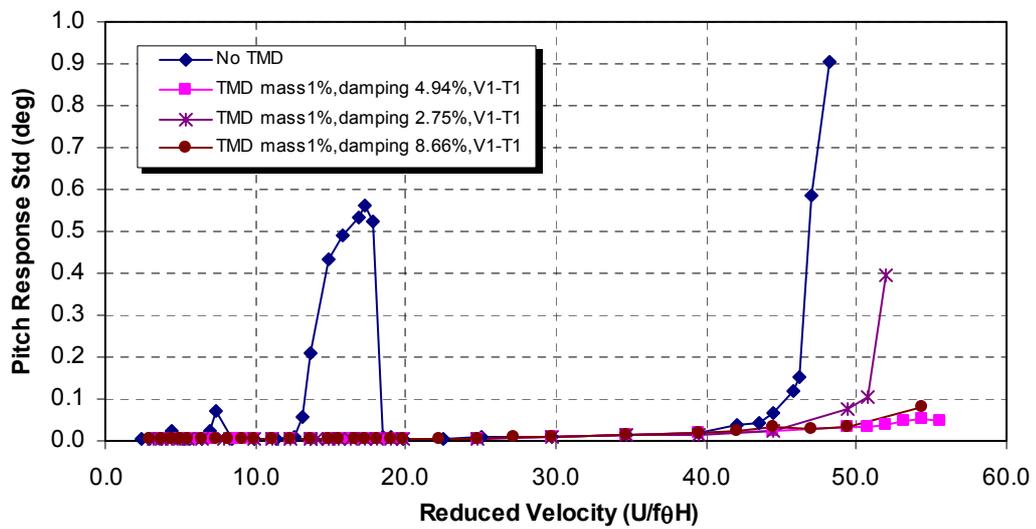


(ข) การบิด

รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4% ความคุมการบิด T1

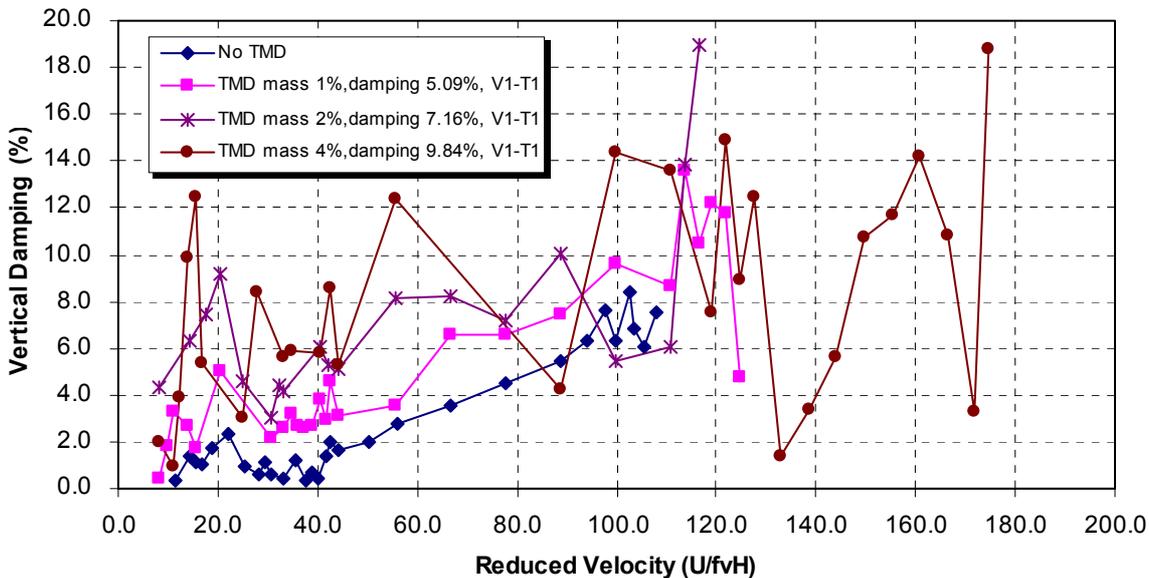


(ก) การเคลื่อนที่แนวตั้ง

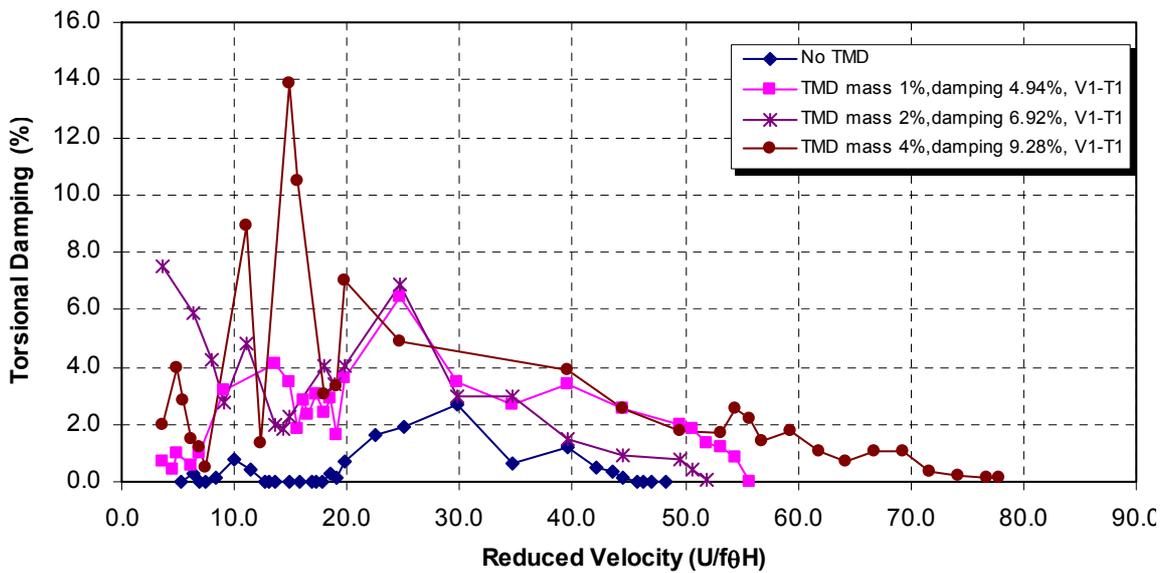


(ข) การบิด

รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมทั้งแนวตั้ง V1 และการบิด T1 และแปรผันความหน่วง



(ก) ความหน่วงแนวตั้ง



(ข) ความหน่วงการบิด

รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบผลของความหน่วงสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%, 2% และ 4%

ตารางที่ 5.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวการบิดของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%

| Reduced Velocity (U/fvH) | Normalized Heave (Std/B) TMD mass 1%, $\xi_v = 5.09\%$ | | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Pitch Std (deg) TMD mass 1%, $\xi_t = 4.94\%$ | | | |
|-----------------------------|---|---------|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|---------|-----------|
| | No TMD | TMD1%V1 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 | | No TMD | TMD1%V1 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5.54 | 0.0005 | - | - | - | 2.47 | 0.0038 | - | - | - |
| 6.65 | 0.0006 | - | - | - | 2.97 | 0.0036 | - | - | - |
| 7.21 | - | - | - | 0.0006 | 3.22 | - | - | - | 0.0034 |
| 8.32 | 0.0005 | 0.0005 | - | 0.0006 | 3.71 | 0.0038 | 0.0040 | - | 0.0034 |
| 9.98 | 0.0005 | 0.0005 | - | 0.0005 | 4.45 | 0.0239 | 0.0038 | - | 0.0035 |
| 11.09 | - | 0.0006 | 0.0004 | 0.0004 | 4.95 | - | 0.0046 | 0.0038 | 0.0036 |
| 11.64 | 0.0006 | - | - | - | 5.19 | 0.0044 | - | - | - |
| 12.20 | - | 0.0006 | - | 0.0005 | 5.44 | - | 0.0039 | - | 0.0036 |
| 12.75 | 0.0006 | - | - | - | 5.69 | 0.0039 | - | - | - |
| 13.86 | - | - | - | 0.0006 | 6.18 | - | - | - | 0.0035 |
| 14.41 | 0.0006 | 0.0006 | - | - | 6.43 | 0.0040 | 0.0038 | - | - |
| 15.52 | 0.0006 | - | - | 0.0007 | 6.92 | 0.0251 | - | - | 0.0035 |
| 16.63 | 0.0008 | 0.0007 | - | - | 7.42 | 0.0699 | 0.0369 | - | - |
| 18.30 | - | 0.0007 | - | - | 8.16 | - | 0.1043 | - | - |
| 18.85 | 0.0006 | - | - | 0.0006 | 8.41 | 0.0050 | - | - | 0.0039 |
| 20.51 | - | 0.0006 | - | 0.0006 | 9.15 | - | 0.0048 | - | 0.0035 |
| 22.18 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0004 | 0.0006 | 9.89 | 0.0044 | 0.0044 | 0.0035 | 0.0039 |
| 23.84 | - | 0.0007 | - | - | 10.63 | - | 0.0045 | - | - |
| 24.95 | - | - | - | 0.0007 | 11.13 | - | - | - | 0.0038 |
| 25.50 | 0.0008 | - | - | - | 11.38 | 0.0047 | - | - | - |
| 26.06 | - | 0.0007 | - | - | 11.62 | - | 0.0050 | - | - |
| 27.72 | - | 0.0008 | - | 0.0007 | 12.37 | - | 0.0071 | - | 0.0037 |
| 28.27 | 0.0009 | - | - | - | 12.61 | 0.0111 | - | - | - |

| | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 29.38 | 0.0011 | 0.0008 | - | - | 13.11 | 0.0588 | 0.0071 | - | - |
| 30.49 | 0.0017 | - | 0.0006 | 0.0010 | 13.60 | 0.2119 | - | 0.0037 | 0.0040 |
| 31.60 | - | 0.0012 | - | - | 14.10 | - | 0.2028 | - | - |
| 33.26 | 0.0025 | 0.0016 | 0.0007 | 0.0010 | 14.84 | 0.4318 | 0.3755 | 0.0037 | 0.0042 |
| 34.93 | - | 0.0022 | - | 0.0009 | 15.58 | - | 0.4834 | - | 0.0041 |
| 35.48 | 0.0027 | - | - | - | 15.83 | 0.4886 | - | - | - |
| 36.04 | - | - | 0.0009 | 0.0011 | 16.08 | - | - | 0.0040 | 0.0045 |
| 37.15 | - | 0.0028 | - | 0.0010 | 16.57 | - | 0.5755 | - | 0.0044 |
| 37.70 | 0.0033 | - | - | - | 16.82 | 0.5331 | - | - | - |
| 38.81 | 0.0035 | 0.0032 | 0.0008 | 0.0010 | 17.31 | 0.5599 | 0.5835 | 0.0043 | 0.0040 |
| 39.92 | 0.0038 | - | - | - | 17.81 | 0.5236 | - | - | - |
| 40.47 | - | 0.0033 | - | 0.0011 | 18.05 | - | 0.5704 | - | 0.0046 |
| 41.58 | 0.0015 | - | 0.0011 | 0.0013 | 18.55 | 0.0075 | - | 0.0052 | 0.0043 |
| 42.14 | - | 0.0024 | - | - | 18.80 | - | 0.2090 | - | - |
| 42.69 | 0.0014 | - | - | 0.0012 | 19.04 | 0.0101 | - | - | 0.0049 |
| 44.35 | 0.0016 | 0.0014 | 0.0010 | 0.0015 | 19.78 | 0.0065 | 0.0062 | 0.0052 | 0.0055 |
| 49.90 | - | 0.0017 | - | - | 22.26 | - | 0.0069 | - | - |
| 50.45 | 0.0024 | - | - | - | 22.51 | 0.0065 | - | - | - |
| 55.44 | - | 0.0019 | 0.0015 | 0.0023 | 24.73 | - | 0.0080 | 0.0057 | 0.0066 |
| 56.00 | 0.0022 | - | - | - | 24.98 | 0.0075 | - | - | - |
| 60.99 | - | 0.0025 | - | - | 27.20 | - | 0.0084 | - | - |
| 66.53 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0021 | 0.0029 | 29.68 | 0.0085 | 0.0089 | 0.0078 | 0.0082 |
| 72.07 | - | 0.0037 | - | - | 32.15 | - | 0.0129 | - | - |
| 77.62 | 0.0043 | 0.0039 | 0.0048 | 0.0042 | 34.62 | 0.0135 | 0.0122 | 0.0134 | 0.0127 |
| 83.16 | - | 0.0048 | - | - | 37.10 | - | 0.0150 | - | - |
| 88.71 | 0.0055 | 0.0061 | 0.0063 | 0.0063 | 39.57 | 0.0202 | 0.0202 | 0.0168 | 0.0178 |
| 94.25 | 0.0074 | - | 0.0073 | - | 42.04 | 0.0371 | - | 0.0200 | - |
| 94.80 | - | 0.0074 | - | - | 42.29 | - | 0.0328 | - | - |
| 97.02 | - | 0.0074 | - | - | 43.28 | - | 0.0510 | - | - |
| 97.58 | 0.0078 | - | - | - | 43.53 | 0.0443 | - | - | - |
| 98.13 | - | 0.0074 | - | - | 43.77 | - | 0.0514 | - | - |
| 99.79 | 0.0086 | 0.0073 | 0.0084 | 0.0086 | 44.52 | 0.0651 | 0.0743 | 0.0249 | 0.0232 |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 101.46 | - | 0.0084 | - | - | 45.26 | - | 0.1288 | - | - |
| 102.57 | 0.0093 | 0.0095 | 0.0087 | - | 45.75 | 0.1181 | 0.2350 | 0.0255 | - |
| 103.67 | 0.0093 | - | - | - | 46.25 | 0.1512 | - | - | - |
| 105.34 | 0.0111 | - | 0.0091 | - | 46.99 | 0.5848 | - | 0.0257 | - |
| 108.11 | 0.0138 | - | 0.0096 | - | 48.23 | 0.9066 | - | 0.0294 | - |
| 110.88 | - | - | 0.0106 | 0.0106 | 49.46 | - | - | 0.0331 | 0.0319 |
| 113.65 | - | - | - | 0.0107 | 50.70 | - | - | - | 0.0356 |
| 116.43 | - | - | 0.0123 | 0.0117 | 51.94 | - | - | 0.0571 | 0.0390 |
| 119.20 | - | - | 0.0124 | 0.0128 | 53.17 | - | - | 0.0439 | 0.0475 |
| 121.97 | - | - | 0.0160 | 0.0133 | 54.41 | - | - | 0.2122 | 0.0540 |
| 124.74 | - | - | - | 0.0144 | 55.64 | - | - | - | 0.0465 |

ตารางที่ 5.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 2%

| Reduced Velocity (U/fvH) | Normalized Heave (Std/B) TMD mass 2%, $\xi_v = 7.16\%$ | | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Pitch Std (deg) TMD mass 2%, $\xi_t = 6.92\%$ | | | |
|-----------------------------|---|---------|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|---------|-----------|
| | No TMD | TMD2%V1 | TMD2%T1 | TMD2%V1T1 | | No TMD | TMD2%V1 | TMD2%T1 | TMD2%V1T1 |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5.54 | 0.0005 | - | - | - | 2.47 | 0.0038 | - | - | - |
| 6.65 | 0.0006 | - | - | 0.0004 | 2.97 | 0.0036 | - | - | 0.0047 |
| 7.21 | - | - | - | - | 3.22 | - | - | - | - |
| 8.32 | 0.0005 | - | - | 0.0005 | 3.71 | 0.0038 | - | - | 0.0036 |
| 9.98 | 0.0005 | - | - | 0.0006 | 4.45 | 0.0239 | - | - | 0.0036 |
| 11.09 | - | 0.0005 | 0.0008 | 0.0005 | 4.95 | - | 0.0038 | 0.0037 | 0.0039 |
| 11.64 | 0.0006 | - | - | - | 5.19 | 0.0044 | - | - | - |
| 12.20 | - | - | - | - | 5.44 | - | - | - | - |
| 12.75 | 0.0006 | - | - | 0.0006 | 5.69 | 0.0039 | - | - | 0.0036 |
| 13.86 | - | - | - | - | 6.18 | - | - | - | - |
| 14.41 | 0.0006 | - | - | 0.0004 | 6.43 | 0.0040 | - | - | 0.0046 |
| 15.52 | 0.0006 | - | - | 0.0005 | 6.92 | 0.0251 | - | - | 0.0035 |
| 16.63 | 0.0008 | - | - | - | 7.42 | 0.0699 | - | - | - |
| 18.30 | - | - | - | - | 8.16 | - | - | - | - |
| 18.85 | 0.0006 | - | - | - | 8.41 | 0.0050 | - | - | - |
| 20.51 | - | - | - | 0.0006 | 9.15 | - | - | - | 0.0036 |
| 22.18 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0006 | 9.89 | 0.0044 | 0.0045 | 0.0041 | 0.0042 |
| 23.84 | - | - | - | - | 10.63 | - | - | - | - |
| 24.95 | - | - | - | 0.0007 | 11.13 | - | - | - | 0.0039 |
| 25.50 | 0.0008 | - | - | - | 11.38 | 0.0047 | - | - | - |
| 26.06 | - | - | - | - | 11.62 | - | - | - | - |
| 27.72 | - | 0.0007 | 0.0009 | 0.0007 | 12.37 | - | 0.0064 | 0.0043 | 0.0042 |
| 28.27 | 0.0009 | - | - | - | 12.61 | 0.0111 | - | - | - |

| | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 29.38 | 0.0011 | - | - | - | 13.11 | 0.0588 | - | - | - |
| 30.49 | 0.0017 | - | - | 0.0007 | 13.60 | 0.2119 | - | - | 0.0041 |
| 31.60 | - | - | - | - | 14.10 | - | - | - | - |
| 33.26 | 0.0025 | 0.0022 | 0.0013 | 0.0007 | 14.84 | 0.4318 | 0.3971 | 0.0046 | 0.0039 |
| 34.93 | - | - | - | - | 15.58 | - | - | - | - |
| 35.48 | 0.0027 | - | - | - | 15.83 | 0.4886 | - | - | - |
| 36.04 | - | - | - | - | 16.08 | - | - | - | - |
| 37.15 | - | - | - | - | 16.57 | - | - | - | - |
| 37.70 | 0.0033 | - | - | - | 16.82 | 0.5331 | - | - | - |
| 38.81 | 0.0035 | 0.0026 | 0.0017 | 0.0010 | 17.31 | 0.5599 | 0.6171 | 0.0049 | 0.0051 |
| 39.92 | 0.0038 | - | - | - | 17.81 | 0.5236 | - | - | - |
| 40.47 | - | - | - | 0.0010 | 18.05 | - | - | - | 0.0041 |
| 41.58 | 0.0015 | - | - | - | 18.55 | 0.0075 | - | - | - |
| 42.14 | - | - | - | 0.0009 | 18.80 | - | - | - | 0.0040 |
| 42.69 | 0.0014 | - | - | - | 19.04 | 0.0101 | - | - | - |
| 44.35 | 0.0016 | 0.0012 | 0.0017 | 0.0012 | 19.78 | 0.0065 | 0.0077 | 0.0052 | 0.0052 |
| 49.90 | - | - | - | - | 22.26 | - | - | - | - |
| 50.45 | 0.0024 | - | - | - | 22.51 | 0.0065 | - | - | - |
| 55.44 | - | 0.0019 | 0.0021 | 0.0019 | 24.73 | - | 0.0077 | 0.0065 | 0.0065 |
| 56.00 | 0.0022 | - | - | - | 24.98 | 0.0075 | - | - | - |
| 60.99 | - | - | - | - | 27.20 | - | - | - | - |
| 66.53 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0031 | 0.0028 | 29.68 | 0.0085 | 0.0096 | 0.0099 | 0.0091 |
| 72.07 | - | - | - | - | 32.15 | - | - | - | - |
| 77.62 | 0.0043 | 0.0040 | 0.0048 | 0.0039 | 34.62 | 0.0135 | 0.0153 | 0.0133 | 0.0128 |
| 83.16 | - | - | - | - | 37.10 | - | - | - | - |
| 88.71 | 0.0055 | 0.0060 | 0.0063 | 0.0057 | 39.57 | 0.0202 | 0.0271 | 0.0196 | 0.0170 |
| 94.25 | 0.0074 | 0.0068 | - | - | 42.04 | 0.0371 | 0.0388 | - | - |
| 94.80 | - | - | - | - | 42.29 | - | - | - | - |
| 97.02 | - | - | - | - | 43.28 | - | - | - | - |
| 97.58 | 0.0078 | - | - | - | 43.53 | 0.0443 | - | - | - |
| 98.13 | - | - | - | - | 43.77 | - | - | - | - |
| 99.79 | 0.0086 | 0.0082 | 0.0081 | 0.0074 | 44.52 | 0.0651 | 0.0859 | 0.0262 | 0.0280 |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 101.46 | - | - | - | - | 45.26 | - | - | - | - |
| 102.57 | 0.0093 | 0.0082 | - | - | 45.75 | 0.1181 | 0.3332 | - | - |
| 103.67 | 0.0093 | - | - | - | 46.25 | 0.1512 | - | - | - |
| 105.34 | 0.0111 | - | - | - | 46.99 | 0.5848 | - | - | - |
| 108.11 | 0.0138 | - | - | - | 48.23 | 0.9066 | - | - | - |
| 110.88 | - | - | 0.0112 | 0.0100 | 49.46 | - | - | 0.0499 | 0.0472 |
| 113.65 | - | - | 0.0117 | 0.0104 | 50.70 | - | - | 0.0469 | 0.0510 |
| 116.43 | - | - | 0.0124 | 0.0120 | 51.94 | - | - | 0.0635 | 0.4592 |
| 119.20 | - | - | 0.0128 | - | 53.17 | - | - | 0.0699 | - |
| 121.97 | - | - | 0.0135 | - | 54.41 | - | - | 0.7530 | - |

ตารางที่ 5.9 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 4%

| Reduced Velocity (U/fvH) | Normalized Heave (Std/B) TMD mass 4%, $\xi_v = 9.84\%$ | | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Pitch Std (deg) TMD mass 4%, $\xi_t = 9.28\%$ | | | |
|-----------------------------|---|---------|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|---------|-----------|
| | No TMD | TMD4%V1 | TMD4%T1 | TMD4%V1T1 | | No TMD | TMD4%V1 | TMD4%T1 | TMD4%V1T1 |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5.54 | 0.0005 | - | - | - | 2.47 | 0.0038 | - | - | - |
| 6.65 | 0.0006 | - | - | 0.0007 | 2.97 | 0.0036 | - | - | 0.0034 |
| 7.21 | - | - | - | - | 3.22 | - | - | - | - |
| 8.32 | 0.0005 | - | - | 0.0006 | 3.71 | 0.0038 | - | - | 0.0034 |
| 9.98 | 0.0005 | - | - | 0.0005 | 4.45 | 0.0239 | - | - | 0.0034 |
| 11.09 | - | 0.0005 | 0.0006 | 0.0005 | 4.95 | - | 0.0039 | 0.0037 | 0.0038 |
| 11.64 | 0.0006 | - | - | - | 5.19 | 0.0044 | - | - | - |
| 12.20 | - | - | - | 0.0005 | 5.44 | - | - | - | 0.0034 |
| 12.75 | 0.0006 | - | - | - | 5.69 | 0.0039 | - | - | - |
| 13.86 | - | - | - | 0.0005 | 6.18 | - | - | - | 0.0034 |
| 14.41 | 0.0006 | - | - | - | 6.43 | 0.0040 | - | - | - |
| 15.52 | 0.0006 | - | - | 0.0005 | 6.92 | 0.0251 | - | - | 0.0034 |
| 16.63 | 0.0008 | - | - | 0.0005 | 7.42 | 0.0699 | - | - | 0.0035 |
| 18.30 | - | - | - | 0.0005 | 8.16 | - | - | - | 0.0035 |
| 18.85 | 0.0006 | - | - | - | 8.41 | 0.0050 | - | - | - |
| 20.51 | - | - | - | 0.0005 | 9.15 | - | - | - | 0.0035 |
| 22.18 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0009 | 0.0006 | 9.89 | 0.0044 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0039 |
| 23.84 | - | - | - | - | 10.63 | - | - | - | - |
| 24.95 | - | - | - | 0.0006 | 11.13 | - | - | - | 0.0034 |
| 25.50 | 0.0008 | - | - | - | 11.38 | 0.0047 | - | - | - |
| 26.06 | - | - | - | - | 11.62 | - | - | - | - |
| 27.72 | - | 0.0007 | 0.0010 | 0.0007 | 12.37 | - | 0.0224 | 0.0040 | 0.0039 |
| 28.27 | 0.0009 | - | - | - | 12.61 | 0.0111 | - | - | - |

| | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 29.38 | 0.0011 | - | - | - | 13.11 | 0.0588 | - | - | - |
| 30.49 | 0.0017 | - | - | 0.0007 | 13.60 | 0.2119 | - | - | 0.0036 |
| 31.60 | - | - | - | - | 14.10 | - | - | - | - |
| 33.26 | 0.0025 | 0.0023 | 0.0015 | 0.0008 | 14.84 | 0.4318 | 0.4516 | 0.0043 | 0.0040 |
| 34.93 | - | - | - | 0.0007 | 15.58 | - | - | - | 0.0038 |
| 35.48 | 0.0027 | - | - | - | 15.83 | 0.4886 | - | - | - |
| 36.04 | - | - | - | - | 16.08 | - | - | - | - |
| 37.15 | - | - | - | 0.0007 | 16.57 | - | - | - | 0.0037 |
| 37.70 | 0.0033 | - | - | - | 16.82 | 0.5331 | - | - | - |
| 38.81 | 0.0035 | 0.0018 | 0.0016 | 0.0008 | 17.31 | 0.5599 | 0.5148 | 0.0045 | 0.0044 |
| 39.92 | 0.0038 | - | - | - | 17.81 | 0.5236 | - | - | - |
| 40.47 | - | - | - | 0.0008 | 18.05 | - | - | - | 0.0039 |
| 41.58 | 0.0015 | - | - | - | 18.55 | 0.0075 | - | - | - |
| 42.14 | - | - | - | - | 18.80 | - | - | - | - |
| 42.69 | 0.0014 | - | - | 0.0010 | 19.04 | 0.0101 | - | - | 0.0042 |
| 44.35 | 0.0016 | 0.0012 | 0.0017 | 0.0011 | 19.78 | 0.0065 | 0.0061 | 0.0050 | 0.0045 |
| 49.90 | - | - | - | - | 22.26 | - | - | - | - |
| 50.45 | 0.0024 | - | - | - | 22.51 | 0.0065 | - | - | - |
| 55.44 | - | 0.0017 | 0.0022 | 0.0015 | 24.73 | - | 0.0070 | 0.0061 | 0.0053 |
| 56.00 | 0.0022 | - | - | - | 24.98 | 0.0075 | - | - | - |
| 60.99 | - | - | - | - | 27.20 | - | - | - | - |
| 66.53 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0030 | 0.0025 | 29.68 | 0.0085 | 0.0106 | 0.0086 | 0.0085 |
| 72.07 | - | - | - | - | 32.15 | - | - | - | - |
| 77.62 | 0.0043 | 0.0036 | 0.0048 | 0.0040 | 34.62 | 0.0135 | 0.0155 | 0.0113 | 0.0103 |
| 83.16 | - | - | - | - | 37.10 | - | - | - | - |
| 88.71 | 0.0055 | 0.0054 | 0.0060 | 0.0052 | 39.57 | 0.0202 | 0.0330 | 0.0146 | 0.0134 |
| 94.25 | 0.0074 | 0.0062 | - | - | 42.04 | 0.0371 | 0.0413 | - | - |
| 94.80 | - | - | - | - | 42.29 | - | - | - | - |
| 97.02 | - | 0.0068 | - | - | 43.28 | - | 0.0604 | - | - |
| 97.58 | 0.0078 | - | - | - | 43.53 | 0.0443 | - | - | - |
| 98.13 | - | - | - | - | 43.77 | - | - | - | - |
| 99.79 | 0.0086 | 0.0075 | 0.0082 | 0.0077 | 44.52 | 0.0651 | 0.2138 | 0.0194 | 0.0176 |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 101.46 | - | - | - | - | 45.26 | - | - | - | - |
| 102.57 | 0.0093 | 0.0083 | - | - | 45.75 | 0.1181 | 0.4295 | - | - |
| 103.67 | 0.0093 | - | - | - | 46.25 | 0.1512 | - | - | - |
| 105.34 | 0.0111 | - | - | - | 46.99 | 0.5848 | - | - | - |
| 108.11 | 0.0138 | - | - | - | 48.23 | 0.9066 | - | - | - |
| 110.88 | - | - | 0.0107 | 0.0094 | 49.46 | - | - | 0.0270 | 0.0240 |
| 113.65 | - | - | - | - | 50.70 | - | - | - | - |
| 116.43 | - | - | - | 0.0102 | 51.94 | - | - | - | 0.0261 |
| 119.20 | - | - | - | 0.0107 | 53.17 | - | - | - | 0.0291 |
| 121.97 | - | - | 0.0137 | 0.0118 | 54.41 | - | - | 0.0330 | 0.0303 |
| 124.74 | - | - | - | 0.0123 | 55.64 | - | - | - | 0.0326 |
| 133.06 | - | - | 0.0158 | 0.0144 | 59.35 | - | - | 0.0396 | 0.0372 |
| 144.15 | - | - | 0.0190 | 0.0164 | 64.30 | - | - | 0.0560 | 0.0559 |
| 155.23 | - | - | 0.0227 | 0.0211 | 69.25 | - | - | 0.0805 | 0.0805 |
| 166.32 | - | - | 0.0271 | 0.0243 | 74.19 | - | - | 0.2066 | 0.1816 |
| 169.10 | - | - | 0.0290 | 0.0274 | 75.43 | - | - | 0.2210 | 0.2244 |
| 171.87 | - | - | 0.0292 | 0.0283 | 76.67 | - | - | 0.2788 | 0.2886 |
| 174.64 | - | - | 0.0330 | 0.0297 | 77.90 | - | - | 0.3279 | 0.3341 |

ตารางที่ 5.10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวการบิดของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
ก่อนและหลังติดตั้ง TMD มวล 1% และแปรผันความหน่วง

| Reduced Velocity (U/fvH) | Normalized Heave (Std/B) TMD mass 1% | | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Pitch Std (deg) TMD mass 1% | | | |
|-----------------------------|---|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | No TMD | $\xi_v = 2.63\%$ | $\xi_v = 5.09\%$ | $\xi_v = 8.47\%$ | | No TMD | $\xi_t = 2.75\%$ | $\xi_t = 4.94\%$ | $\xi_t = 8.66\%$ |
| 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5.54 | 0.0005 | - | - | - | 2.47 | 0.0038 | - | - | - |
| 6.65 | 0.0006 | - | - | 0.0005 | 2.97 | 0.0036 | - | - | 0.0035 |
| 7.21 | - | 0.0005 | 0.0006 | - | 3.22 | - | 0.0037 | 0.0034 | - |
| 8.32 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0005 | 3.71 | 0.0038 | 0.0035 | 0.0034 | 0.0034 |
| 9.98 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 4.45 | 0.0239 | 0.0036 | 0.0035 | 0.0035 |
| 11.09 | - | 0.0005 | 0.0004 | 0.0005 | 4.95 | - | 0.0036 | 0.0036 | 0.0041 |
| 11.64 | 0.0006 | - | - | - | 5.19 | 0.0044 | - | - | - |
| 12.20 | - | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 5.44 | - | 0.0035 | 0.0036 | 0.0034 |
| 12.75 | 0.0006 | - | - | - | 5.69 | 0.0039 | - | - | - |
| 13.86 | - | - | 0.0006 | - | 6.18 | - | - | 0.0035 | - |
| 14.41 | 0.0006 | 0.0006 | - | 0.0006 | 6.43 | 0.0040 | 0.0035 | - | 0.0035 |
| 15.52 | 0.0006 | - | 0.0007 | - | 6.92 | 0.0251 | - | 0.0035 | - |
| 16.63 | 0.0008 | - | - | 0.0006 | 7.42 | 0.0699 | - | - | 0.0036 |
| 18.30 | - | - | - | 0.0005 | 8.16 | - | - | - | 0.0035 |
| 18.85 | 0.0006 | - | 0.0006 | - | 8.41 | 0.0050 | - | 0.0039 | - |
| 20.51 | - | - | 0.0006 | 0.0006 | 9.15 | - | - | 0.0035 | 0.0037 |
| 22.18 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 9.89 | 0.0044 | 0.0040 | 0.0039 | 0.0043 |
| 23.84 | - | - | - | - | 10.63 | - | - | - | - |
| 24.95 | - | 0.0006 | 0.0007 | 0.0006 | 11.13 | - | 0.0037 | 0.0038 | 0.0038 |
| 25.50 | 0.0008 | - | - | - | 11.38 | 0.0047 | - | - | - |
| 26.06 | - | - | - | - | 11.62 | - | - | - | - |
| 27.72 | - | 0.0008 | 0.0007 | 0.0008 | 12.37 | - | 0.0043 | 0.0037 | 0.0045 |
| 28.27 | 0.0009 | - | - | - | 12.61 | 0.0111 | - | - | - |

| | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 29.38 | 0.0011 | - | - | - | 13.11 | 0.0588 | - | - | - |
| 30.49 | 0.0017 | 0.0007 | 0.0010 | 0.0008 | 13.60 | 0.2119 | 0.0038 | 0.0040 | 0.0039 |
| 31.60 | - | 0.0008 | - | - | 14.10 | - | 0.0039 | - | - |
| 33.26 | 0.0025 | 0.0009 | 0.0010 | 0.0010 | 14.84 | 0.4318 | 0.0043 | 0.0042 | 0.0045 |
| 34.93 | - | 0.0008 | 0.0009 | 0.0010 | 15.58 | - | 0.0040 | 0.0041 | 0.0044 |
| 35.48 | 0.0027 | - | - | - | 15.83 | 0.4886 | - | - | - |
| 36.04 | - | - | 0.0011 | - | 16.08 | - | - | 0.0045 | - |
| 37.15 | - | - | 0.0010 | 0.0010 | 16.57 | - | - | 0.0044 | 0.0045 |
| 37.70 | 0.0033 | - | - | - | 16.82 | 0.5331 | - | - | - |
| 38.81 | 0.0035 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0011 | 17.31 | 0.5599 | 0.0042 | 0.0040 | 0.0050 |
| 39.92 | 0.0038 | - | - | - | 17.81 | 0.5236 | - | - | - |
| 40.47 | - | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 | 18.05 | - | 0.0048 | 0.0046 | 0.0050 |
| 41.58 | 0.0015 | - | 0.0013 | - | 18.55 | 0.0075 | - | 0.0043 | - |
| 42.14 | - | - | - | - | 18.80 | - | - | - | - |
| 42.69 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 19.04 | 0.0101 | 0.0050 | 0.0049 | 0.0051 |
| 44.35 | 0.0016 | 0.0013 | 0.0015 | 0.0014 | 19.78 | 0.0065 | 0.0048 | 0.0055 | 0.0055 |
| 49.90 | - | - | - | 0.0017 | 22.26 | - | - | - | 0.0063 |
| 50.45 | 0.0024 | - | - | - | 22.51 | 0.0065 | - | - | - |
| 55.44 | - | 0.0020 | 0.0023 | 0.0020 | 24.73 | - | 0.0065 | 0.0066 | 0.0069 |
| 56.00 | 0.0022 | - | - | - | 24.98 | 0.0075 | - | - | - |
| 60.99 | - | - | - | 0.0024 | 27.20 | - | - | - | 0.0085 |
| 66.53 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0027 | 29.68 | 0.0085 | 0.0076 | 0.0082 | 0.0090 |
| 72.07 | - | - | - | - | 32.15 | - | - | - | - |
| 77.62 | 0.0043 | 0.0041 | 0.0042 | 0.0042 | 34.62 | 0.0135 | 0.0124 | 0.0127 | 0.0129 |
| 83.16 | - | - | - | - | 37.10 | - | - | - | - |
| 88.71 | 0.0055 | 0.0059 | 0.0063 | 0.0062 | 39.57 | 0.0202 | 0.0159 | 0.0178 | 0.0169 |
| 94.25 | 0.0074 | - | - | 0.0071 | 42.04 | 0.0371 | - | - | 0.0219 |
| 94.80 | - | - | - | - | 42.29 | - | - | - | - |
| 97.02 | - | - | - | - | 43.28 | - | - | - | - |
| 97.58 | 0.0078 | - | - | - | 43.53 | 0.0443 | - | - | - |
| 98.13 | - | - | - | - | 43.77 | - | - | - | - |
| 99.79 | 0.0086 | 0.0080 | 0.0086 | 0.0088 | 44.52 | 0.0651 | 0.0253 | 0.0232 | 0.0333 |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 101.46 | - | - | - | - | 45.26 | - | - | - | - |
| 102.57 | 0.0093 | - | - | - | 45.75 | 0.1181 | - | - | - |
| 103.67 | 0.0093 | - | - | - | 46.25 | 0.1512 | - | - | - |
| 105.34 | 0.0111 | - | - | 0.0092 | 46.99 | 0.5848 | - | - | 0.0288 |
| 108.11 | 0.0138 | - | - | - | 48.23 | 0.9066 | - | - | - |
| 110.88 | - | 0.0104 | 0.0106 | 0.0103 | 49.46 | - | 0.0754 | 0.0319 | 0.0352 |
| 113.65 | - | 0.0107 | 0.0107 | - | 50.70 | - | 0.1065 | 0.0356 | - |
| 116.43 | - | 0.0112 | 0.0117 | - | 51.94 | - | 0.3930 | 0.0390 | - |
| 119.20 | - | - | 0.0128 | - | 53.17 | - | - | 0.0475 | - |
| 121.97 | - | - | 0.0133 | 0.0132 | 54.41 | - | - | 0.0540 | 0.0813 |
| 124.74 | - | - | 0.0144 | - | 55.64 | - | - | 0.0465 | - |

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 สะพาน Akashi kaikyo

6.1.1 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ยังไม่ปรับปรุงหน้าตัดสะพานและไม่ติด TMD ที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V1 และในแนวการบิด T1

พบว่า การไม่ยึดด้านข้างสะพานเพื่อลดการกระแทกของสะพานกับขอบช่องเปิดของอุโมงค์ลมขณะที่สะพานเกิดการสูญเสียเสถียรภาพ (Flutter instability) ที่ความเร็วลมวิกฤตนั้น ทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นมากกว่าการยึดด้านข้างสะพานโดยเฉลี่ยขึ้นถึง 45% ดังแสดงในบทที่ 5 ตารางที่ 5.1 ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นจากการบังคับให้ตัวสะพานเคลื่อนตัวในแนวตั้งและการบิดเท่านั้น เมื่อมีลมเข้ามาปะทะทำให้สะพานเสียสมดุลในแนวการบิดได้ง่ายขึ้น

6.1.2 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V1 และในแนวการบิด T1 ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องขนาด 10 cm ตรงกลางสะพานและไม่ติด TMD

พบว่า การเปิดช่องตรงกลางสะพาน ทำให้เพิ่มความสามารถทางด้านอากาศพลศาสตร์ได้ดีขึ้น โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 64.29% ดังแสดงในบทที่ 5 ตารางที่ 5.2

6.1.3 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V1 และในแนวการบิด T1 ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และติดตั้ง TMD มวล 1%

พบว่า การติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 60.67% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 39.65% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 20% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการ

ตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 40.15% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 21.87% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 10% ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.3

ตารางที่ 6.1 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% สำหรับสะพาน Akashi kaikyo ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน (ติดตั้งที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1)

| Reduced Velocity (U/fB) | Efficiency of TMD (Heave) Original section (Locked) | | Reduced Velocity (U/fB) | Efficiency of TMD (Pitch) Original section (Locked) | |
|-------------------------|---|-----------|-------------------------|---|-----------|
| | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 | | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% |
| 1.55 | 81.98% | 69.43% | 0.68 | 46.29% | 31.38% |
| 3.09 | 22.45% | 92.64% | 1.36 | 4.46% | 66.76% |
| 4.64 | 2.21% | 75.82% | 2.04 | 75.61% | 77.10% |
| 6.19 | 19.74% | -92.94% | 2.72 | 44.53% | 21.88% |
| 7.73 | -5.51% | -55.83% | 3.40 | 32.42% | 39.08% |
| 9.28 | 84.98% | 20.81% | 4.08 | -31.36% | -8.79% |
| 10.82 | -0.21% | 46.32% | 4.76 | 5.00% | 38.36% |
| 12.37 | -25.65% | 82.21% | 5.43 | 5.00% | 76.61% |
| 13.14 | -10.66% | -30.56% | 5.77 | 48.61% | 93.69% |
| 13.92 | -49.44% | 90.55% | 6.11 | 82.70% | 96.00% |
| 14.69 | 48.87% | 79.30% | 6.45 | 86.23% | 98.43% |
| 15.46 | 93.69% | 98.11% | 6.79 | 82.32% | 97.50% |
| Average | 21.87% | 39.65% | Average | 40.15% | 60.67% |

6.1.4 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวดิ่ง V3 และในแนวการบิด T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องขนาด 10 cm ตรงกลางสะพาน และติดตั้ง TMD มวล 1%

พบว่าผลการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวดิ่งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 57.34% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 26.26% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 19.23% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 37.44% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 7.55% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 19.23% เช่นกัน และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวดิ่งอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 11.79% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 22.25% โดยทำให้ความเร็วลม

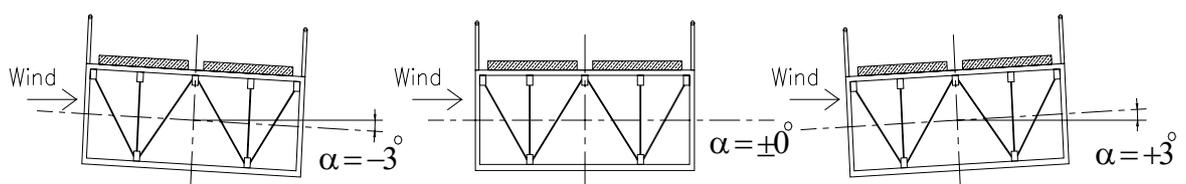
วิกฤตของสะพานลดลงโดยเฉลี่ย 8.33% ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.4

6.1.5 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V3 และในแนวการบิด T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องขนาด 10 cm ตรงกลางสะพาน และติดตั้ง TMD มวล 3%

พบว่าผลการติดตั้ง TMD มวล 3% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 54.37% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 10.83% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 84.62% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 42.11% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 20.39% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 84.62% เช่นกัน และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 3% ควบคุมการสั่นไหวในแนวตั้งอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 13.14% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 12.16% แต่ไม่ทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.5

6.1.6 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V3 และในแนวการบิด T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องขนาด 10 cm ตรงกลางสะพาน และแปรผันมุมปะทะของลม เป็น $\alpha = -3^\circ, \pm 0^\circ$ และ $+3^\circ$ ดังรูปที่ 6.1

พบว่าที่มุมปะทะ $+3^\circ$ ทำให้ความเร็วลมวิกฤตมากที่สุด รองลงมาคือ มุมปะทะ $\pm 0^\circ$ และที่น้อยที่สุดคือ มุมปะทะ -3° โดยที่ความเร็วลมวิกฤตที่มุมปะทะ $+3^\circ$ มากกว่าความเร็วลมวิกฤตที่มุมปะทะ $\pm 0^\circ$ 11.54% และมากกว่าความเร็วลมวิกฤตที่มุมปะทะ -3° 20.83% และความเร็วลมวิกฤตที่มุมปะทะ $\pm 0^\circ$ มากกว่าความเร็วลมวิกฤตที่มุมปะทะ -3° 8.33% ดังแสดงในบทที่ 5 ตารางที่ 5.6



รูปที่ 6.1 มุมปะทะของแรงลมต่อสะพาน Akashi kaikyo

6.1.7 เมื่อติดตั้งแบบจำลองสะพานที่ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้ง V4 และในแนวการบิด T2 ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องขนาด 10 cm ตรงกลางสะพาน เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าเราสามารถเลือกใช้อัตราส่วนความถี่และอัตราส่วนความเร็วลมได้อย่างอิสระ

พบว่าความเร็วลมวิกฤตลดรูป (Reduced velocity) ที่ทำให้เกิด Flutter instability เท่ากับ 22.42 สำหรับแนวตั้ง ซึ่งสามารถหาความเร็วลมวิกฤตได้ดังนี้

$$\begin{aligned}U_m &= 22.42 \times f_{v4} \times B \\ &= 22.42 \times 0.6440 \times 0.71 \\ &= 10.25 \text{ m/s}\end{aligned}$$

เมื่อ U_m คือ ความเร็ววิกฤตของแบบจำลองสะพาน, f_{v4} คือ ความถี่ธรรมชาติแนวตั้งของสะพานจำลอง เท่ากับ 0.6440 Hz และ B คือ ความกว้างของแบบจำลองสะพาน เท่ากับ 0.71 m

การทดสอบเลือกอัตราส่วนความถี่ $\lambda_f = 10$ ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 และใช้อัตราส่วนขนาด, $\lambda_L = 1/50$ เนื่องจากยังใช้แบบจำลองสะพานเดิม ดังนั้นจะได้อัตราส่วนความเร็ว, λ_v ดังนี้

$$\begin{aligned}\lambda_v &= \lambda_f \times \lambda_L \\ \lambda_v &= 10 \times \frac{1}{50} = \frac{U_m}{U_p}\end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถหาความเร็วลมที่เกิดขึ้นกับสะพานจริงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}U_p &= 5U_m \\ U_p &= 5 \times 10.25 \\ &= 51.25 \text{ m/s}\end{aligned}$$

6.1.8 ความเร็วลมที่ทำให้เกิด Flutter instability เมื่อไม่ติด TMD ที่สะพานจริง เท่ากับ 81.32 m/s แต่ไม่พบการเกิด Vortex shedding ดังแสดงในตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.2 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% สำหรับสะพาน Akashi kaikyo หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน
(ติดตั้งที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1)

| Reduced Velocity (U/fvB) | Efficiency of TMD (Heave) Improved section (Unlocked) | | | Reduced Velocity (U/ftB) | Efficiency of TMD (Pitch) Improved section (Unlocked) | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD1%V3 | TMD1%T1 | TMD1%V3T1 | | TMD1%V3 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 0.82 | 83.40% | -15.96% | 66.59% | 0.68 | 43.00% | -46.82% | 48.94% |
| 1.64 | 36.37% | -7.97% | 51.54% | 1.36 | 52.22% | -21.07% | 53.57% |
| 2.47 | 23.43% | 1.39% | 30.58% | 2.04 | 33.64% | -11.51% | 17.70% |
| 3.29 | 12.12% | 0.60% | 19.30% | 2.72 | 11.93% | -11.10% | 7.93% |
| 4.11 | 7.79% | 0.85% | 11.08% | 3.40 | 5.57% | -13.54% | -1.20% |
| 4.93 | 2.61% | -3.02% | 5.83% | 4.08 | -59.53% | -10.06% | -2.40% |
| 5.76 | 1.40% | 0.96% | 3.47% | 4.76 | -1.09% | 93.28% | 93.45% |
| 6.58 | 2.31% | 0.68% | 4.62% | 5.43 | 9.55% | 93.14% | 93.52% |
| 7.40 | -0.66% | -5.18% | -1.26% | 6.11 | 19.25% | 93.63% | 93.85% |
| 8.22 | 5.56% | -4.79% | -1.10% | 6.79 | 11.62% | 93.62% | 93.92% |
| 9.05 | 55.53% | 50.23% | 50.72% | 7.47 | 2.14% | 93.86% | 93.99% |
| 9.87 | 37.11% | 72.74% | 73.74% | 8.15 | 13.23% | 95.80% | 94.85% |
| 10.69 | - | 70.33% | 71.65% | 8.83 | - | 93.85% | 94.18% |
| Average | 22.25% | 7.55% | 26.26% | Average | 11.79% | 37.44% | 57.34% |

ตารางที่ 6.3 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 3% สำหรับสะพาน Akashi kaikyo หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน
(ติดตั้งที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1)

| Reduced Velocity (U/fvB) | Efficiency of TMD (Heave) Improved section (Unlocked) | | | Reduced Velocity (U/ftB) | Efficiency of TMD (Pitch) Improved section (Unlocked) | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD3%V3 | TMD3%T1 | TMD3%V3T1 | | TMD3%V3 | TMD3%T1 | TMD3%V1T1 |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 0.82 | 57.57% | 39.05% | 45.76% | 0.68 | -6.84% | -36.51% | 19.89% |
| 1.64 | 29.75% | 10.76% | 20.45% | 1.36 | 8.26% | -32.34% | 14.96% |
| 2.47 | 9.41% | 12.01% | 8.36% | 2.04 | 1.92% | -9.80% | 2.18% |
| 3.29 | 6.08% | 7.54% | 12.39% | 2.72 | 1.84% | -9.30% | 8.72% |
| 4.11 | 8.70% | 7.47% | 5.10% | 3.40 | 6.24% | -10.73% | 4.16% |
| 4.93 | 4.23% | 0.13% | 1.49% | 4.08 | 6.28% | -10.21% | 5.36% |
| 5.76 | 5.18% | 1.38% | 4.30% | 4.76 | 43.58% | 93.23% | 94.26% |
| 6.58 | 1.17% | 2.07% | 3.66% | 5.43 | 13.18% | 93.18% | 94.18% |
| 7.40 | -3.69% | -5.18% | -29.86% | 6.11 | 21.86% | 93.60% | 93.55% |
| 8.22 | -0.39% | -3.74% | -56.21% | 6.79 | 19.19% | 93.83% | 92.73% |
| 9.05 | -2.94% | 49.99% | 14.77% | 7.47 | 2.61% | 93.92% | 91.65% |
| 9.87 | 20.07% | 72.86% | 56.57% | 8.15 | 24.89% | 94.63% | 93.01% |
| 10.69 | 22.92% | 70.67% | 54.00% | 8.83 | 27.84% | 93.90% | 92.15% |
| Average | 12.16% | 20.39% | 10.83% | Average | 13.14% | 42.11% | 54.37% |

6.2 สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

6.2.1 เมื่อติดตั้ง TMD มวล 1%

พบว่า การติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวดิ่งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 46.99% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 11.41% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 15.38% ซึ่งน้อยกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 55.05% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 26.21% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 12.82% และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวดิ่งอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 8.89% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 8.09% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานลดลงโดยเฉลี่ย 5.41% ดังแสดงในตารางที่ 6.4 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.7

เมื่อเปรียบเทียบกับในแง่ของลดการตอบสนองขณะเกิด Vortex shedding พบว่า การติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวดิ่งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 67.44% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 35.55% ซึ่งน้อยกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 69.16% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 54.93% และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ควบคุมการสั่นไหวในแนวดิ่งอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 25.02% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 21.42% ดังแสดงในตารางที่ 6.8

6.2.2 เมื่อติดตั้ง TMD มวล 2%

พบว่า การติดตั้ง TMD มวล 2% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวดิ่งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 35.49% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 19.35% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 7.69% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 2% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 33.98% และในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 6.49% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 12.82% และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 2% ควบคุมการสั่นไหวในแนวดิ่งอย่างเดียวที่ไม่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้ แต่ลดการตอบสนองในแนวดิ่งได้เฉลี่ย 7.59% โดยทำให้

ความเร็วลมวิกฤตของสะพานลดลงโดยเฉลี่ย 5.41% ดังแสดงในตารางที่ 6.5 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.8

เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของลดการตอบสนองขณะเกิด Vortex shedding พบว่าพบว่าการติดตั้ง TMD มวล 2% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิดสามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 64.18% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 43.69% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 2% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 56.00% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 19.21% และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 2% ควบคุมการสั่นไหวในแนวตั้งอย่างเดียวที่ไม่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้ แต่ลดการตอบสนองในแนวตั้งได้เฉลี่ย 12.25% ดังแสดงในตารางที่ 6.9

6.2.3 เมื่อติดตั้ง TMD มวล 4%

พบว่าการติดตั้ง TMD มวล 4% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 54.18% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 22.79% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 61.54% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 4% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 42.96% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 3.86% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 61.54% เช่นกันและมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 4% ควบคุมการสั่นไหวในแนวตั้งอย่างเดียวที่ไม่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้ แต่ลดการตอบสนองในแนวตั้งได้เฉลี่ย 14.83% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานลดลงโดยเฉลี่ย 5.13% ดังแสดงในตารางที่ 6.6 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.9

เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของลดการตอบสนองขณะเกิด Vortex shedding พบว่าพบว่าการติดตั้ง TMD มวล 4% ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิดสามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 66.37% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 45.81% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 4% ควบคุมการสั่นไหวในแนวการบิดอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 57.61% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 11.98% และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 4% ควบคุมการสั่นไหวในแนวตั้งอย่างเดียวที่ลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 4.56% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 21.98% ดังแสดงในตารางที่ 6.10

6.2.4 เมื่อติดตั้ง TMD มวล 1% และแปรผันความหน่วง 3 ค่า คือ มากกว่าความหน่วงที่เหมาะสม ($\xi_v = 8.47\%$, $\xi_t = 8.66\%$) และน้อยกว่าความหน่วงที่เหมาะสม ($\xi_v = 2.63\%$, $\xi_t = 2.75\%$) เท่ากับความหน่วงที่เหมาะสม ($\xi_v = 5.09\%$, $\xi_t = 4.94\%$)

พบว่าเมื่อติดตั้ง TMD มวล 1% ที่ความหน่วงที่เหมาะสม (Optimum damping; ξ_{opt}) ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 46.99% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 11.41% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 15.38% ซึ่งมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ที่ความหน่วงน้อยกว่าความหน่วงที่เหมาะสม ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด ที่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 45.26% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 17.87% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 7.69% และมากกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ที่ความหน่วงมากกว่าความหน่วงที่เหมาะสม ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด ที่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 45.32% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 17.18% โดยทำให้ความเร็วลมวิกฤตของสะพานเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 12.82% ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และในบทที่ 5 ตารางที่ 5.10

เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของลดการตอบสนองขณะเกิด Vortex shedding พบว่าเมื่อติดตั้ง TMD มวล 1% ที่ความหน่วงที่เหมาะสม (Optimum damping; ξ_{opt}) ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 59.56% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 31.19% ซึ่งน้อยกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ที่ความหน่วงน้อยกว่าความหน่วงที่เหมาะสม ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด ที่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 63.56% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 36.86% เล็กน้อย และน้อยกว่าการติดตั้ง TMD มวล 1% ที่ความหน่วงมากกว่าความหน่วงที่เหมาะสม ควบคุมการสั่นไหวทั้งแนวตั้งและแนวการบิด ที่สามารถลดการตอบสนองในการบิดได้เฉลี่ย 60.69% และในแนวตั้งได้เฉลี่ย 34.60% เล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 6.11

6.2.5 ความเร็วลมที่ทำให้เกิด Vortex shedding เมื่อไม่ติด TMD ที่สะพานจริง เท่ากับ 39.54 m/s และความเร็วลมที่ทำให้เกิด Flutter instability เท่ากับ 132.53 m/s ดังแสดงในตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.4 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 1%, $\xi_v = 5.09\%$ | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 1%, $\xi_t = 4.94\%$ | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD1%V1 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 | | TMD1%V1 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 8.32 | -2.69% | - | -5.28% | 3.71 | -4.96% | - | 10.20% |
| 9.98 | -18.59% | - | -16.12% | 4.45 | 84.30% | - | 85.52% |
| 14.41 | 13.81% | - | - | 6.43 | 4.74% | - | - |
| 15.52 | - | - | -6.41% | 6.92 | - | - | 85.95% |
| 16.63 | 18.83% | - | - | 7.42 | 47.24% | - | - |
| 18.85 | - | - | -9.21% | 8.41 | - | - | 20.86% |
| 22.18 | 1.69% | 31.68% | 5.01% | 9.89 | 0.49% | 19.91% | 12.29% |
| 29.38 | 29.40% | - | - | 13.11 | 87.94% | - | - |
| 30.49 | - | 63.00% | 43.32% | 13.60 | - | 98.24% | 98.09% |
| 33.26 | 36.83% | 71.56% | 61.32% | 14.84 | 13.04% | 99.14% | 99.03% |
| 38.81 | 9.98% | 76.26% | 70.98% | 17.31 | -4.22% | 99.24% | 99.29% |
| 41.58 | - | 28.28% | 16.32% | 18.55 | - | 30.28% | 42.52% |
| 42.69 | - | - | 16.93% | 19.04 | - | - | 51.65% |
| 44.35 | 9.47% | 35.57% | 4.43% | 19.78 | 3.32% | 18.91% | 14.09% |
| 66.53 | 1.65% | 28.68% | 0.63% | 29.68 | -3.90% | 8.85% | 3.80% |
| 77.62 | 10.59% | -11.30% | 2.91% | 34.62 | 9.62% | 0.78% | 5.36% |
| 88.71 | -10.60% | -13.94% | -13.25% | 39.57 | 0.09% | 16.59% | 11.82% |
| 94.25 | - | 1.36% | - | 42.04 | - | 46.14% | - |
| 99.79 | 15.19% | 1.85% | -0.37% | 44.52 | -14.16% | 61.77% | 64.39% |
| 102.57 | -2.32% | 6.13% | - | 45.75 | -99.03% | 78.43% | - |
| 105.34 | - | 17.79% | - | 46.99 | - | 95.61% | - |
| 108.11 | - | 30.04% | - | 48.23 | - | 96.76% | - |
| Average | 8.09% | 26.21% | 11.41% | Average | 8.89% | 55.05% | 46.99% |

ตารางที่ 6.5 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 2% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 2%, $\xi_v = 7.16\%$ | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 2%, $\xi_t = 6.92\%$ | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD2%V1 | TMD2%T1 | TMD2%V1T1 | | TMD2%V1 | TMD2%T1 | TMD2%V1T1 |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 6.65 | - | - | 25.21% | 2.97 | - | - | -30.57% |
| 8.32 | - | - | -1.29% | 3.71 | - | - | 6.03% |
| 9.98 | - | - | -23.63% | 4.45 | - | - | 84.87% |
| 12.75 | - | - | -2.53% | 5.69 | - | - | 8.60% |
| 14.41 | - | - | 29.98% | 6.43 | - | - | -14.89% |
| 15.52 | - | - | 19.43% | 6.92 | - | - | 86.02% |
| 22.18 | -9.17% | -17.61% | -3.62% | 9.89 | -2.96% | 7.14% | 5.35% |
| 30.49 | - | - | 56.12% | 13.60 | - | - | 98.08% |
| 33.26 | 9.24% | 47.02% | 70.38% | 14.84 | 8.02% | 98.94% | 99.09% |
| 38.81 | 27.12% | 52.63% | 72.30% | 17.31 | -10.23% | 99.13% | 99.09% |
| 44.35 | 21.80% | -5.20% | 23.26% | 19.78 | -19.53% | 18.78% | 19.32% |
| 66.53 | 1.01% | -4.82% | 4.21% | 29.68 | -12.96% | -16.12% | -7.01% |
| 77.62 | 9.02% | -11.02% | 9.47% | 34.62 | -13.75% | 1.52% | 5.30% |
| 88.71 | -7.94% | -14.48% | -2.58% | 39.57 | -34.39% | 2.79% | 16.00% |
| 94.25 | 8.56% | - | - | 42.04 | -4.62% | - | - |
| 99.79 | 4.44% | 5.41% | 13.54% | 44.52 | -32.00% | 59.68% | 57.01% |
| 102.57 | 11.82% | - | - | 45.75 | -182.20% | - | - |
| Average | 7.59% | 6.49% | 19.35% | Average | -30.46% | 33.98% | 35.49% |

ตารางที่ 6.6 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 4% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 4%, $\xi_v = 9.84\%$ | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 4%, $\xi_t = 9.28\%$ | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD4%V1 | TMD4%T1 | TMD4%V1T1 | | TMD4%V1 | TMD4%T1 | TMD4%V1T1 |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 6.65 | - | - | -13.38% | 2.97 | - | - | 5.49% |
| 8.32 | - | - | -18.32% | 3.71 | - | - | 11.47% |
| 9.98 | - | - | -3.73% | 4.45 | - | - | 85.84% |
| 15.52 | - | - | 22.92% | 6.92 | - | - | 86.38% |
| 16.63 | - | - | 42.37% | 7.42 | - | - | 94.96% |
| 22.18 | 8.35% | -37.79% | 7.66% | 9.89 | 10.01% | 9.57% | 12.08% |
| 30.49 | - | - | 61.10% | 13.60 | - | - | 98.30% |
| 33.26 | 6.24% | 39.67% | 69.40% | 14.84 | -4.60% | 99.00% | 99.08% |
| 38.81 | 47.88% | 56.25% | 76.20% | 17.31 | 8.04% | 99.19% | 99.21% |
| 42.69 | - | - | 30.93% | 19.04 | - | - | 58.82% |
| 44.35 | 25.45% | -10.21% | 29.56% | 19.78 | 4.81% | 22.66% | 30.76% |
| 66.53 | 2.50% | -3.29% | 13.28% | 29.68 | -24.38% | -0.32% | 0.02% |
| 77.62 | 17.60% | -10.58% | 8.01% | 34.62 | -15.40% | 15.83% | 23.73% |
| 88.71 | 1.48% | -7.96% | 5.61% | 39.57 | -63.73% | 27.53% | 33.59% |
| 94.25 | 16.41% | - | - | 42.04 | -11.22% | - | - |
| 99.79 | 12.22% | 4.82% | 10.27% | 44.52 | -228.40% | 70.22% | 72.99% |
| 102.57 | 10.18% | - | - | 45.75 | -263.77% | - | - |
| Average | 14.83% | 3.86% | 22.79% | Average | -58.86% | 42.96% | 54.18% |

ตารางที่ 6.7 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% แปรผันความหน่วง สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 1% | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 1% | | |
|-----------------------------|--|------------------|------------------|-----------------------------|--|------------------|------------------|
| | $\xi_v = 2.63\%$ | $\xi_v = 5.09\%$ | $\xi_v = 8.47\%$ | | $\xi_i = 2.75\%$ | $\xi_i = 4.94\%$ | $\xi_i = 8.66\%$ |
| 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 6.65 | - | - | 22.03% | 2.97 | - | - | 3.88% |
| 8.32 | 9.040% | -5.281% | 7.903% | 3.71 | 7.38% | 10.20% | 9.66% |
| 9.98 | -12.636% | -16.121% | -5.198% | 4.45 | 85.08% | 85.52% | 85.51% |
| 14.41 | 9.80% | - | 10.93% | 6.43 | 13.32% | - | 12.90% |
| 15.52 | - | -6.41% | - | 6.92 | - | 85.95% | - |
| 16.63 | - | - | 32.11% | 7.42 | - | - | 94.90% |
| 18.85 | - | -9.21% | - | 8.41 | - | 20.86% | - |
| 22.18 | -3.56% | 5.01% | 1.98% | 9.89 | 9.04% | 12.29% | 3.37% |
| 30.49 | 59.98% | 43.32% | 52.85% | 13.60 | 98.19% | 98.09% | 98.17% |
| 33.26 | 64.59% | 61.32% | 59.75% | 14.84 | 99.00% | 99.03% | 98.95% |
| 38.81 | 67.95% | 70.98% | 68.90% | 17.31 | 99.25% | 99.29% | 99.10% |
| 41.58 | - | 16.32% | - | 18.55 | - | 42.52% | - |
| 42.69 | 15.04% | 16.93% | 13.05% | 19.04 | 50.78% | 51.65% | 49.35% |
| 44.35 | 17.13% | 4.43% | 11.07% | 19.78 | 25.11% | 14.09% | 15.21% |
| 66.53 | -0.04% | 0.63% | 6.21% | 29.68 | 10.75% | 3.80% | -5.93% |
| 77.62 | 4.91% | 2.91% | 3.92% | 34.62 | 8.13% | 5.36% | 4.25% |
| 88.71 | -6.77% | -13.25% | -11.47% | 39.57 | 21.15% | 11.82% | 16.15% |
| 94.25 | - | - | 4.41% | 42.04 | - | - | 41.06% |
| 99.79 | 6.82% | -0.37% | -2.99% | 44.52 | 61.21% | 64.39% | 48.90% |
| 105.34 | - | - | 16.61% | 46.99 | - | - | 95.07% |
| Average | 17.87% | 11.41% | 17.18% | Average | 45.26% | 46.99% | 45.32% |

ตารางที่ 6.8 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 1%, $\xi_v = 5.09\%$ | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 1%, $\xi_t = 4.94\%$ | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD1%V1 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 | | TMD1%V1 | TMD1%T1 | TMD1%V1T1 |
| 29.38 | 29.40% | - | - | 13.11 | 87.94% | - | - |
| 30.49 | - | 63.00% | 43.32% | 13.60 | - | 98.24% | 98.09% |
| 33.26 | 36.83% | 71.56% | 61.32% | 14.84 | 13.04% | 99.14% | 99.03% |
| 38.81 | 9.98% | 76.26% | 70.98% | 17.31 | -4.22% | 99.24% | 99.29% |
| 41.58 | - | 28.28% | 16.32% | 18.55 | - | 30.28% | 42.52% |
| 42.69 | - | - | 16.93% | 19.04 | - | - | 51.65% |
| 44.35 | 9.47% | 35.57% | 4.43% | 19.78 | 3.32% | 18.91% | 14.09% |
| Average | 21.42% | 54.93% | 35.55% | Average | 25.02% | 69.16% | 67.44% |

ตารางที่ 6.9 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 2% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 2%, $\xi_v = 7.16\%$ | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 2%, $\xi_t = 6.92\%$ | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD2%V1 | TMD2%T1 | TMD2%V1T1 | | TMD2%V1 | TMD2%T1 | TMD2%V1T1 |
| 22.18 | -9.17% | -17.61% | -3.62% | 9.89 | -2.96% | 7.14% | 5.35% |
| 30.49 | - | - | 56.12% | 13.60 | - | - | 98.08% |
| 33.26 | 9.24% | 47.02% | 70.38% | 14.84 | 8.02% | 98.94% | 99.09% |
| 38.81 | 27.12% | 52.63% | 72.30% | 17.31 | -10.23% | 99.13% | 99.09% |
| 44.35 | 21.80% | -5.20% | 23.26% | 19.78 | -19.53% | 18.78% | 19.32% |
| Average | 12.25% | 19.21% | 43.69% | Average | -6.18% | 56.00% | 64.18% |

ตารางที่ 6.10 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 4% ด้วยความหน่วงที่เหมาะสม สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 4%, $\xi_v = 9.84\%$ | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 4%, $\xi_t = 9.28\%$ | | |
|-----------------------------|--|---------|-----------|-----------------------------|--|---------|-----------|
| | TMD4%V1 | TMD4%T1 | TMD4%V1T1 | | TMD4%V1 | TMD4%T1 | TMD4%V1T1 |
| 22.18 | 8.35% | -37.79% | 7.66% | 9.89 | 10.01% | 9.57% | 12.08% |
| 30.49 | - | - | 61.10% | 13.60 | - | - | 98.30% |
| 33.26 | 6.24% | 39.67% | 69.40% | 14.84 | -4.60% | 99.00% | 99.08% |
| 38.81 | 47.88% | 56.25% | 76.20% | 17.31 | 8.04% | 99.19% | 99.21% |
| 42.69 | - | - | 30.93% | 19.04 | - | - | 58.82% |
| 44.35 | 25.45% | -10.21% | 29.56% | 19.78 | 4.81% | 22.66% | 30.76% |
| Average | 21.98% | 11.98% | 45.81% | Average | 4.56% | 57.61% | 66.37% |

ตารางที่ 6.11 ประสิทธิภาพของ TMD มวล 1% แปรผันความหน่วง สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม
เมื่อพิจารณาเฉพาะขณะเกิด Vortex shedding

| Reduced Velocity (U/fvH) | Efficiency of TMD (Heave) TMD mass 1% | | | Reduced Velocity (U/ftH) | Efficiency of TMD (Pitch) TMD mass 1% | | |
|-----------------------------|--|------------------|------------------|-----------------------------|--|------------------|------------------|
| | $\xi_v = 2.63\%$ | $\xi_v = 5.09\%$ | $\xi_v = 8.47\%$ | | $\xi_t = 2.75\%$ | $\xi_t = 4.94\%$ | $\xi_t = 8.66\%$ |
| 22.18 | -3.56% | 5.01% | 1.98% | 9.89 | 9.04% | 12.29% | 3.37% |
| 30.49 | 59.98% | 43.32% | 52.85% | 13.60 | 98.19% | 98.09% | 98.17% |
| 33.26 | 64.59% | 61.32% | 59.75% | 14.84 | 99.00% | 99.03% | 98.95% |
| 38.81 | 67.95% | 70.98% | 68.90% | 17.31 | 99.25% | 99.29% | 99.10% |
| 41.58 | - | 16.32% | - | 18.55 | - | 42.52% | - |
| 42.69 | 15.04% | 16.93% | 13.05% | 19.04 | 50.78% | 51.65% | 49.35% |
| 44.35 | 17.13% | 4.43% | 11.07% | 19.78 | 25.11% | 14.09% | 15.21% |
| Average | 36.86% | 31.19% | 34.60% | Average | 63.56% | 59.56% | 60.69% |

ตารางที่ 6.12 ความเร็วลมที่ทำให้เกิด vortex shedding และ flutter instability
กับแบบจำลองสะพาน Akashi kaiyo จริงและสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมจริง

| Type of Testing | Model | | Prototype | |
|--|--|------------------------|---------------------|------------------------|
| | Reduced Velocity (U/fvB) or (U/fvH) | | Wind Velocity (m/s) | |
| | Vortex shedding | Flutter instability | Vortex shedding | Flutter instability |
| สะพาน Akashi kaiyo; $f_{v1} = 0.0644$ Hz, $f_{v3} = 0.1211$ Hz, $B = 35.5$ m | | | | |
| V1-T1 without TMD, Improved | Not found | 35.57 | NA. | 81.32 |
| V1-T1 with TMD 1%, Original | Not found | 18.56 | NA. | 42.43 |
| V3-T1 with TMD 1%, Improved | Not found | 12.75 | NA. | 54.81 |
| V3-T1 with TMD 3%, Improved | Not found | 19.74 | NA. | 84.86 |
| สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม; $f_{v1} = 0.3760$ Hz, $H = 3.26$ m | | | | |
| Without TMD | 39.92 | 108.11 | 48.93 | 132.52 |
| With TMD 1% | Not found | 124.74 | NA. | 152.90 |
| With TMD 2% | Not found | 116.43 | NA. | 142.72 |
| With TMD 4% | Not found | 174.74 | NA. | 214.19 |

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ได้ประโยชน์หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นความรู้จากการศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของโครงสร้างเมื่อรับแรงลม การย่อส่วนโครงสร้างเพื่อทดสอบในอุโมงค์ลม การใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบในอุโมงค์ และการควบคุมการสั่นไหวของสะพานโดยออกแบบติดตั้งตัวควบคุมการสั่นไหวแบบมวลหมุน่วง (TMD) โดยเฉพาะการได้เห็นการตอบสนองของสะพานภายใต้แรงลมทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง TMD ตลอดจนลักษณะการเกิด vortex shedding และการวิบัติของสะพานเมื่อเกิด flutter instability แม้ว่าตัวอย่างของสะพาน Akashi ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาจะเป็นสะพานแขวนที่ดำเนินการก่อสร้างเสร็จไปแล้วที่ประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างเป็นลักษณะโครงถัก ซึ่งในประเทศไทยยังมิได้มีการมีโครงสร้างสะพานแขวนที่มีช่วงยาวและเป็นโครงถักลักษณะนี้ งานวิจัยจึงน่าจะมีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างสะพานแขวนที่เป็นโครงถักซึ่งมีข้อดี คือ มีน้ำหนักเบา และมีเสถียรภาพต่อแรงลมในระดับที่ดี ที่อาจจะมีการก่อสร้างขึ้นในประเทศไทยในอนาคต และเกิดขึ้นจากการดำเนินทดสอบ ออกแบบ และก่อสร้างโดยวิศวกรไทย

ในการวิจัยมุ่งเน้นในการศึกษาหาความเร็วลมวิกฤติที่ทำให้สะพานเกิดการวิบัติจากการเกิด flutter instability และความเร็วลมที่ทำให้เกิดการสั่นไหวจากการเกิด vortex shedding และเปรียบเทียบการสั่นไหวจากการติดตั้งและไม่ติดตั้ง TMD ที่แบบจำลองสะพาน และการติดตั้ง TMD ในรูปแบบต่างๆ ตลอดจนการปรับหน้าตัดสะพานของสะพาน Akashi kaikyo ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- 1) การติดตั้ง TMD อัตรามวล 1% ถึง 4% มีประสิทธิภาพในการลดการตอบสนองในระดับที่ดี โดยที่ การติดตั้ง TMD อัตรามวล 1% พร้อมกันทั้งแนวตั้งและแนวการบิดสามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งได้ 11-39% และในแนวการบิดได้ 46-67% และสามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งขณะเกิด Vortex shedding ได้ 35% และในแนวการบิดได้ 67% และสามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤติที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพแบบ Flutter ได้ 15-20% การติดตั้ง TMD อัตรามวล 2% พร้อมกันทั้งแนวตั้งและแนวการบิดสามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งได้ 19% และในแนวการบิดได้ 35% และสามารถลด

การสั่นไหวในแนวตั้งขณะเกิด Vortex shedding ได้ 43% และในแนวการบิดได้ 6% และสามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤตได้ 7% การติดตั้ง TMD อัตรามวล 3% พร้อมกันทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งได้ 10% และในแนวการบิดได้ 54% และสามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤตได้ 84% การติดตั้ง TMD อัตรามวล 4% พร้อมกันทั้งแนวตั้งและแนวการบิด สามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งได้ 22% และในแนวการบิดได้ 54% และสามารถลดการสั่นไหวในแนวตั้งขณะเกิด Vortex shedding ได้ 45% และในแนวการบิดได้ 66% และสามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤตได้ 64% และเมื่อแปรผันความหน่วง TMD พบว่า ที่ความหน่วงที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤตได้ 15% ในขณะที่ความหน่วงน้อยกว่าความหน่วงที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤตได้ 7% และที่ความหน่วงมากกว่าความหน่วงที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความเร็วลมวิกฤตได้ 12% และทั้ง 3 แบบสามารถลดการสั่นไหวได้ใกล้เคียงกัน

- 2) การปรับปรุงหน้าตัดสะพานโดยการเปิดช่องให้ลมผ่านได้ดีขึ้น ทำให้ลดการตอบสนองทางด้านอากาศพลศาสตร์ดีขึ้น
- 3) การเลือกอัตราส่วนความเร็วลม (λ_v) และอัตราส่วนความถี่ (λ_f) สามารถเลือกได้อิสระไม่จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนตามอัตราส่วนขนาด (λ_L) แต่สามารถเลือกอัตราส่วนความเร็วลมได้ตามขีดจำกัดความเร็วลมของอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบ TMD เป็นลักษณะเชิงเดี่ยว ซึ่งออกแบบเพื่อลดการตอบสนองสะพานที่ความถี่สะพานเพียงค่าเดียว ไม่ครอบคลุมความถี่ที่เกิดขึ้นจริงซึ่งมีหลายค่า การวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยนี้จึงน่าจะเป็นการออกแบบติดตั้ง TMD แบบชุด (Multi Tuned Mass Dampers; MTMD) ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่เกิดขึ้นจริงหลายๆค่า และน่าจะให้ผลในการลดการสั่นไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

ภาคผนวก

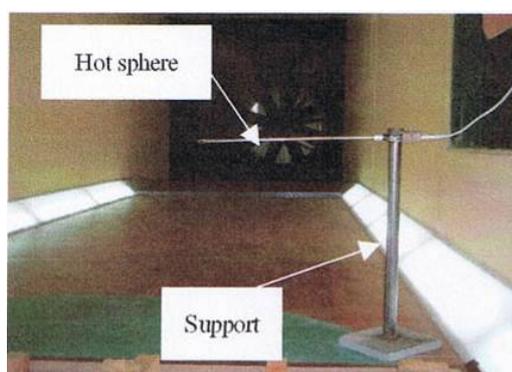
ผนวก ก

การปรับแก้ความเร็วลมเครื่องมือวัดความเร็วลม

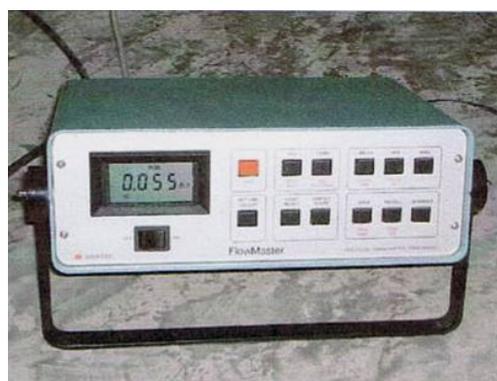
เนื่องจากอุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถกำหนดความเร็วของลมได้โดยตรงแต่จะแสดงความเร็วในรูปของกำลังของใบพัด เป็นรอบต่อนาที (RPM) ดังนั้นเราจึงต้องทำการแปลงค่ากำลังของใบพัดจากรอบต่อนาที มาเป็นความเร็วในหน่วยเมตรต่อวินาที

เพื่อให้ได้ค่าความเร็วที่น่าเชื่อถือ เครื่องมือที่ใช้ในการหาความเร็วจึงมีหลายชนิดได้แก่

1) Flow Master ของ DANTEC ใช้หลักการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงการไหลของมวล (Mass flux) ซึ่งเมื่อหารด้วยความหนาแน่นจะได้ความเร็ว โดยแสดงค่าเป็นความเร็วเฉลี่ยเมตรต่อวินาที ที่สภาวะปกติ (20°C , 101.3 kPa , $50\% \text{ rH}$) สามารถแสดงค่าความเร็วได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 30 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ -15 ถึง 85°C แสดงดังรูปที่ ก.1



(ก) Hot sphere



(ข) Accelerometer

รูปที่ ก.1 Flow Master ของ DANTEC

2) Wind Monitor model 05103V ของ YOUNG เป็นเครื่องมือวัดค่าความเร็วและทิศทางในแนวราบโดยการหมุนของใบพัดทำให้เกิดสัญญาณคลื่น sine AC ด้วยความถี่ที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วลม ต่อจากนั้นวงจรภายในจะเปลี่ยนสัญญาณดิบให้แสดงออกมาเป็น Volt แล้วนำมาคูณสัมประสิทธิ์เพื่อเปลี่ยนเป็นความเร็วลม เมตรต่อวินาที สามารถวัดความเร็วลมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 60 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ ก.2



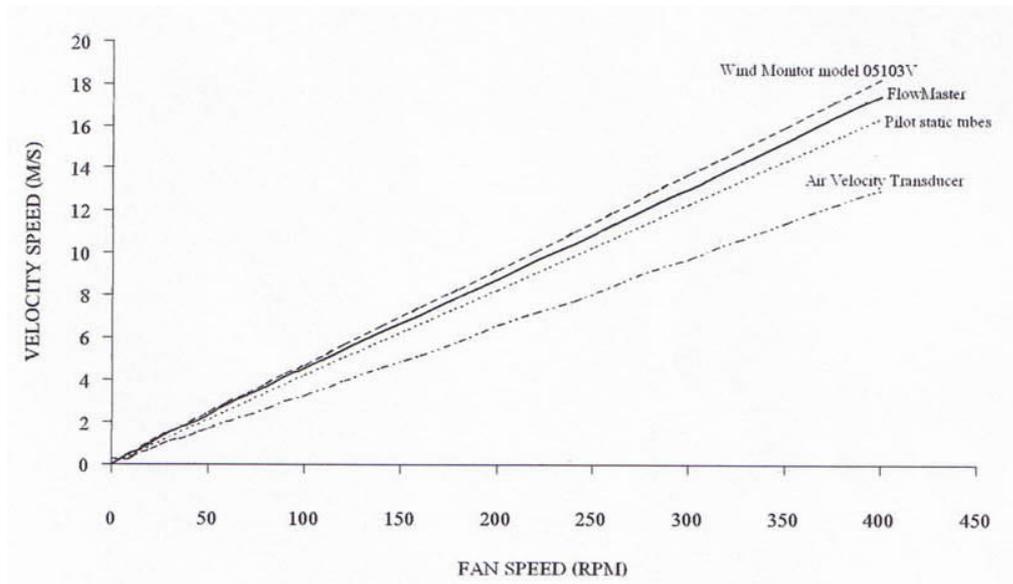
รูปที่ ก.2 Wind Monitor model 05103V ของ YOUNG

3) Air Velocity Transducer ของ TSI ใช้หลักการในการวัดคล้ายกับ Flow Master ซึ่งจะแสดงค่าเป็นความเร็วเฉลี่ย เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 Air Velocity Transducer ของ TSI

4) Pilot Static Tubes เป็นการวัดค่าความดันของแรงลมที่มากกระทำ ซึ่งทำการวัดโดยบริษัท ที่ทำการสร้างอุโมงค์ลม มี Probe จำนวน 2 ชุด วัดที่ Turntable ทั้ง 2 ตัว แต่ละ Turntable วัดภายในหน้าตัดเดียวกัน 3 ตำแหน่ง แล้วแปลงค่าความดันมาเป็นความเร็วลม ตามสมการของแบนูลี (Bernoulli's Equation)

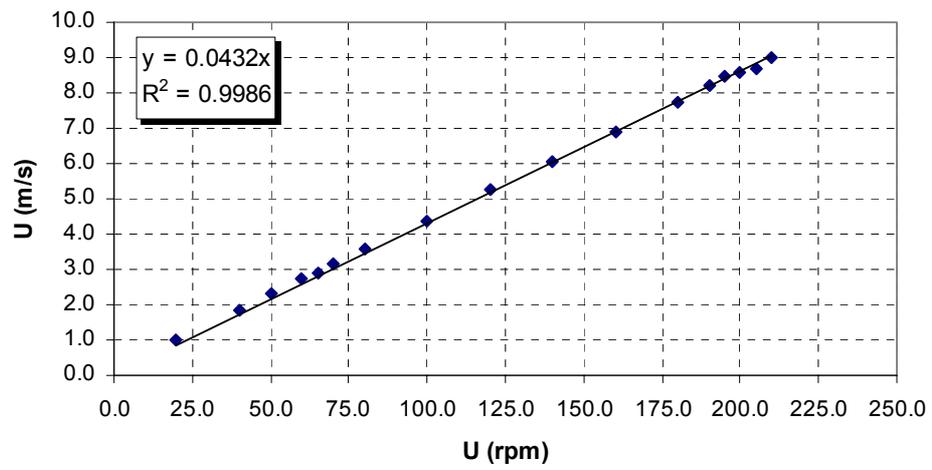


รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม กับรอบของพัดลมที่ Turn Table # 2

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมที่วัดได้จากเครื่องมือต่างๆ แสดงในรูปที่ ก.4 โดยทำการวัดที่กลางอุโมงค์ลม สูงจากพื้นอุโมงค์ลม 0.70 เมตร ที่อุณหภูมิ 33°C จะเห็นว่าเครื่องมือวัดความเร็วลม Flow Master ของ DANTEC ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการใช้ Pilot Static Tubes ดังนั้นจึงเลือกใช้ Flow Master ของ DANTEC ในการปรับแก้ค่าความเร็วลมกับ Hot Sphere Anemometer

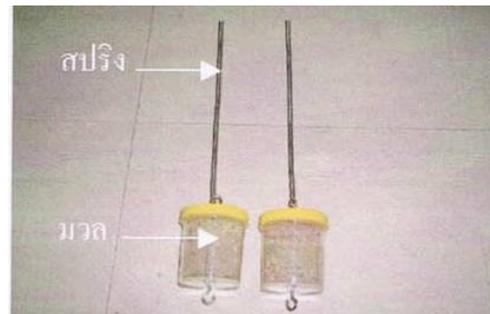
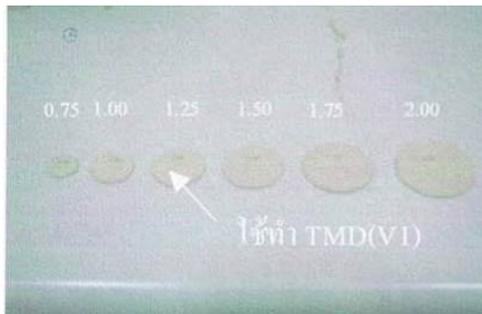
เมื่อได้เครื่องมือที่น่าเชื่อถือแล้วคือ Flow Master ของ DANTEC จึงนำมาปรับแก้ค่าความเร็วกับเครื่องมือวัดความเร็วลมที่ใช้ในการวิจัยที่เรียกว่า Hot Sphere Anemometer แสดงดังในรูปที่ ก.5 โดยมีหลักการทำงานในการรับความร้อนจากกระแสลมที่เข้ามา แล้วทำการเปลี่ยนค่าความร้อนไปเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะเป็น Nonlinear Function กับความเร็วลม ข้อดีของเครื่องมือนี้ก็คือ สามารถบันทึกค่าความปั่นป่วนของความเร็วลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การหาความเร็วที่กระทำของสะพานสามารถหาได้โดยตรงจาก Flow Master และ Hot Sphere Anemometer ที่ติดตั้งที่ตำแหน่ง Turn Table # 2 ปลายอุโมงค์ลมโดยวัดที่ความสูงระดับสะพาน นอกจากนี้ยังสามารถหาได้จากการแปลงค่าความเร็วรอบของพัดลมโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของพัดลม (rpm) และความเร็วลมที่กระทำกับสะพาน (m/s) ดังแสดงในรูปที่ ก.5

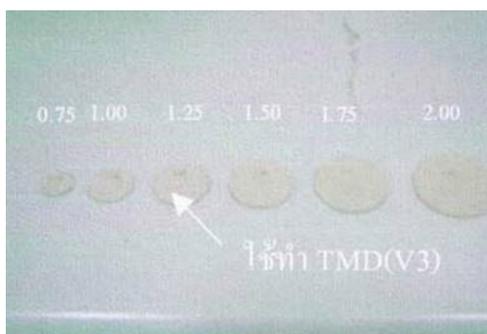


รูปที่ ก.5 การปรับแก้ค่าความเร็วระหว่าง Flow Master กับ Hot Sphere Anemometer

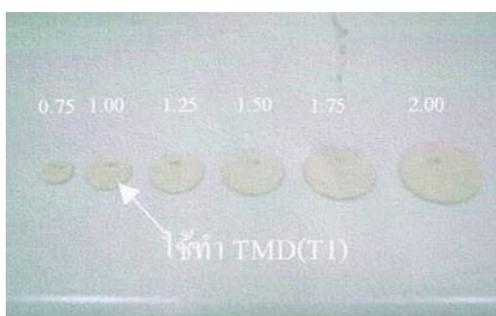
ผนวก ข

TMD ของสะพาน Akashi kaikyo และสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมTMD มวล 1% ของสะพาน Akashi kaikyo

รูปที่ ข.1 TMD มวล1% สำหรับความถี่ธรรมชาติ V1 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo



รูปที่ ข.2 TMD มวล1% สำหรับความถี่ธรรมชาติ V3 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo



รูปที่ ข.3 TMD มวล1% สำหรับความถี่ธรรมชาติ T1 สำหรับสะพาน Akashi kaikyo

TMD มวล 1%, 2% และ 4% ของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม



รูปที่ ข.4 TMD มวล 1% สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม



รูปที่ ข.5 TMD มวล 2% สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

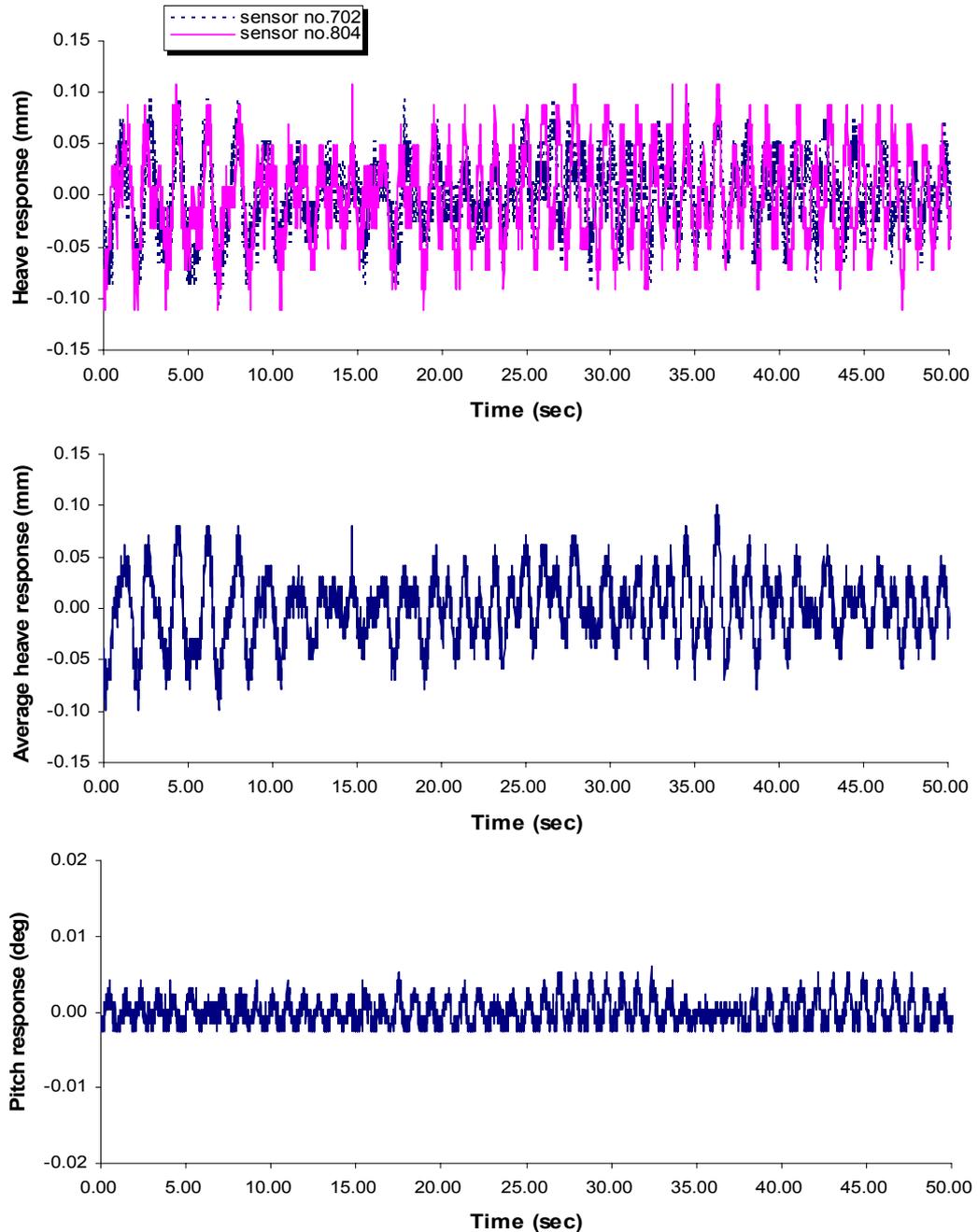


รูปที่ ข.6 TMD มวล 4% สำหรับสะพานวงแหวนอุตสาหกรรม

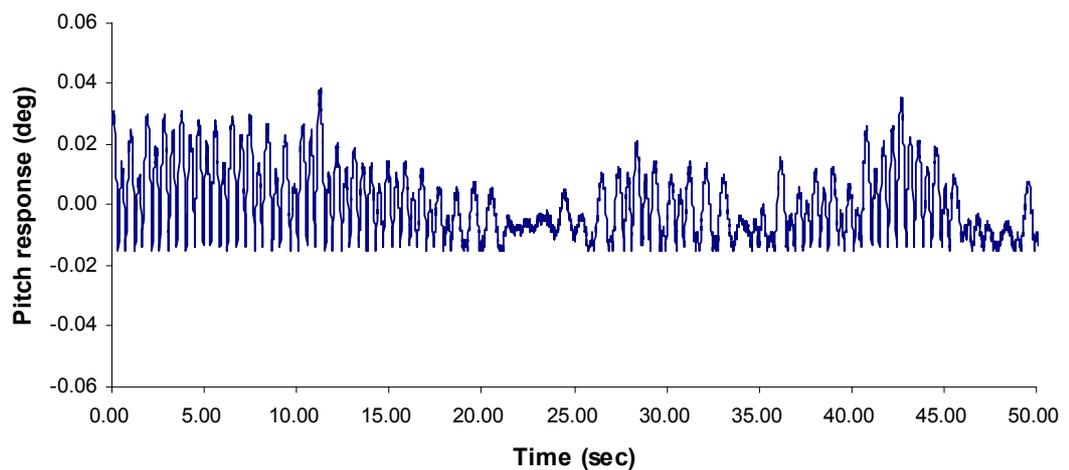
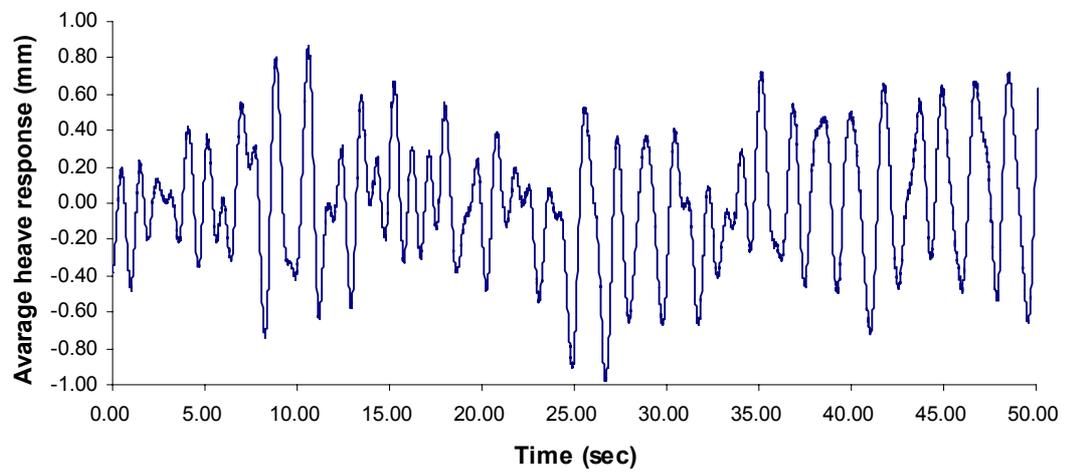
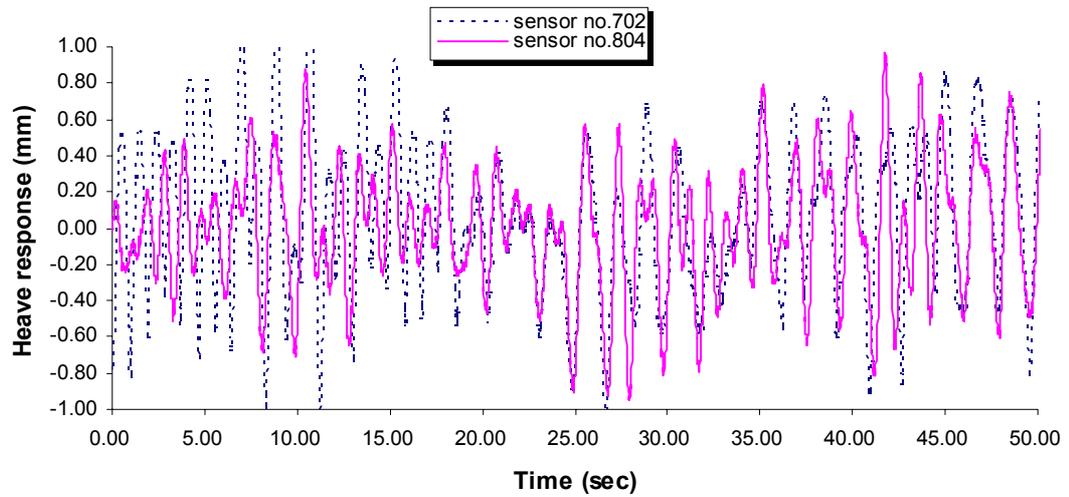
ผนวก ก

ตัวอย่างสัญญาณการตอบสนองทางอากาศพลศาสตร์ในพิสัยเวลา

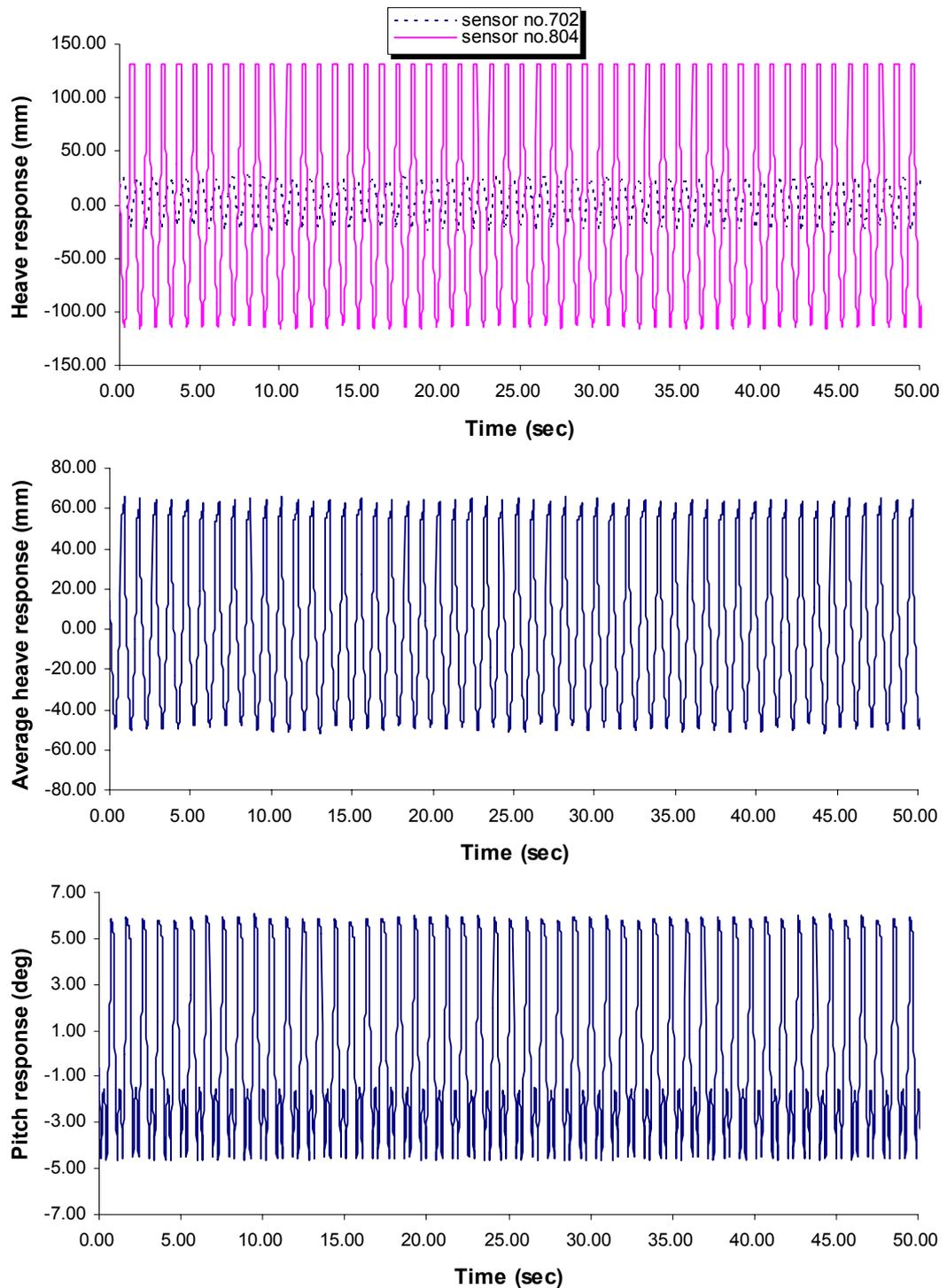
สะพาน Akashi kaikyo



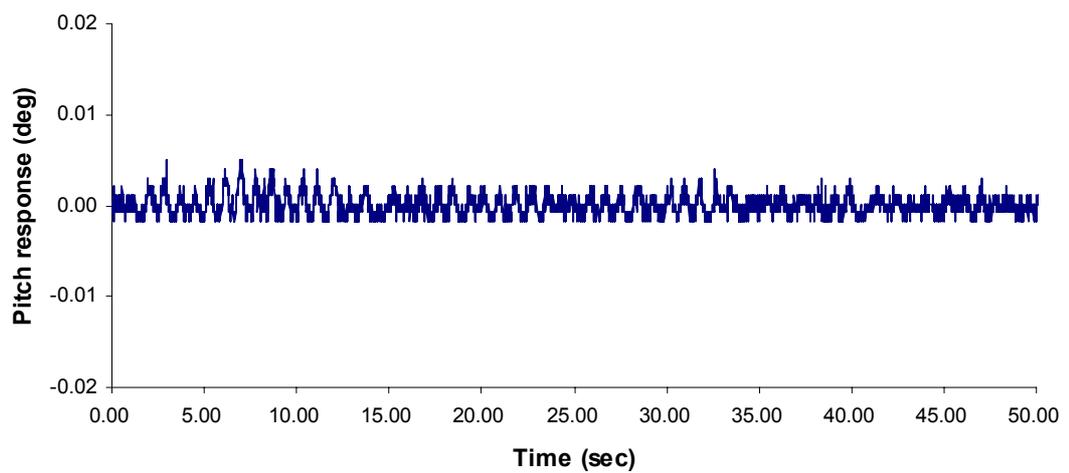
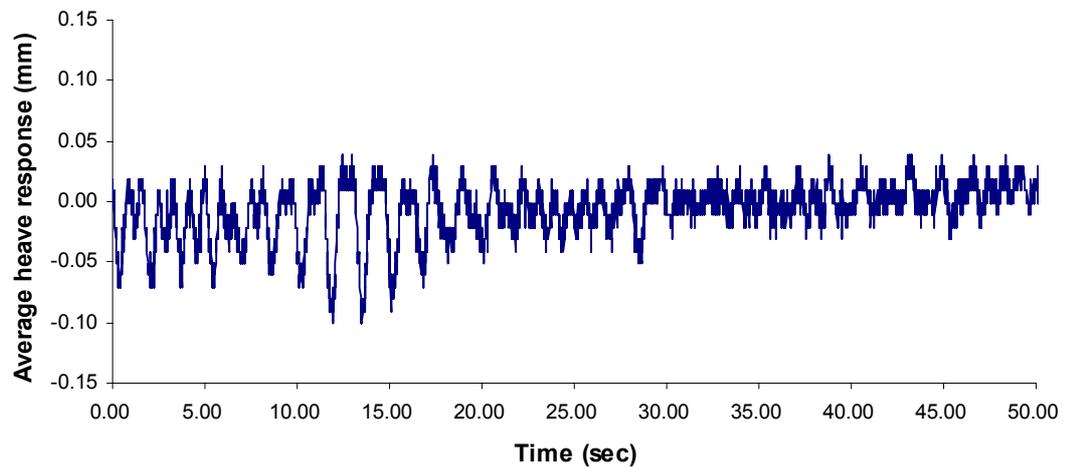
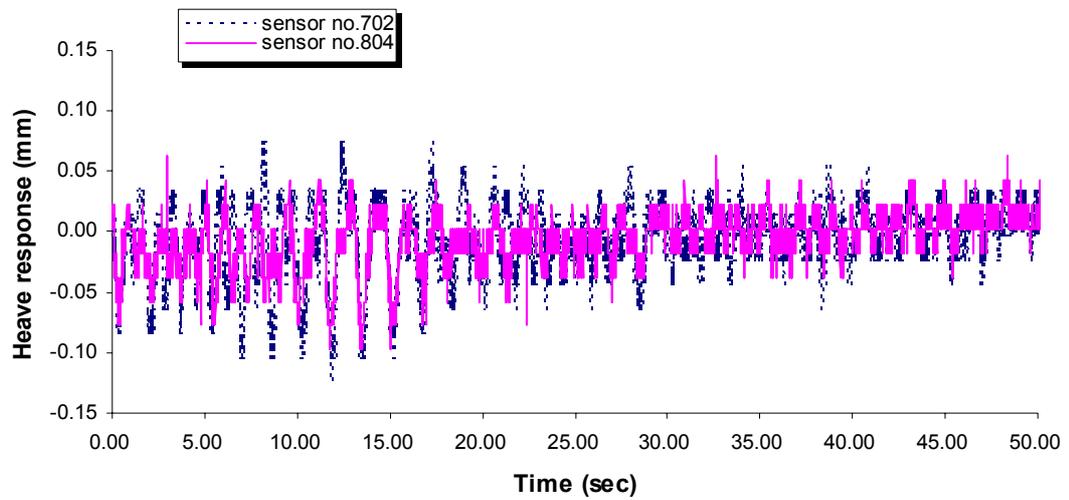
รูปที่ ก.1 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.51 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และก่อนติด TMD



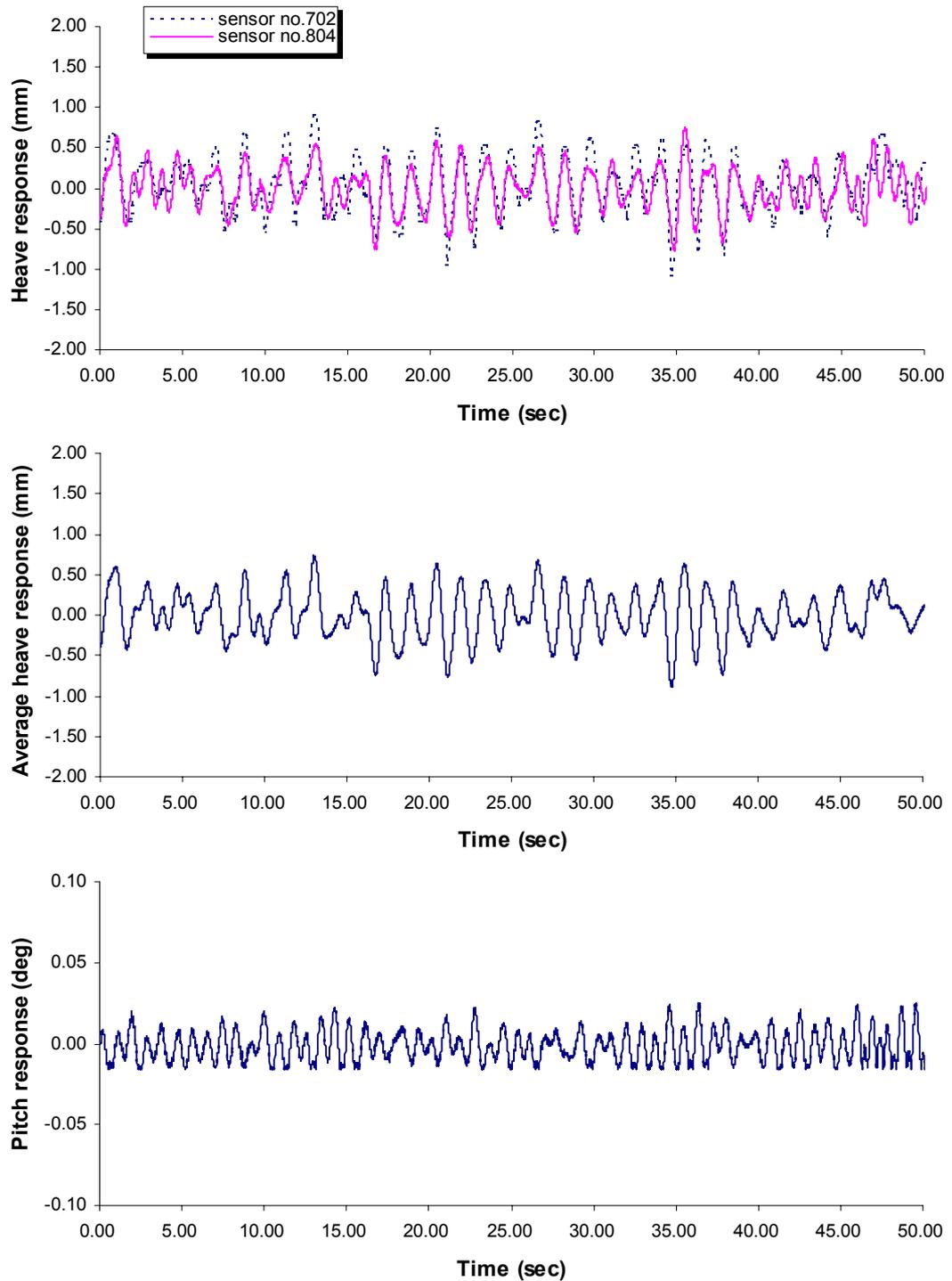
รูปที่ ก.2 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.12 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และก่อนติด TMD



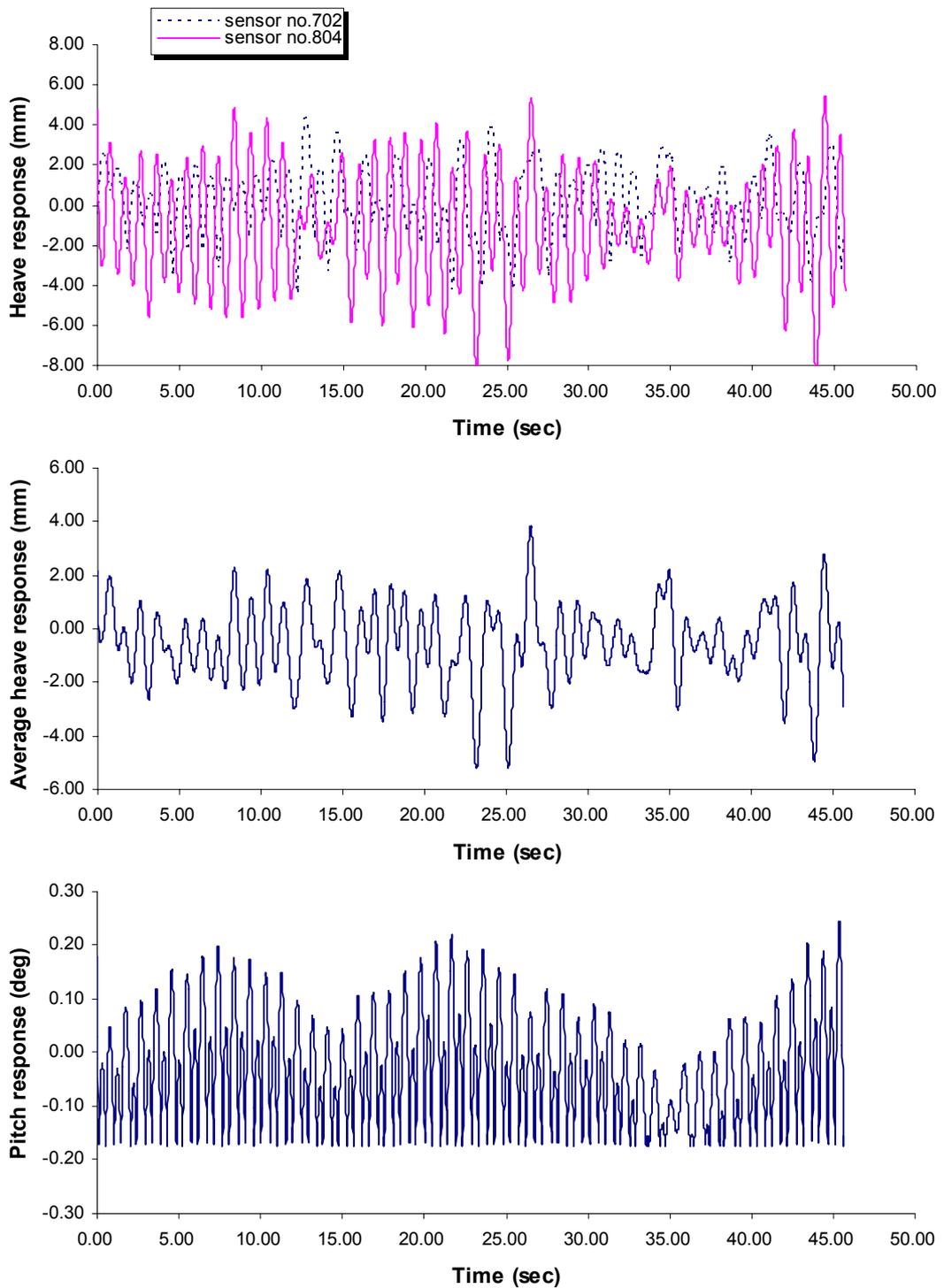
รูปที่ ค.3 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyو ที่ความเร็ว 5.53 m/s (เกิด Flutter instability) ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และก่อนติด TMD



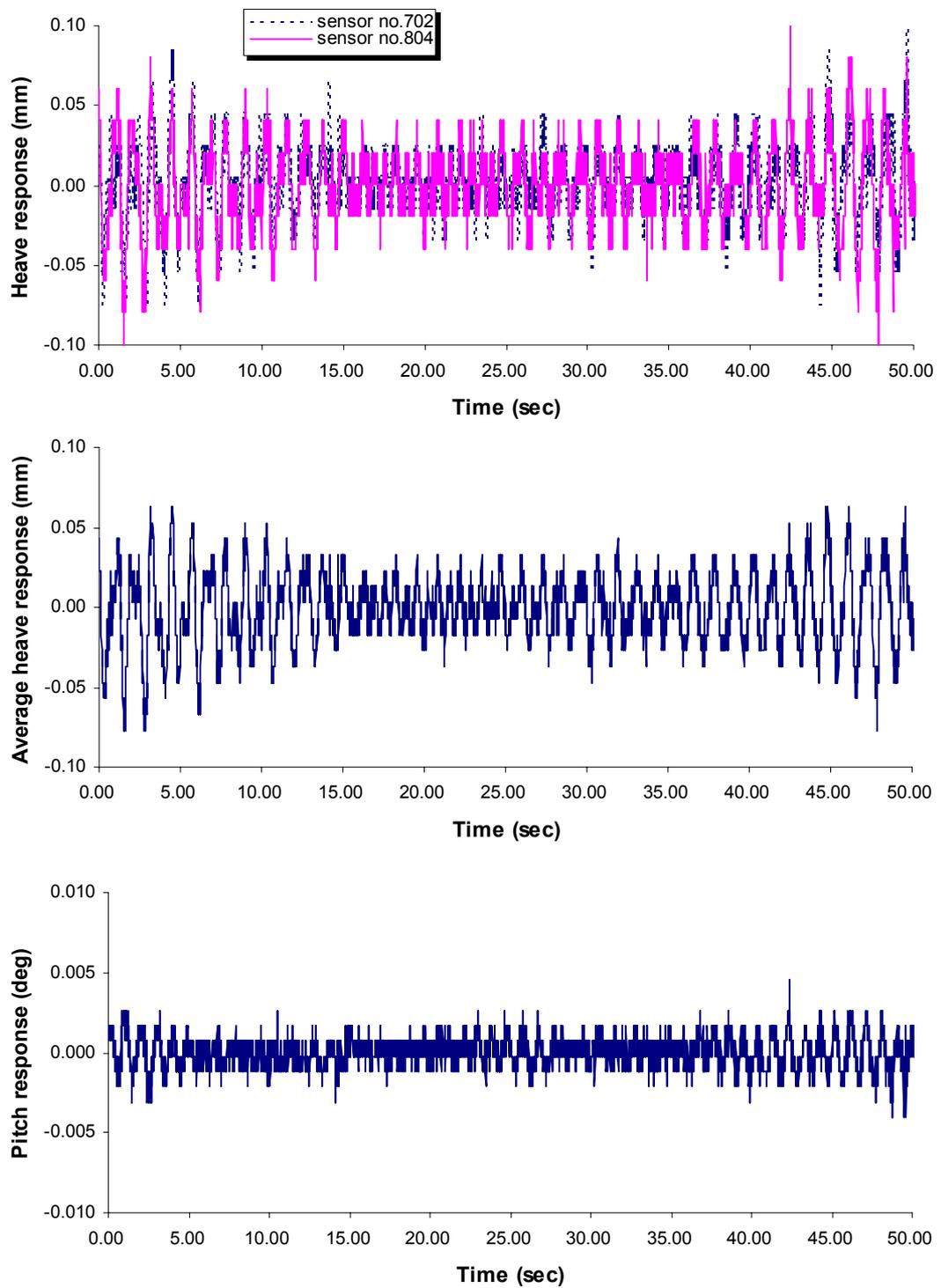
รูปที่ ๓.๔ สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%



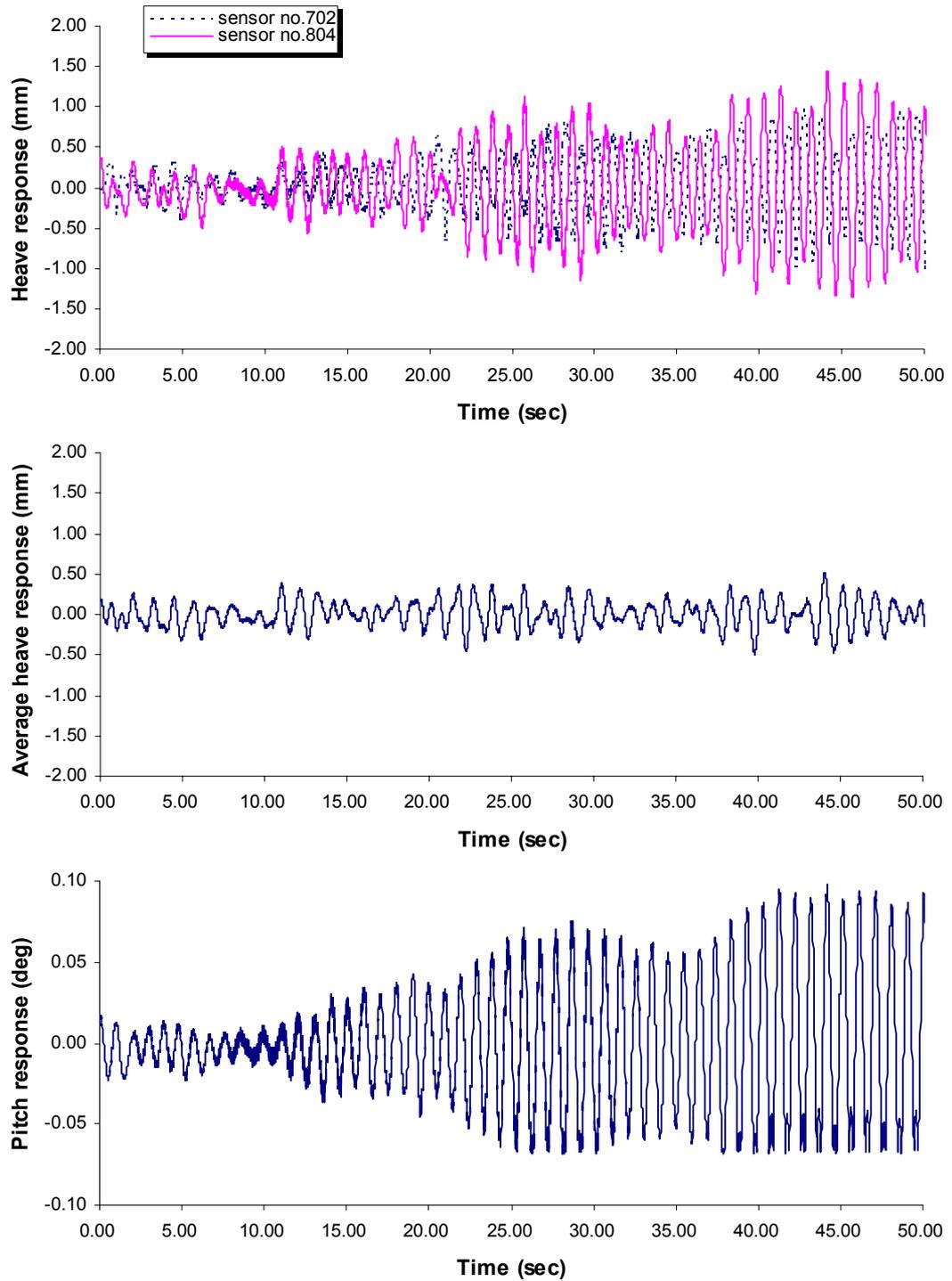
รูปที่ ค.5 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.12 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%



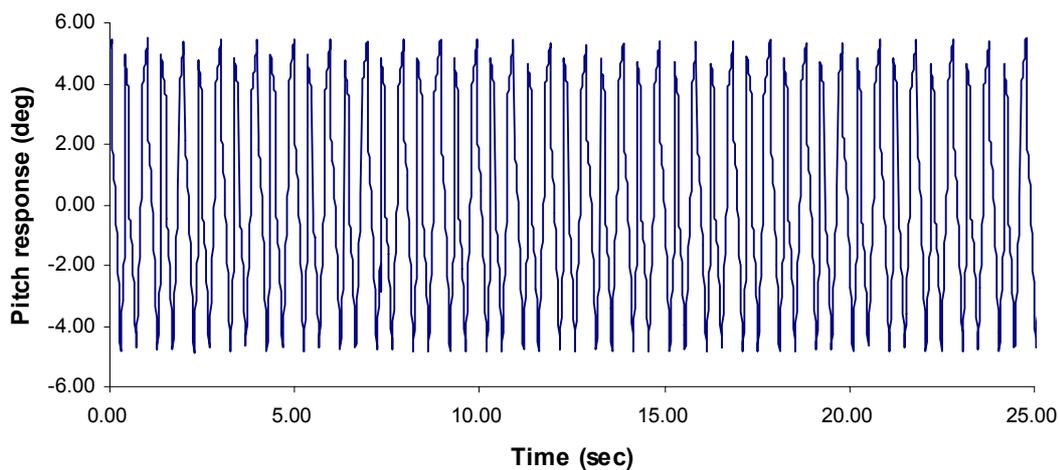
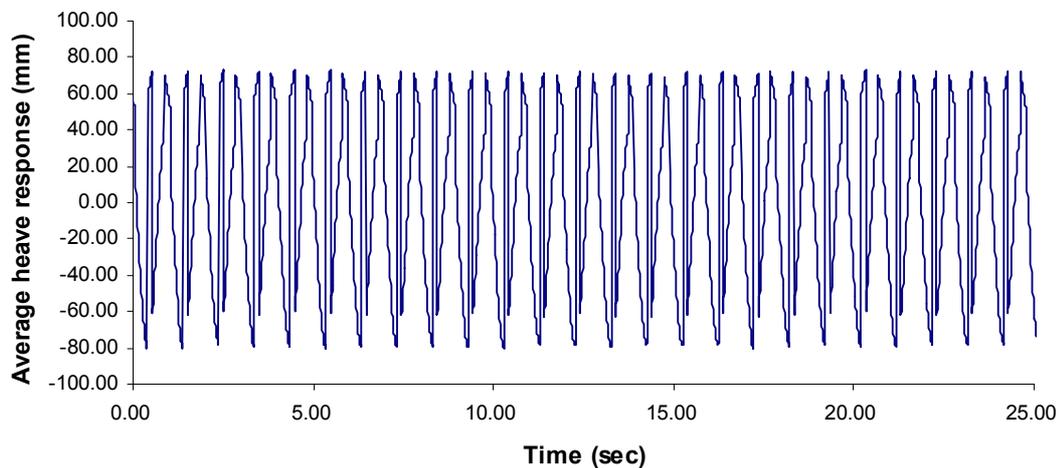
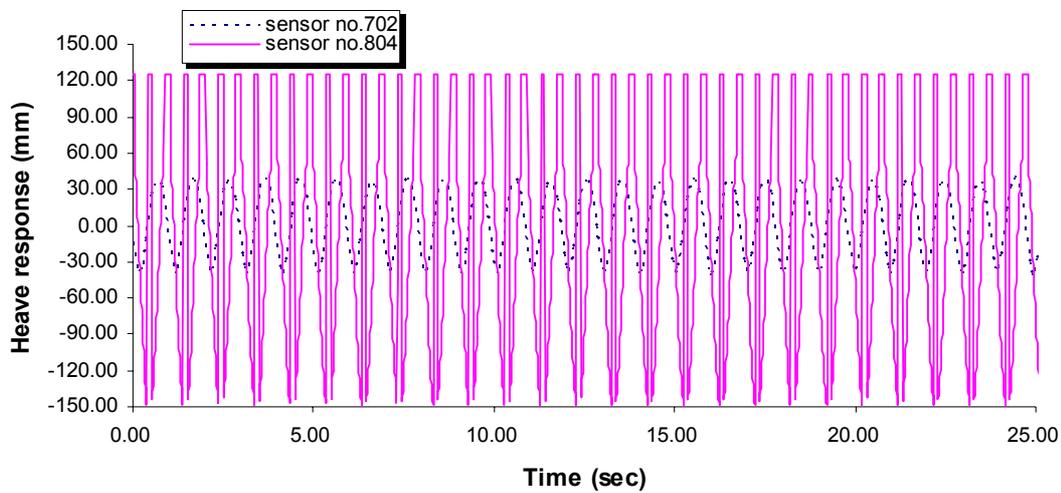
รูปที่ ก.6 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 6.08 m/s (เกิด Flutter instability) ที่ความถี่ธรรมชาติ V1-T1 แบบยึดด้านข้างสะพาน ก่อนปรับปรุงหน้าตัดสะพาน และหลังติดตั้ง TMD มวล 1%



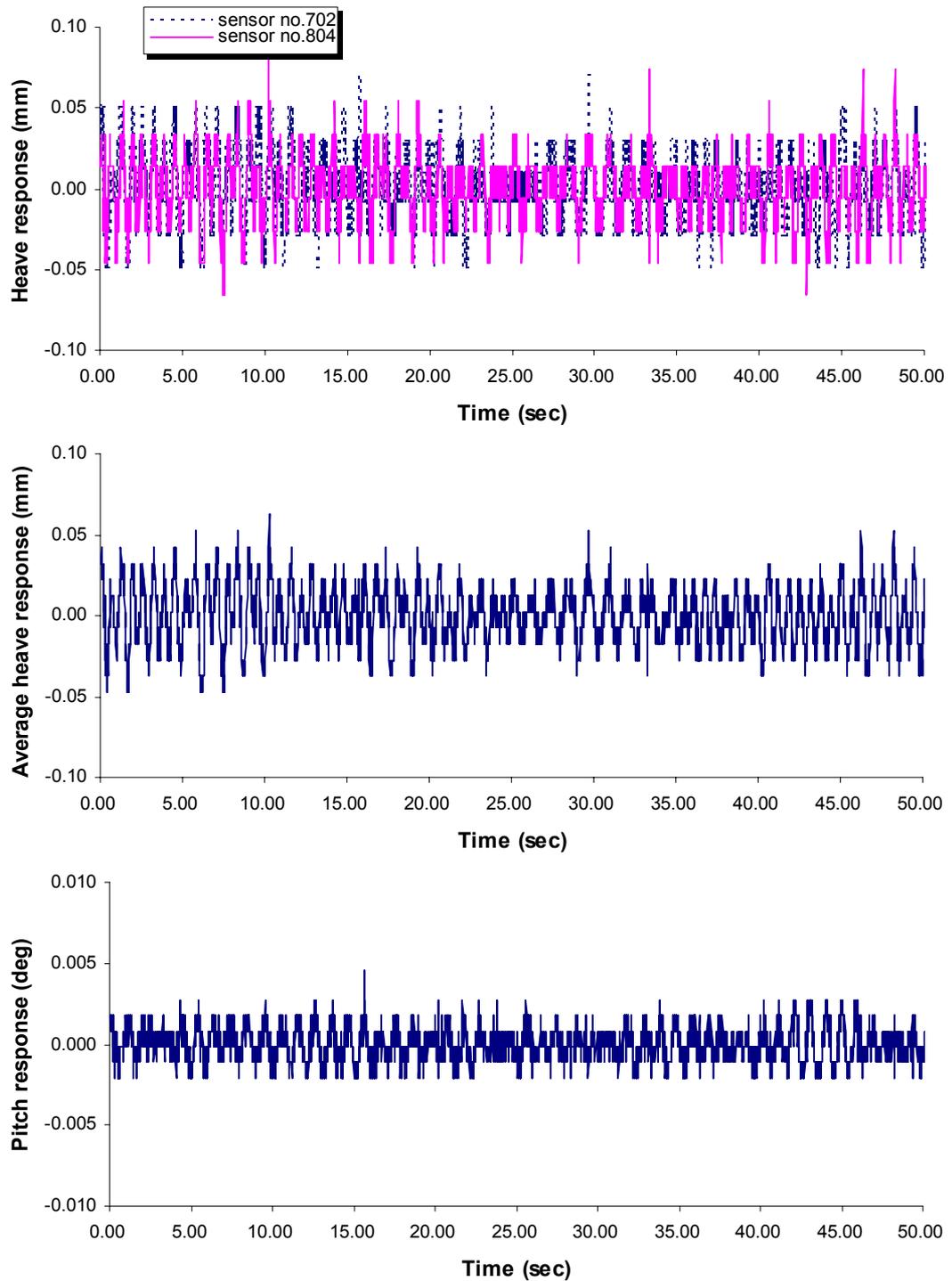
รูปที่ ค.7 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและก่อนติด TMD



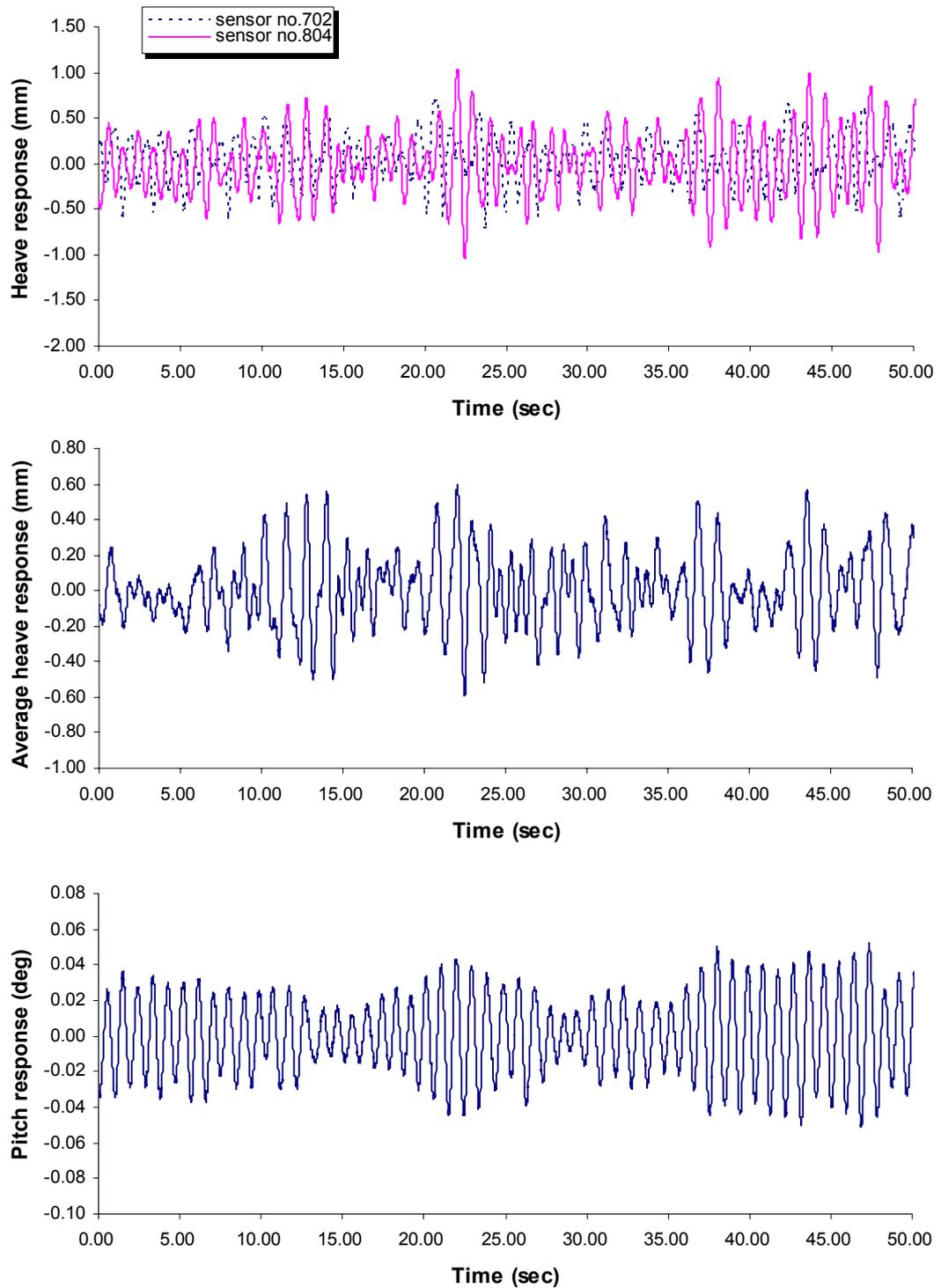
รูปที่ ค.8 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyō ที่ความเร็ว 3.12 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและก่อนติดตั้ง TMD



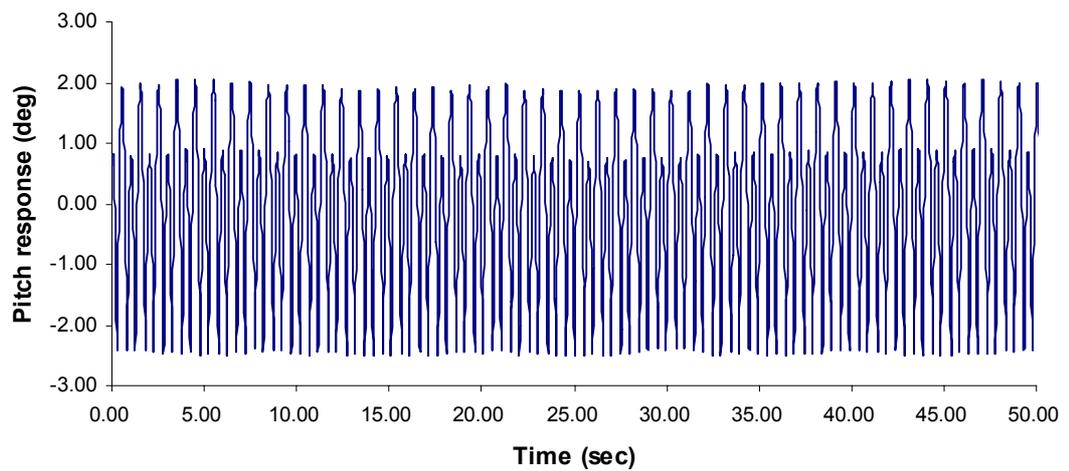
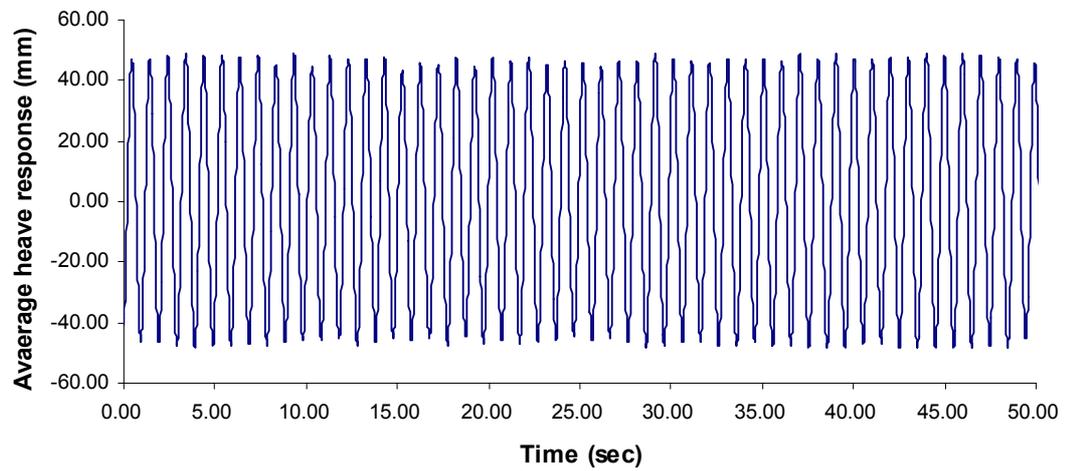
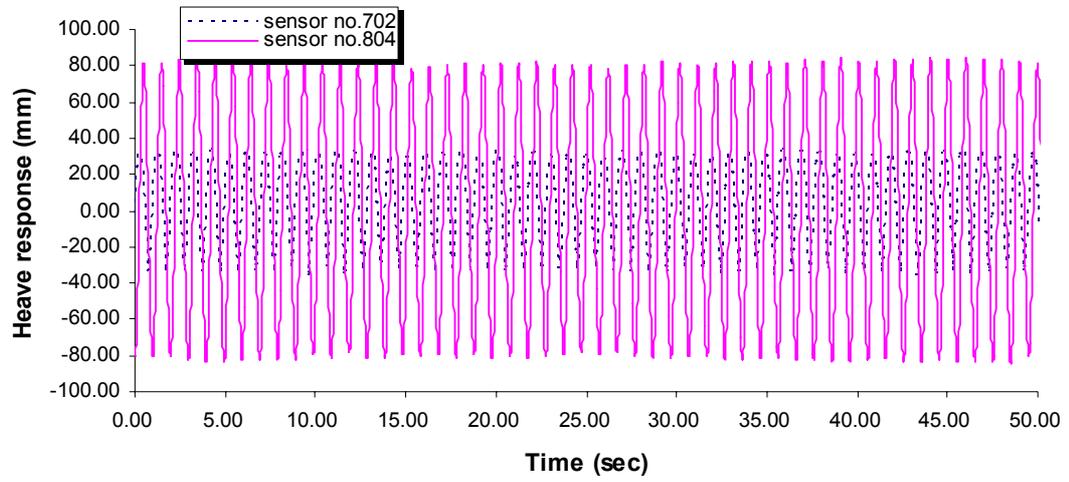
รูปที่ ค.9 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 6.54 m/s (เกิด Flutter instability) ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและก่อนติดตั้ง TMD



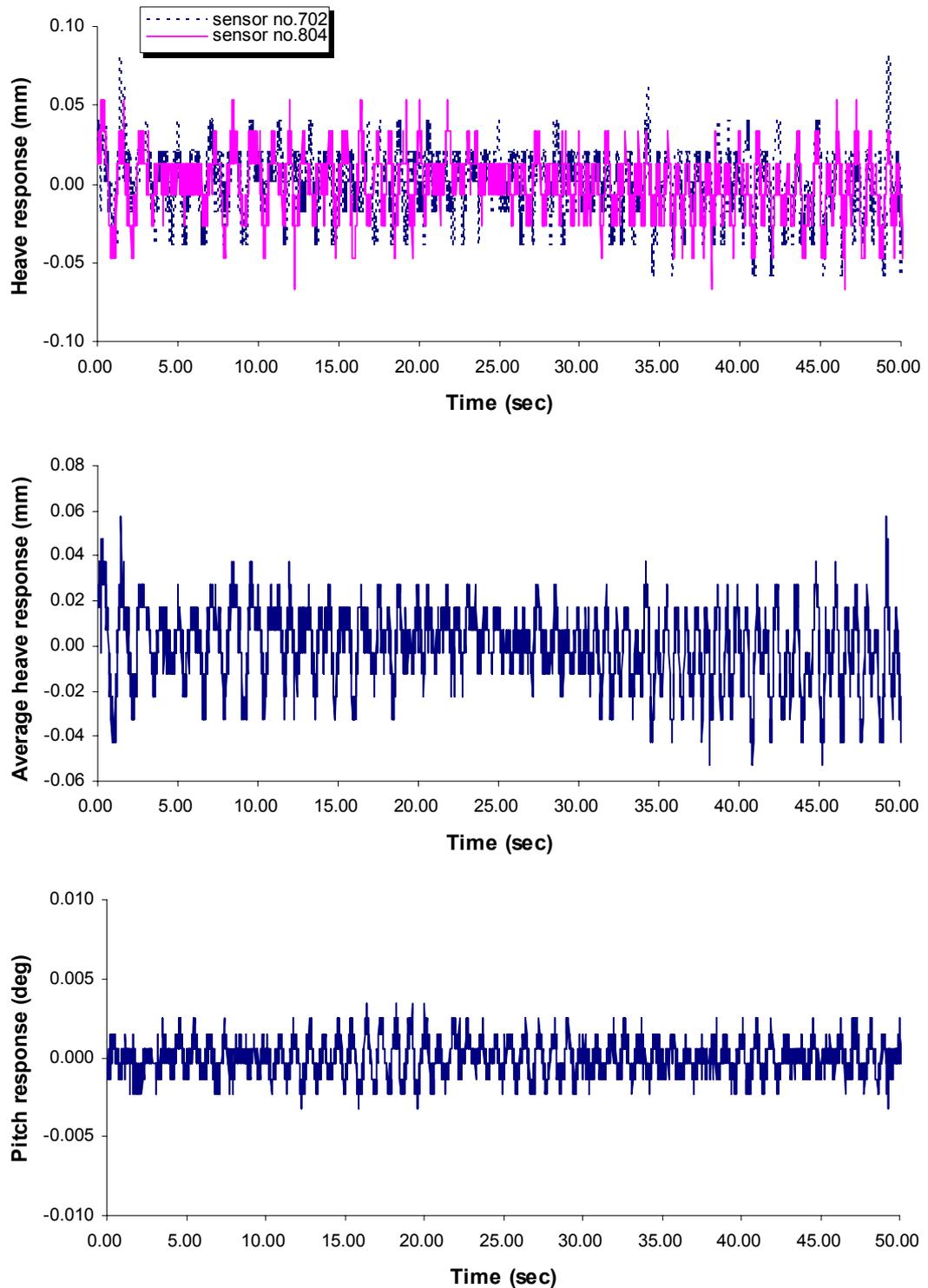
รูปที่ ค.10 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%



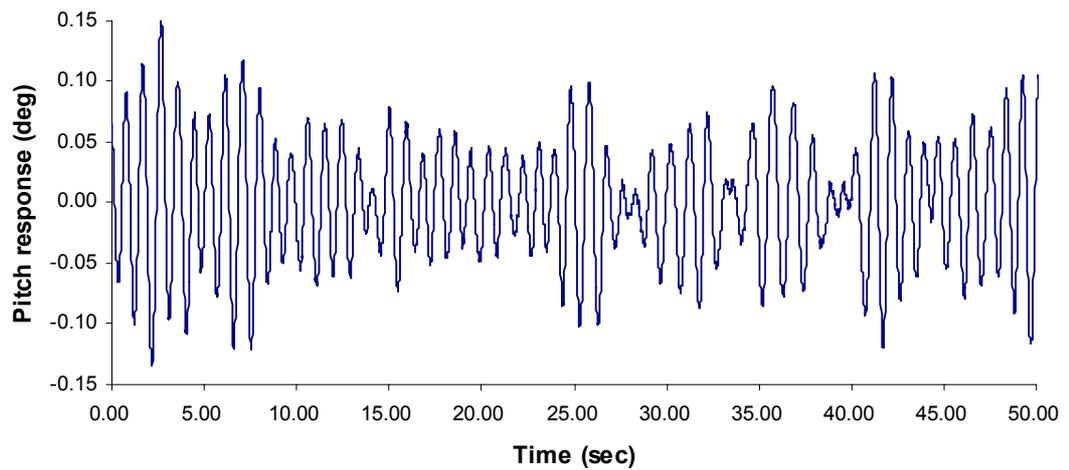
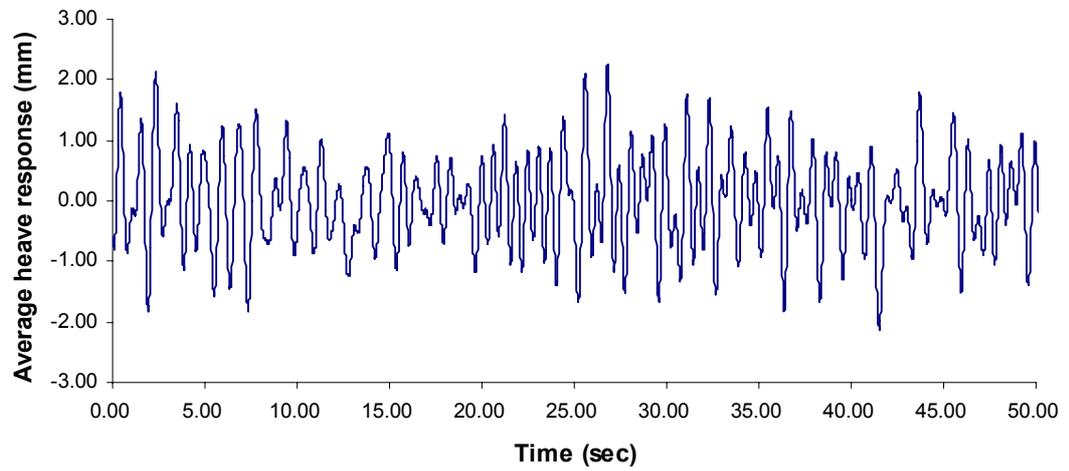
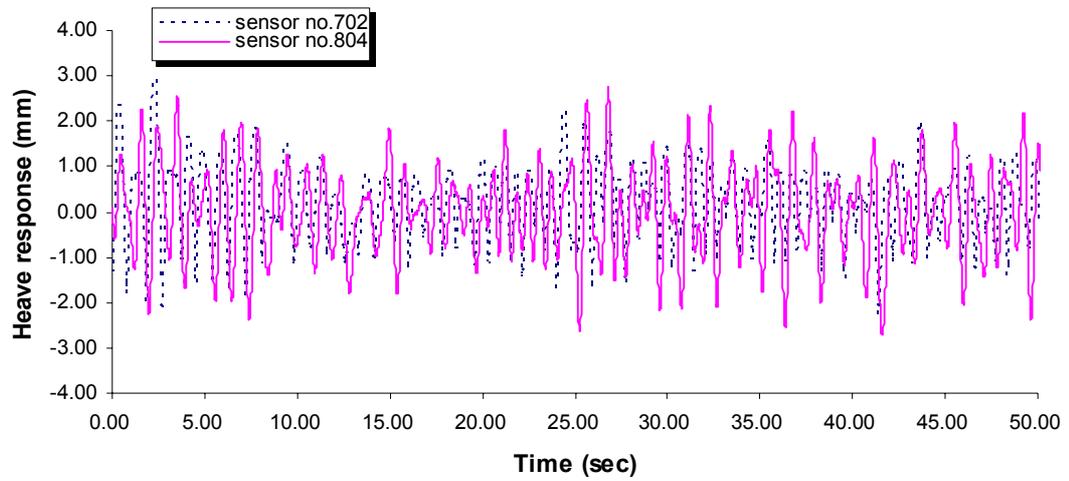
รูปที่ ค.11 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 3.54 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMD มวล 1%



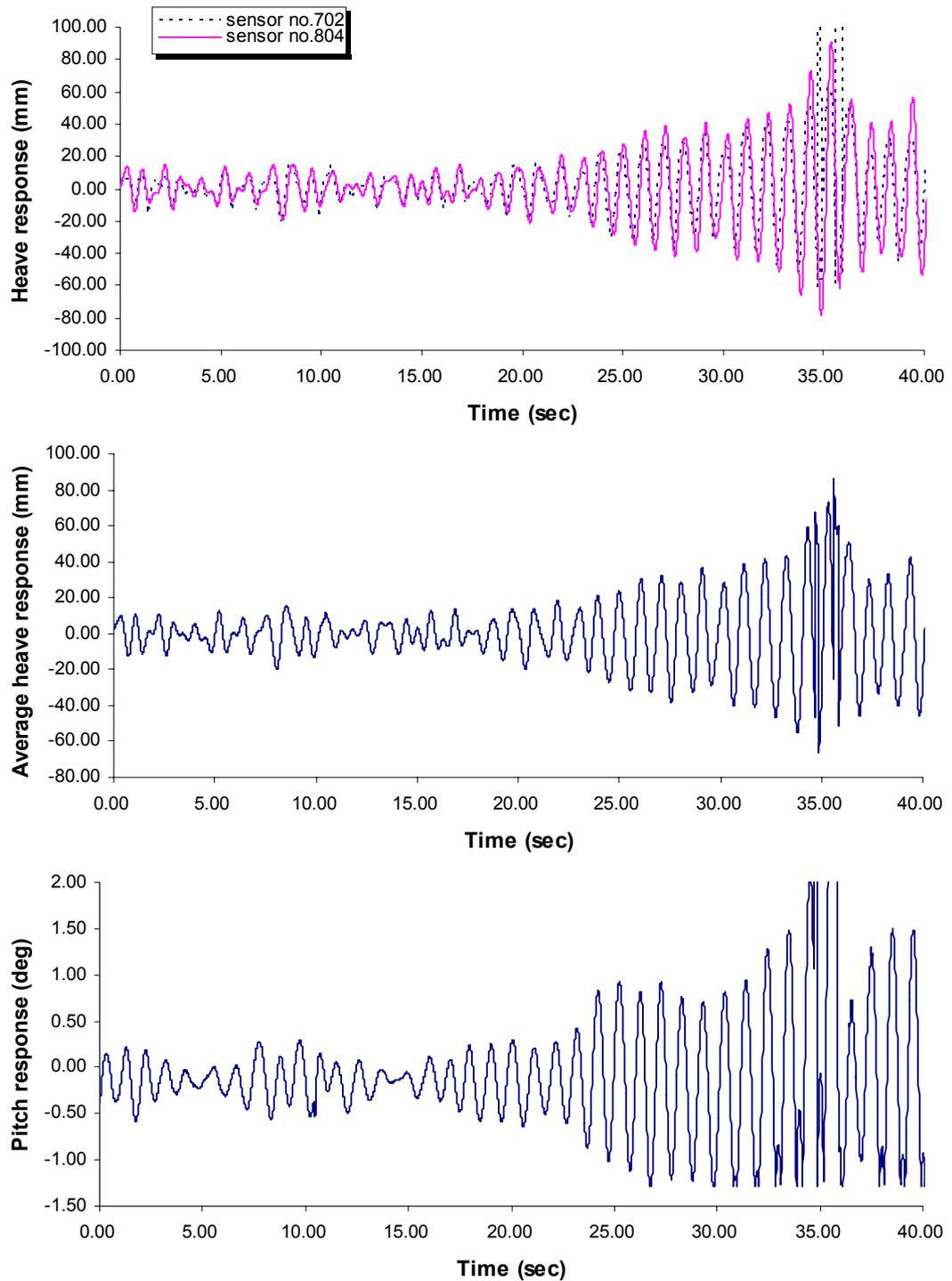
รูปที่ ค.12 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 7.75 m/s
(เกิด Flutter instability) ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน
และหลังติดตั้ง TMD มวล 1%



รูปที่ ค.13 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 0.53 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติดตั้ง TMDมวล 3%

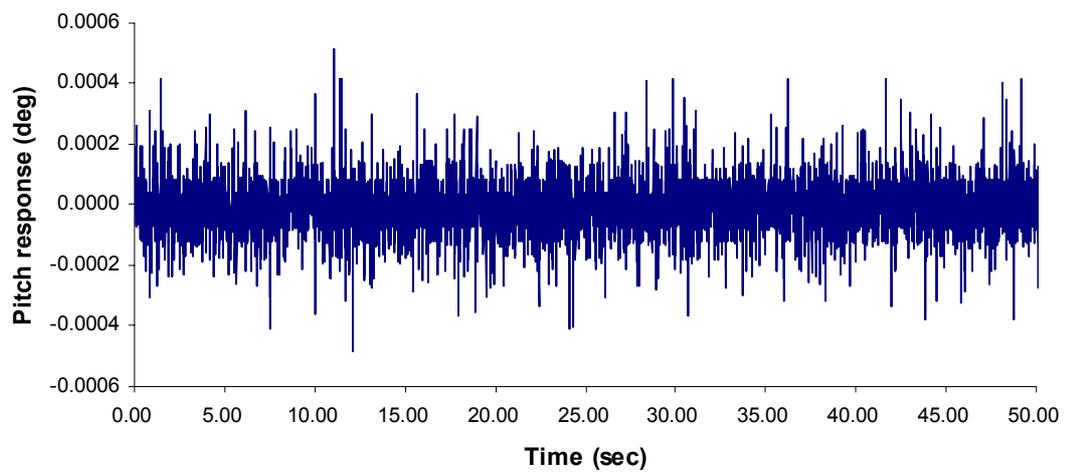
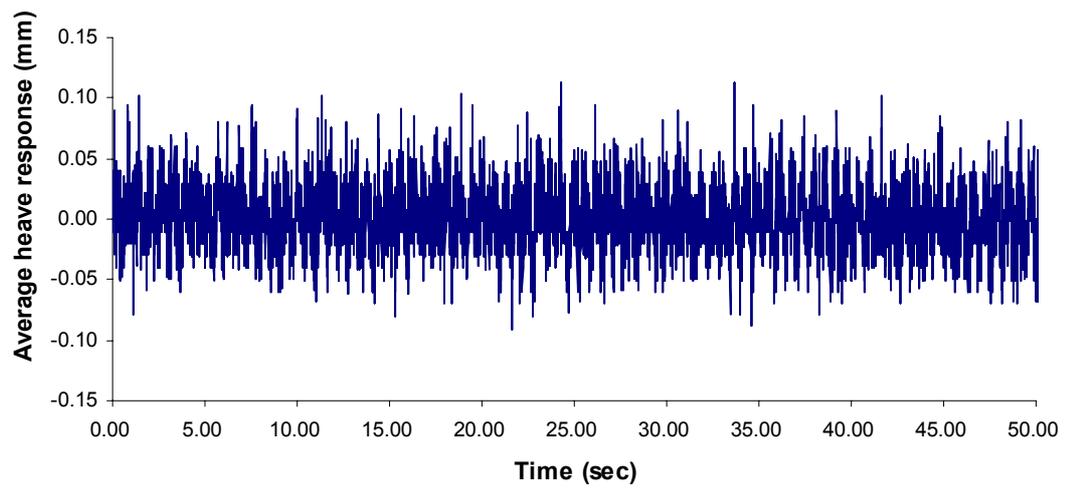
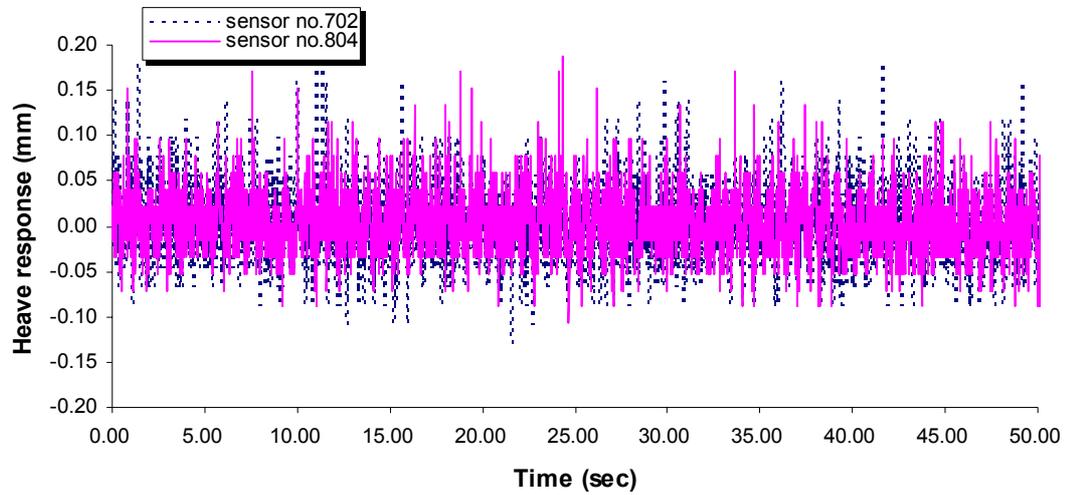


รูปที่ ค.14 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyo ที่ความเร็ว 6.52 m/s ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพานและหลังติด TMDมวล 3%

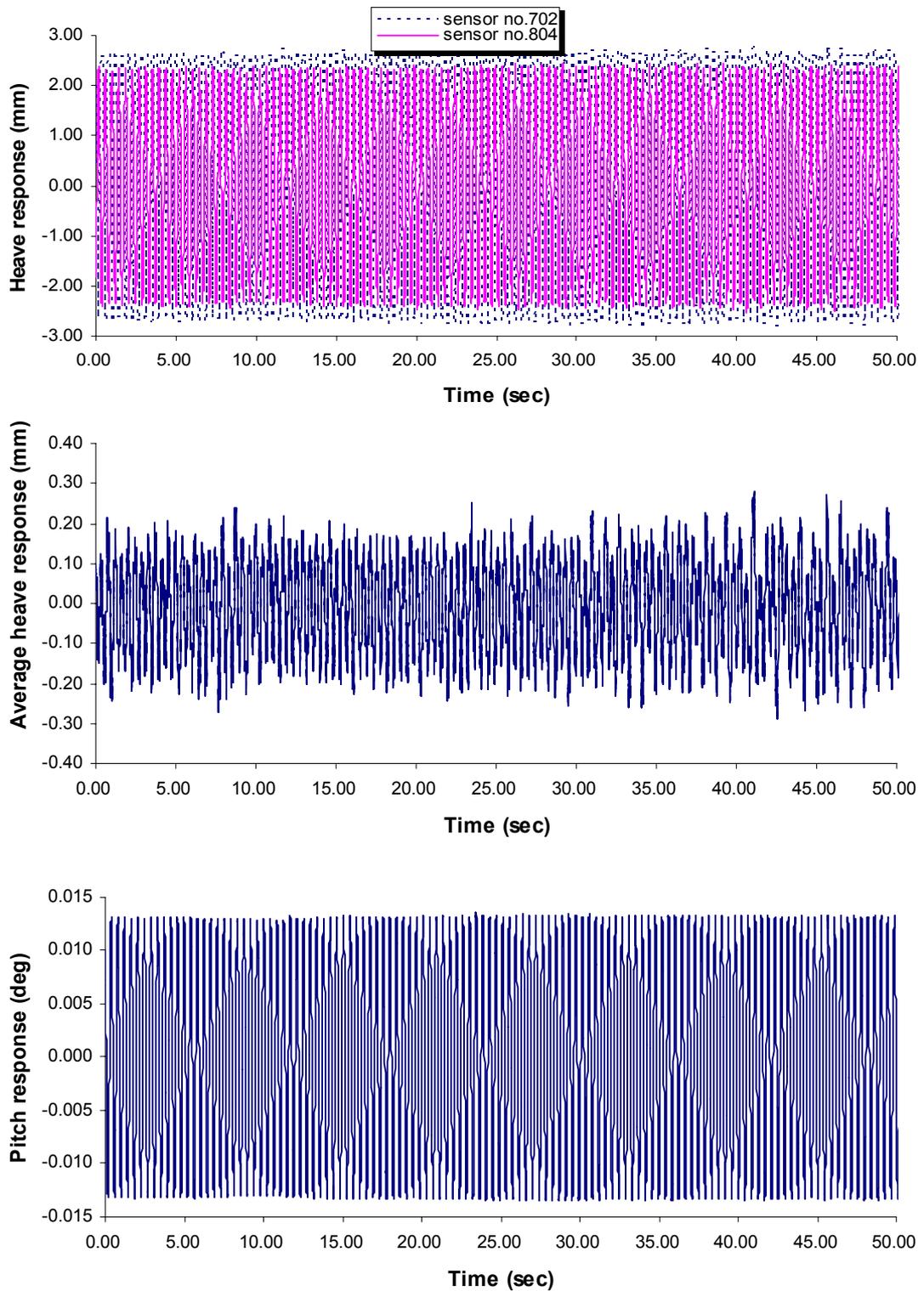


รูปที่ ค.15 สัญญาณการตอบสนองของสะพาน Akashi kaikyو ที่ความเร็ว 13.51 m/s
 (เกิด Flutter instability) ที่ความถี่ธรรมชาติ V3-T1 หลังปรับปรุงหน้าตัดสะพาน
 และหลังติดตั้ง TMD มวล 3%

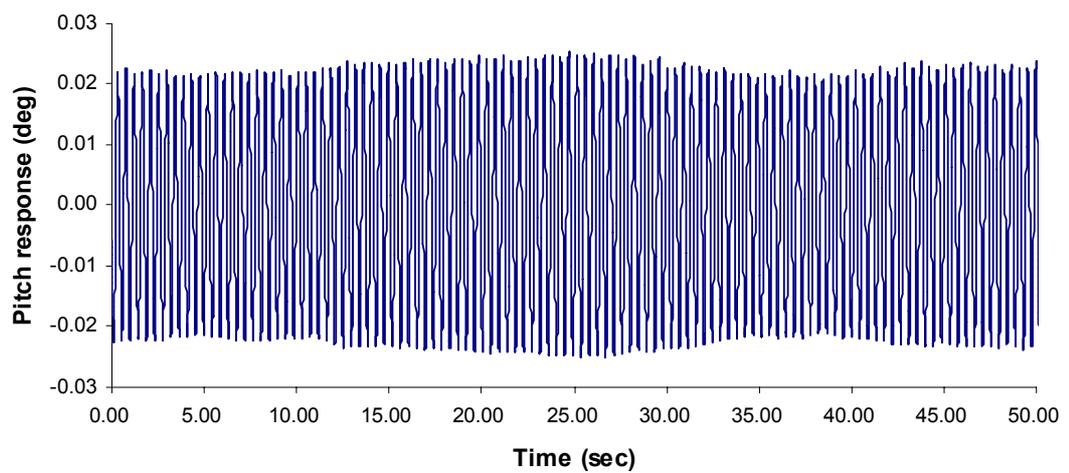
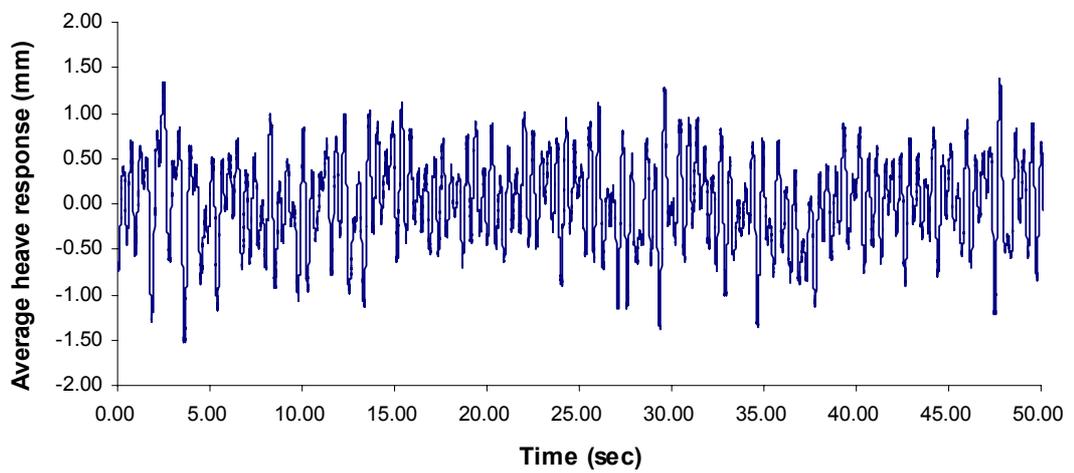
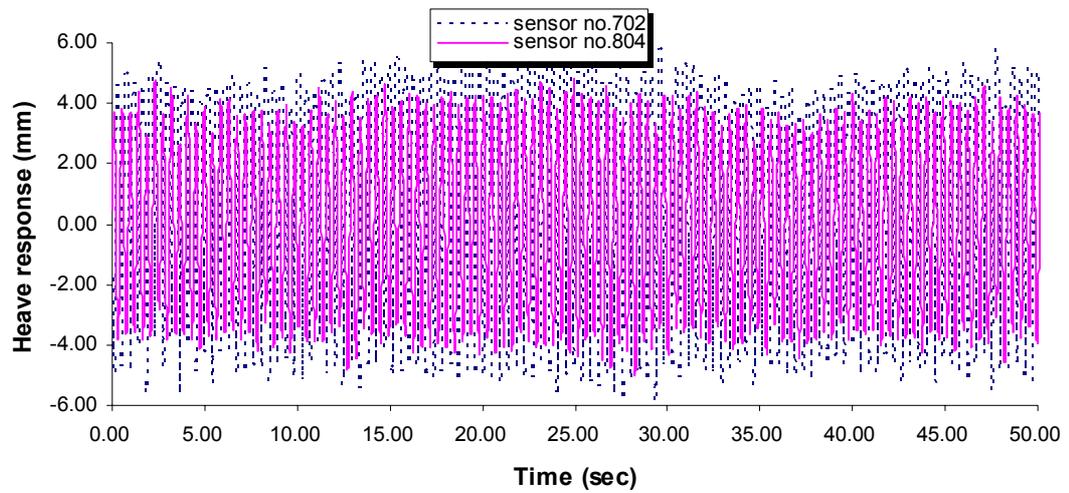
สะพานวงแหวนอุตสาหกรรม



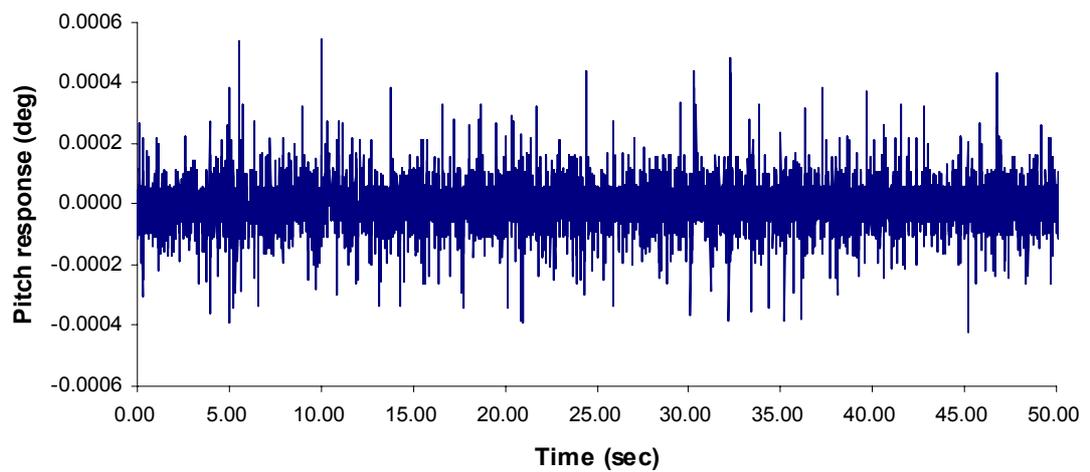
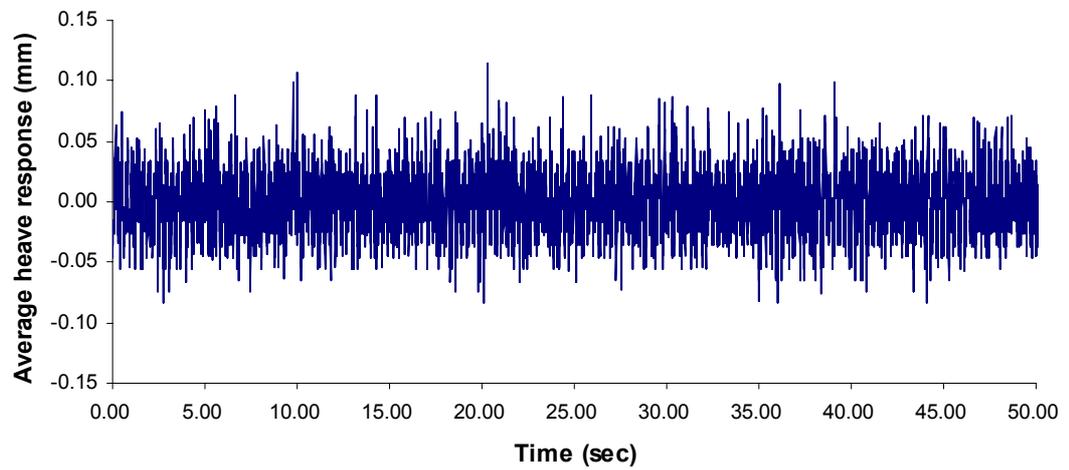
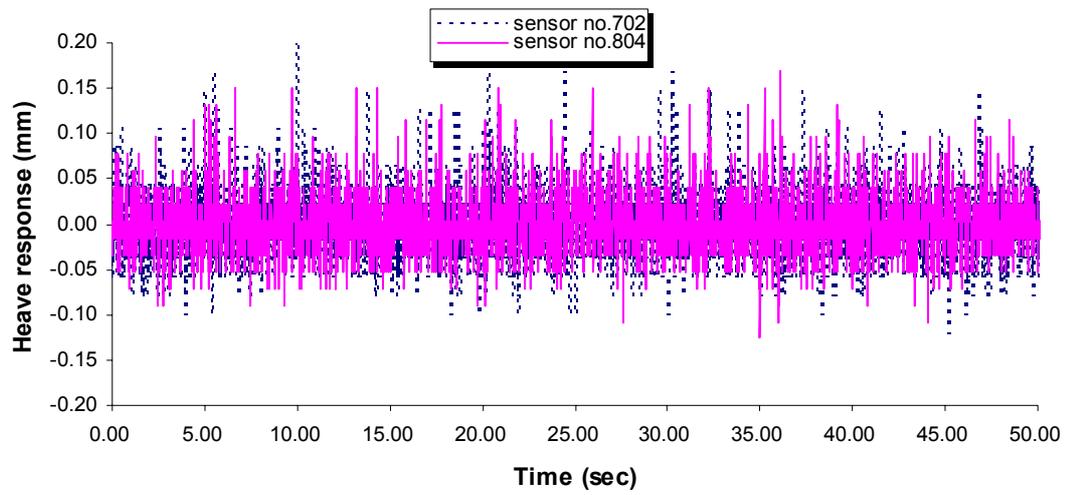
รูปที่ ค.16 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s ก่อนติดTMD



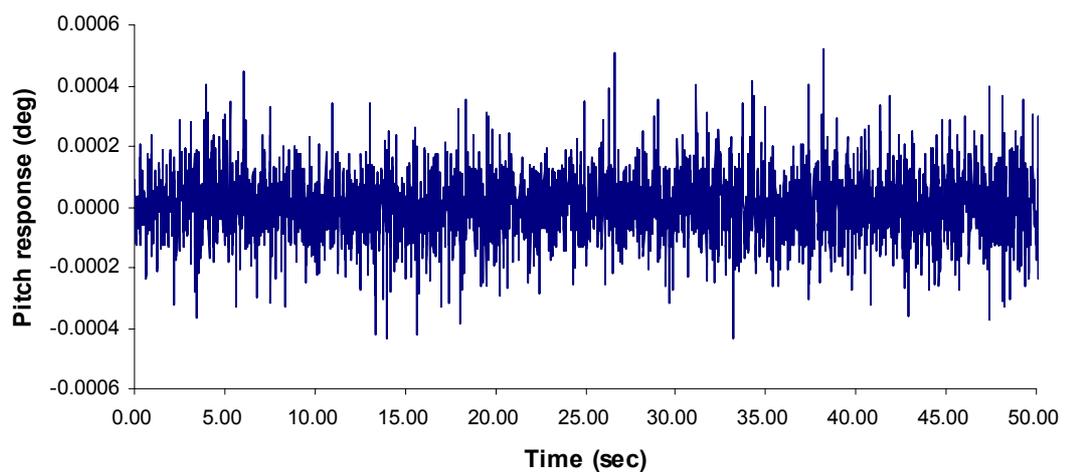
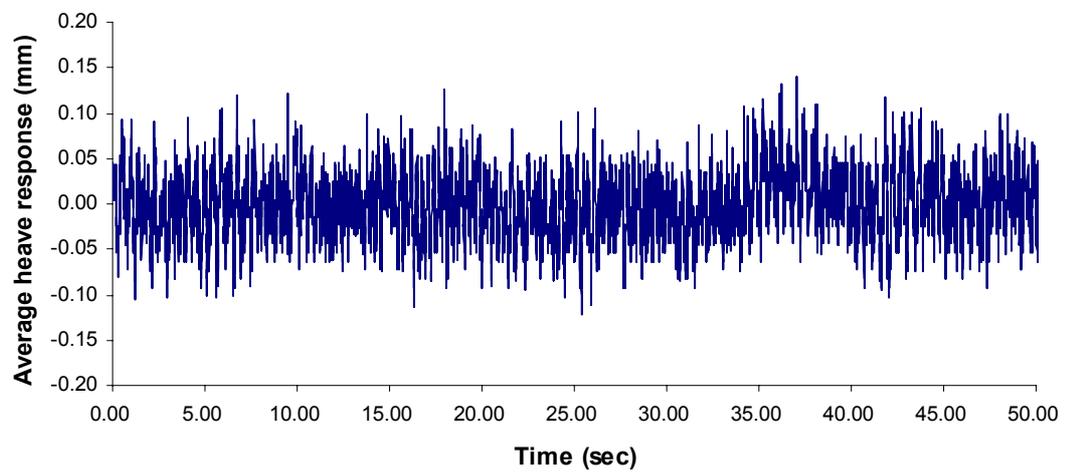
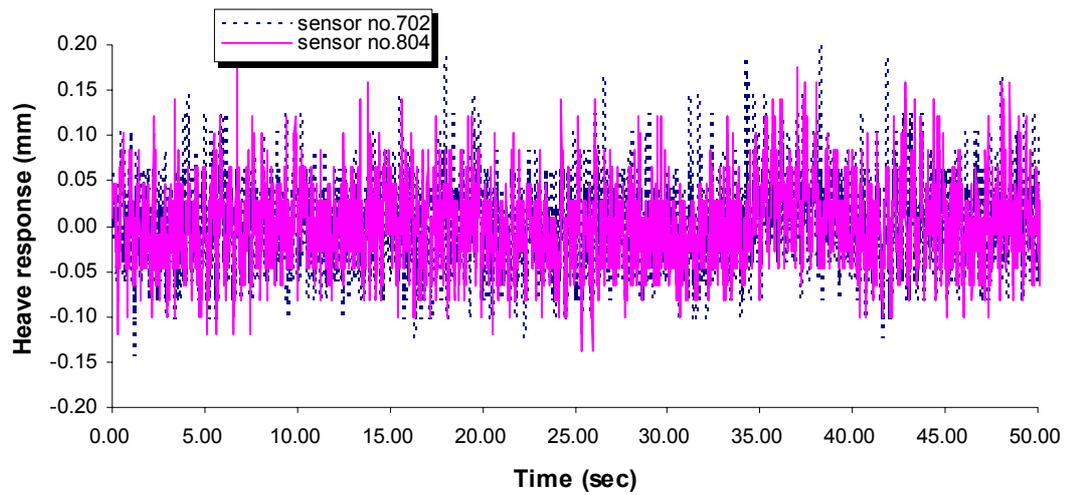
รูปที่ ก.17 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s
(เกิด Vortex shedding) ก่อนติดTMD



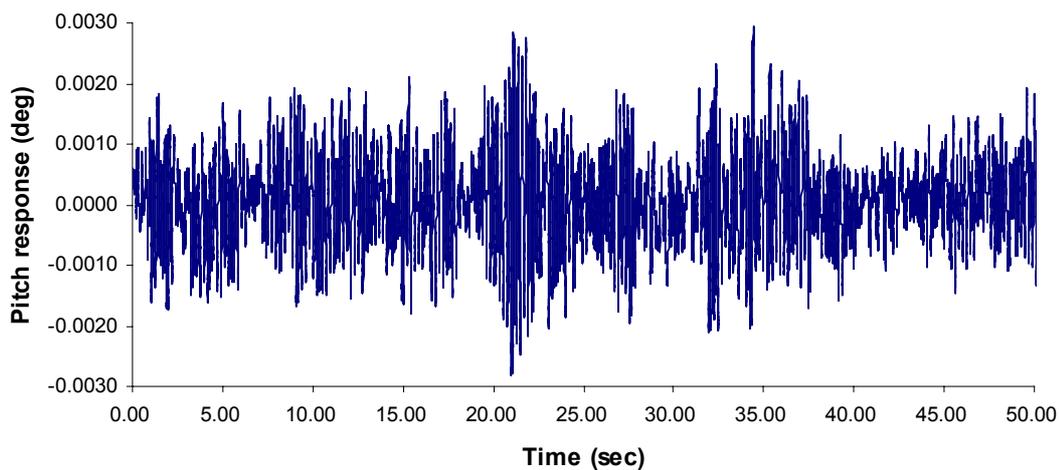
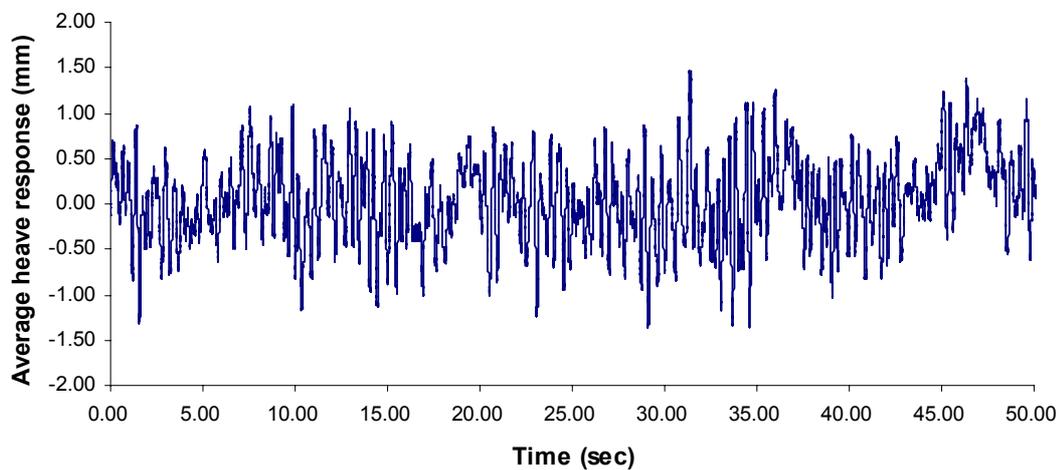
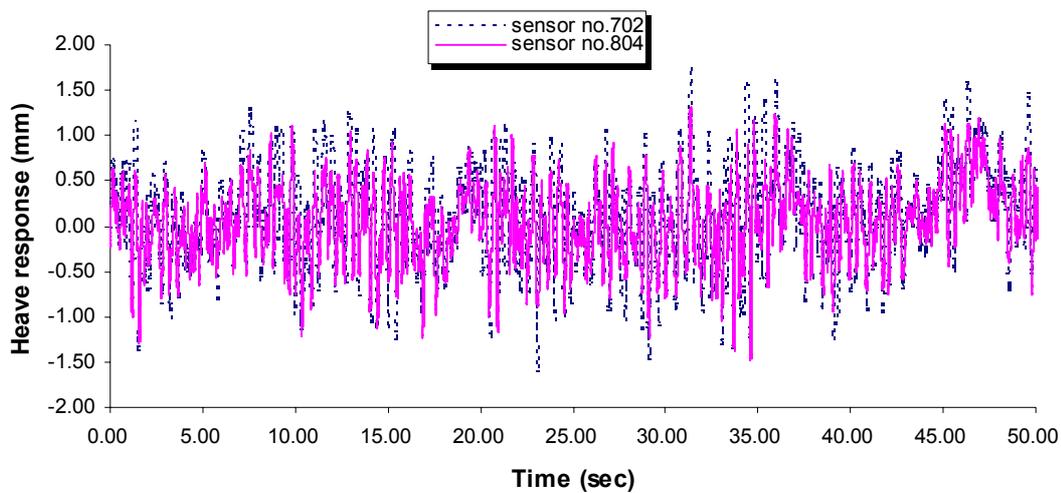
รูปที่ ค.18 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 8.42 m/s
(เกิด Flutter instability) ก่อนติดTMD



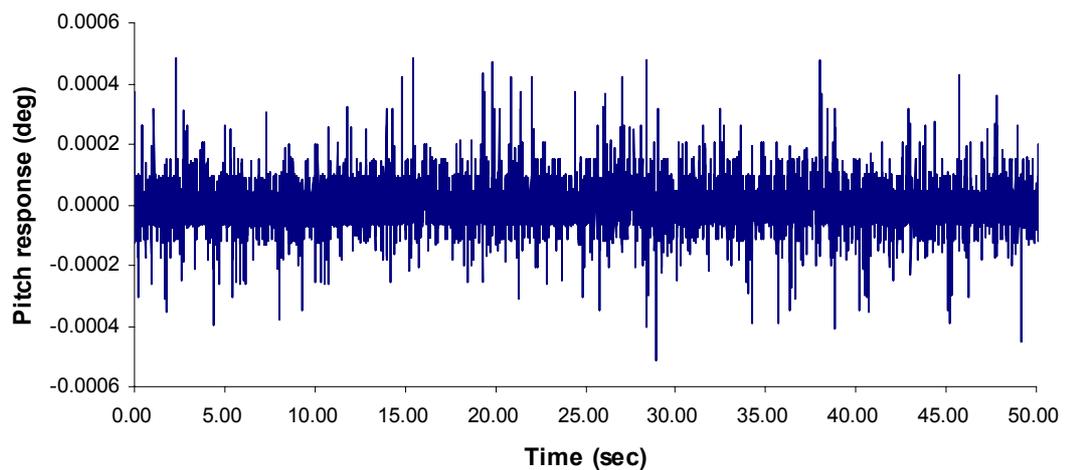
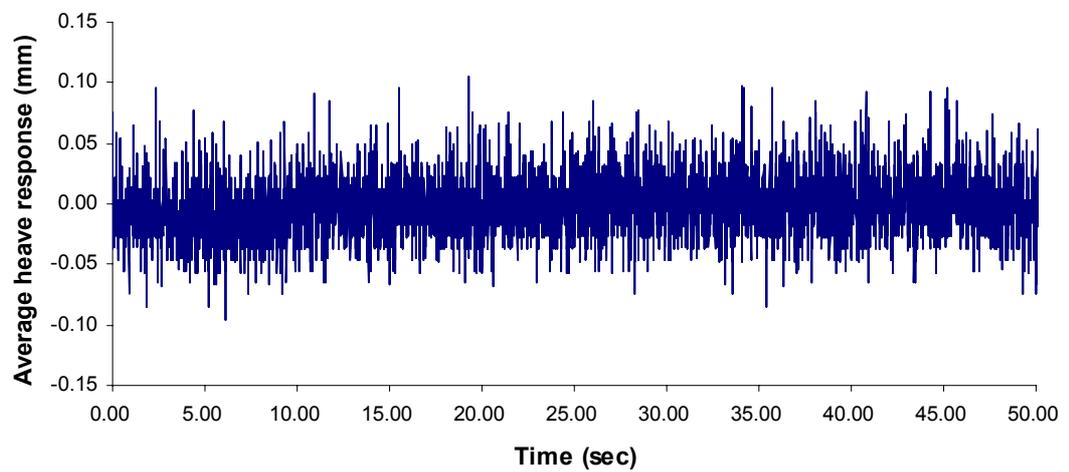
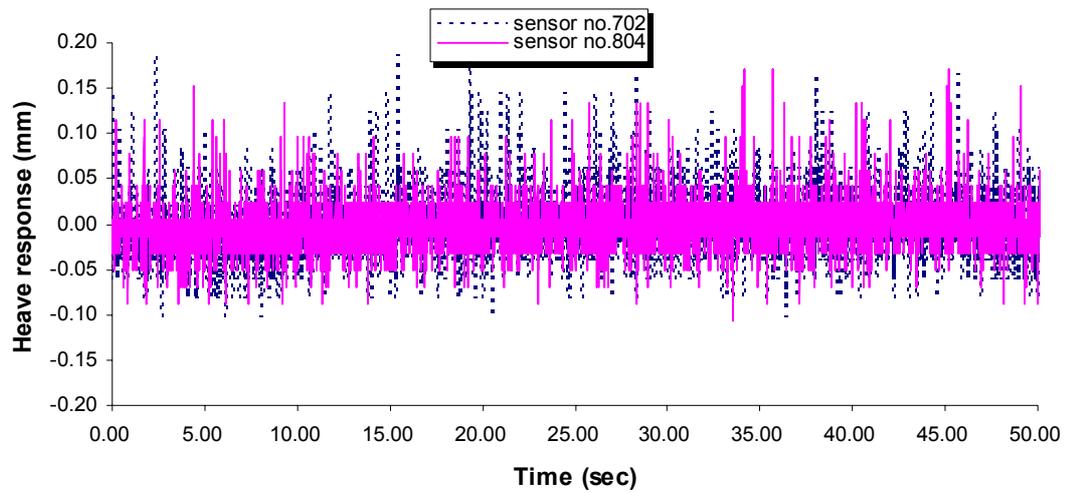
รูปที่ ค.19 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s
หลังติดตั้งTMD มวล 1%



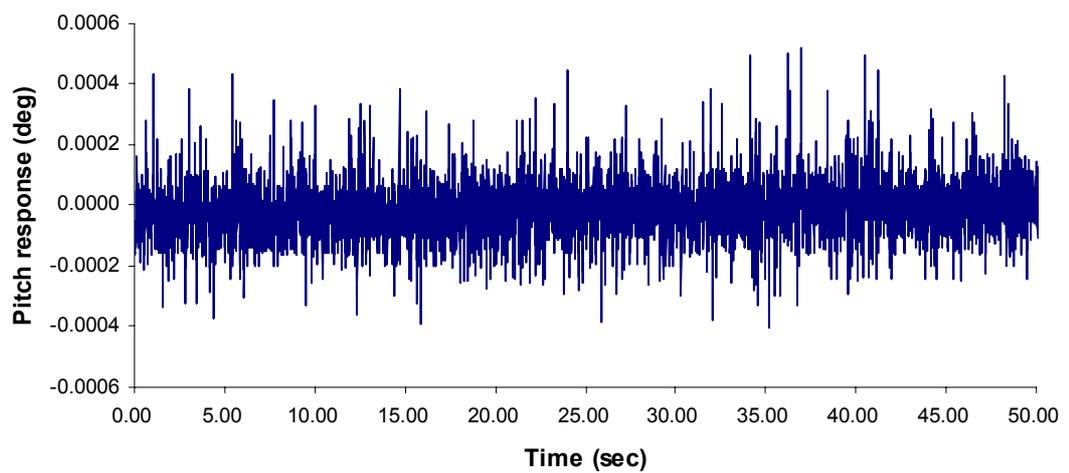
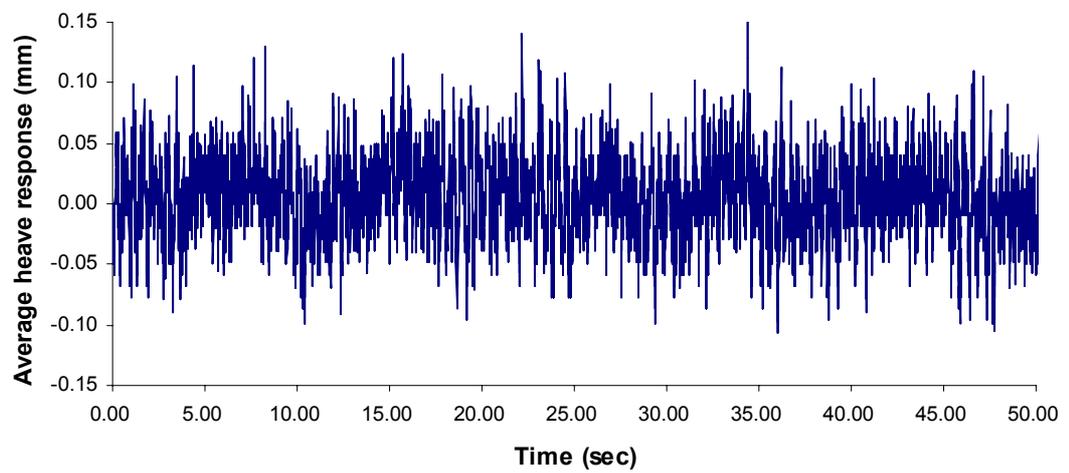
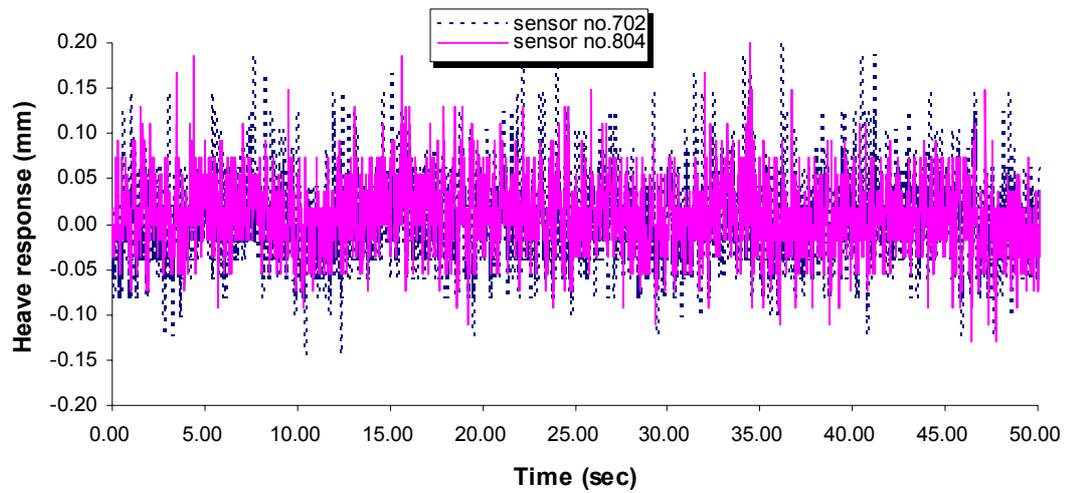
รูปที่ ค.20 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s (ผลของ Vortex shedding ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ ค.17) หลังติดตั้ง TMD มวล 1%



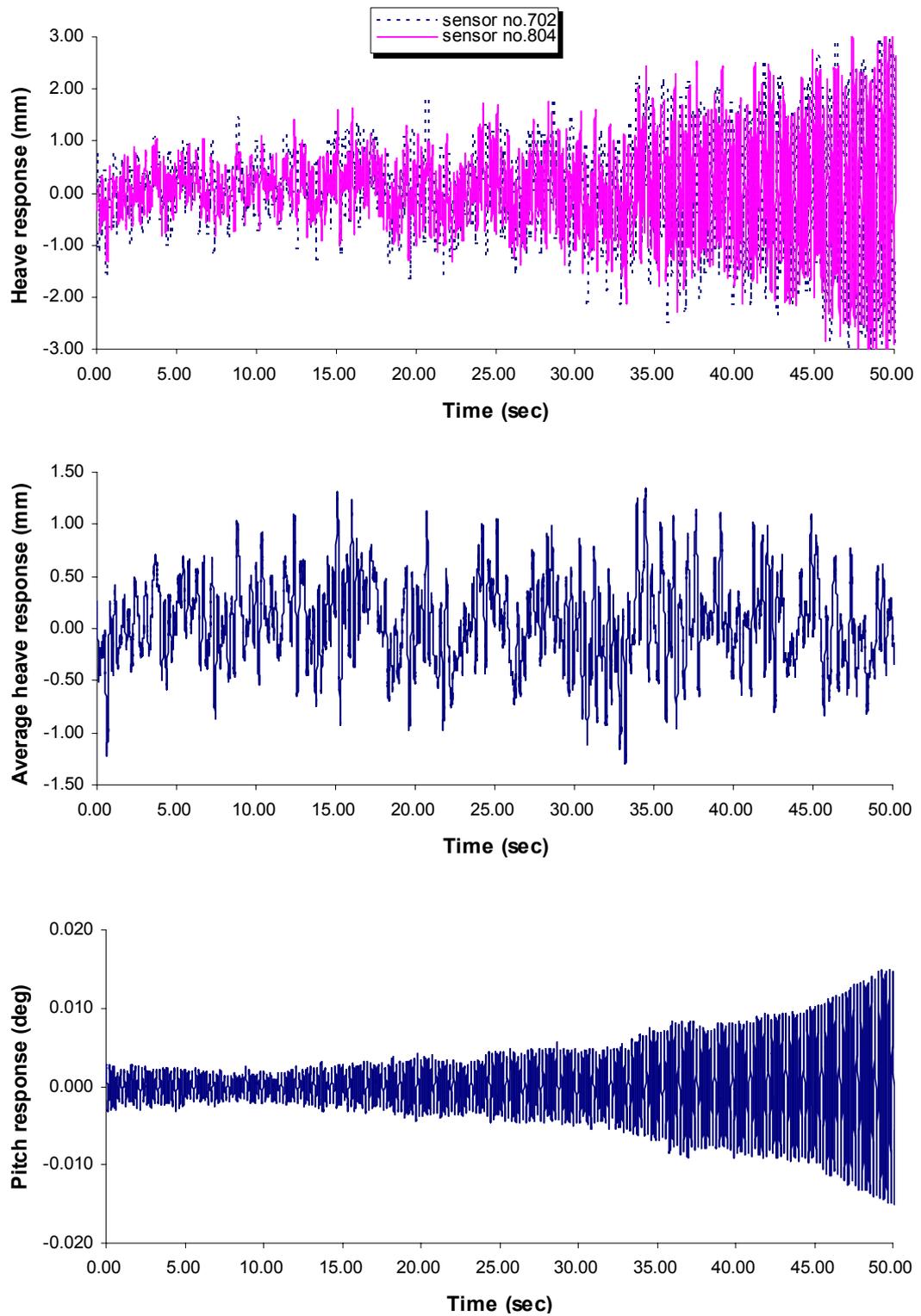
รูปที่ ค.20 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 9.94 m/s
(เกิด Flutter instability) หลังติดตั้งTMD มวล 1%



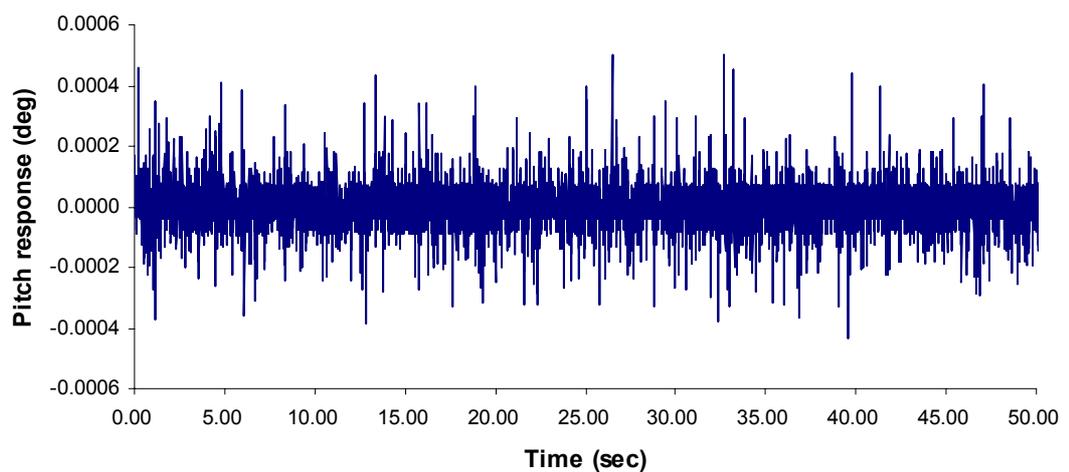
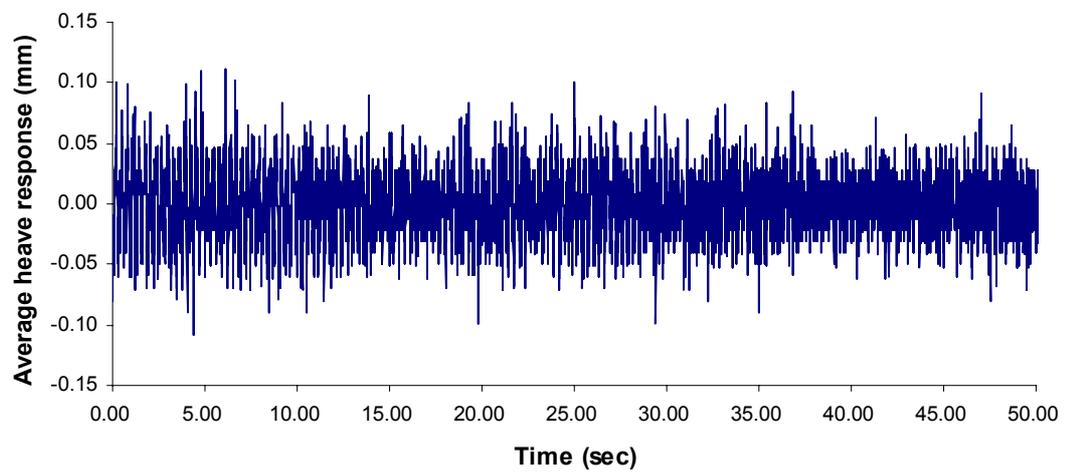
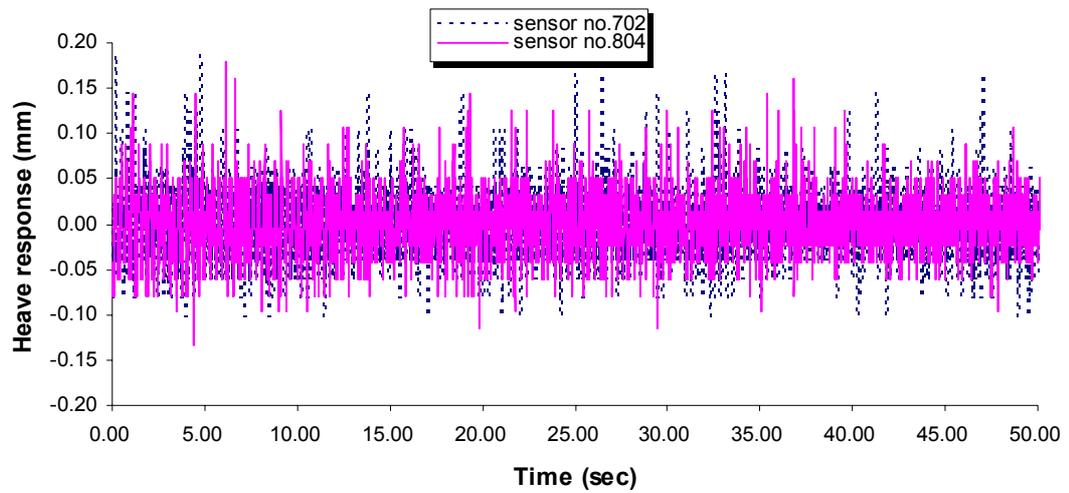
รูปที่ ค.21 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s
หลังติดตั้งTMD มวล 2%



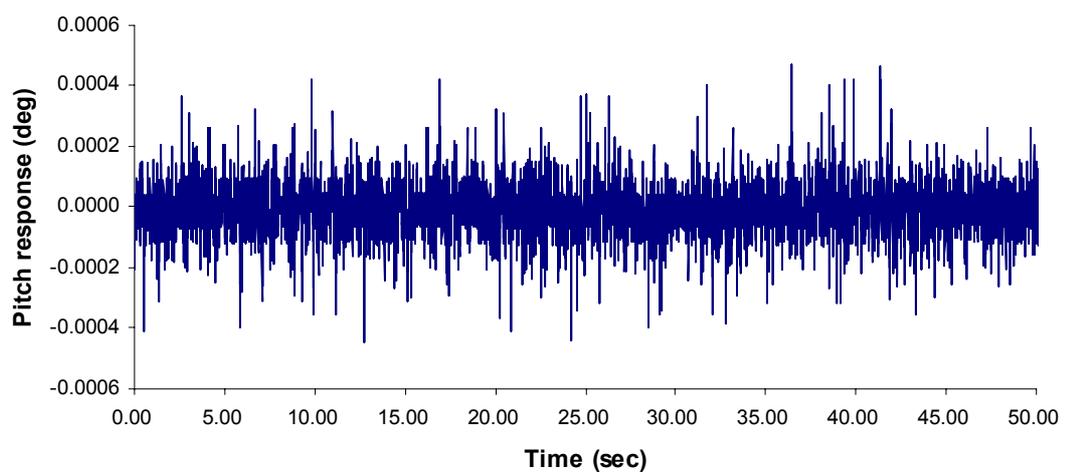
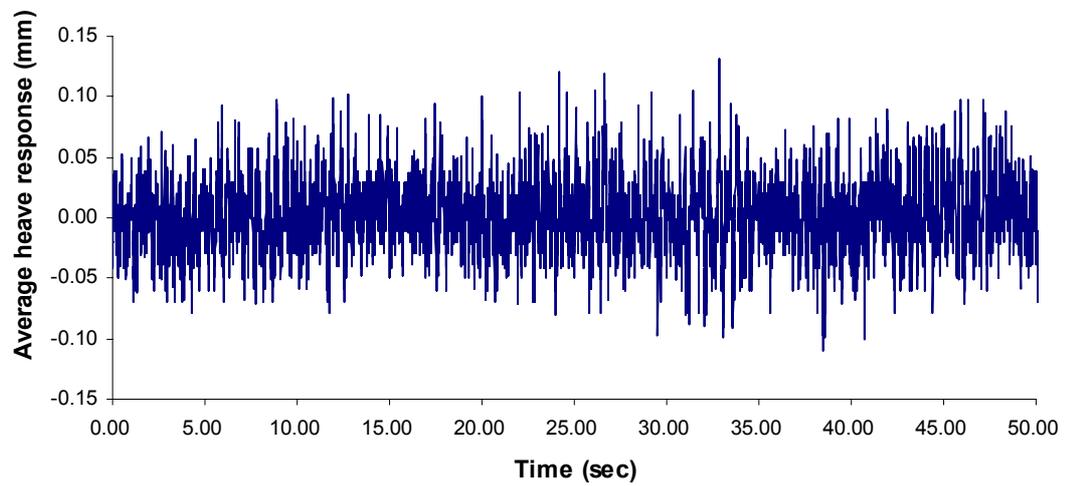
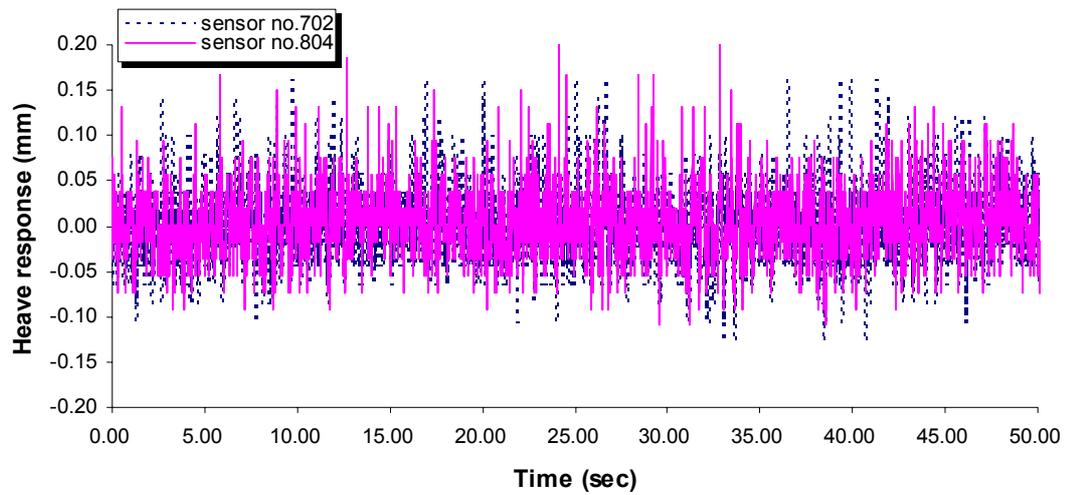
รูปที่ ค.22 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s (ผลของ Vortex shedding ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ ค.17) หลังติดตั้ง TMD มวล 2%



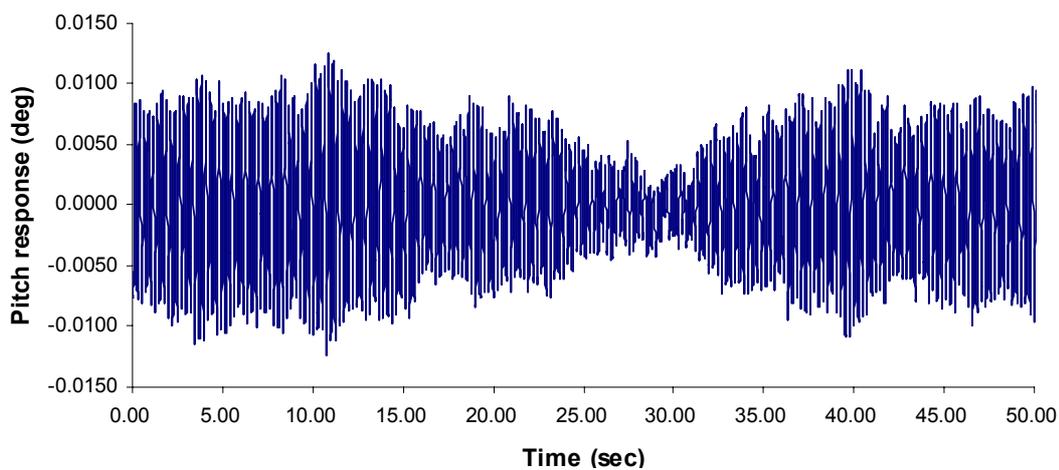
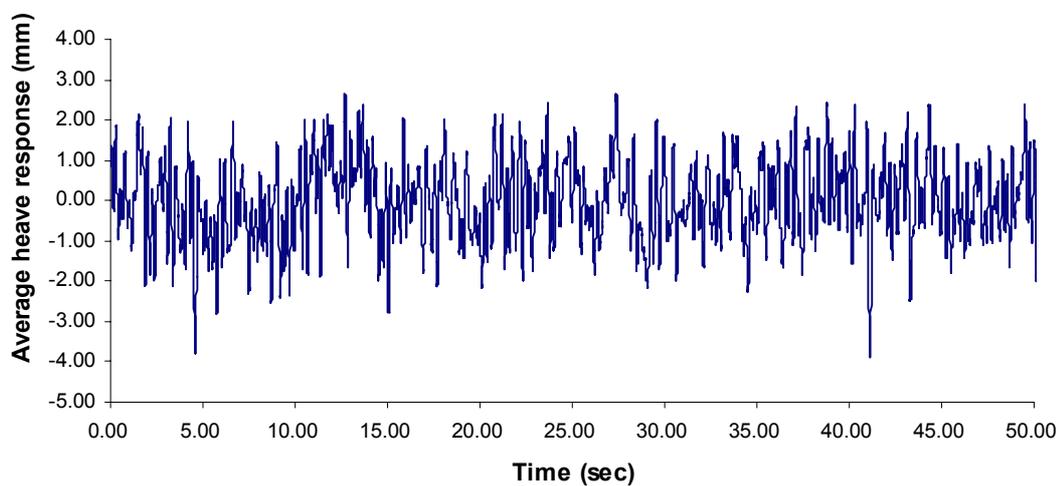
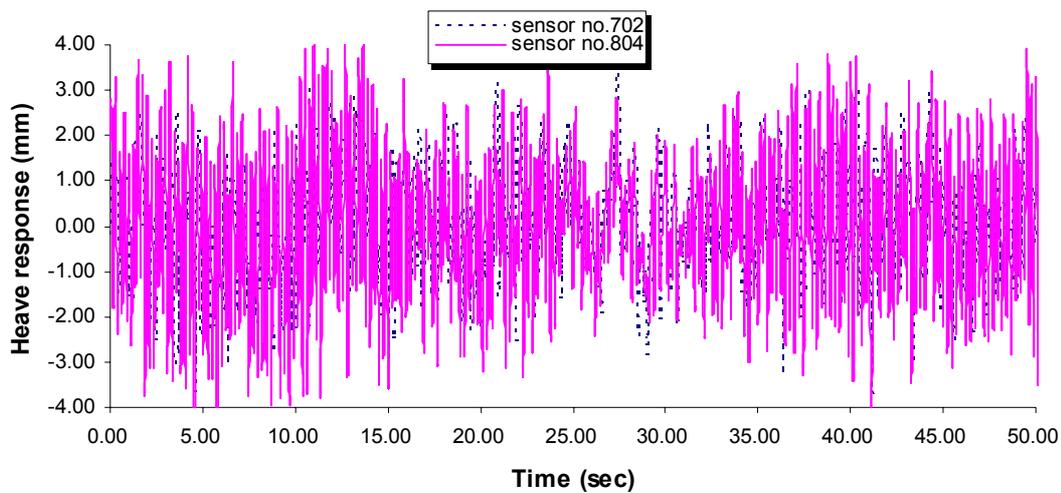
รูปที่ ค.23 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 9.07 m/s
(เกิด Flutter instability) หลังติดตั้งTMD มวล 2%



รูปที่ ค.24 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 0.65 m/s
หลังติดตั้งTMD มวล 4%



รูปที่ ค.25 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 2.94 m/s (ผลของ Vortex shedding ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ ค.17) หลังติดตั้ง TMD มวล 4%



รูปที่ ค.26 สัญญาณการตอบสนองของสะพานวงแหวนอุตสาหกรรมที่ความเร็ว 13.61 m/s
(เกิด Flutter instability) หลังติดตั้งTMD มวล 4%

ผนวก ง

โปรแกรม laser_ring_cov.m ในการหาความถี่ในการสั่นและความหน่วงของสะพาน
(Tharat Janesupasaeree, 2008)

```

clear;clc;
%clear figure
diary('Result.txt');diary on

disp('Input')
disp('====')
    NumSet = input(' Num.Set of Ambient-Vibration
Responses[Note,must be 6columns/Set] :: ');
    %% Method = input(' Identification By RD+ERA=1,NEXT+ERA=2 ::
');%%
    l = input(' Num. of channel :: ');
disp('Process Data')
disp('=====')

disp(' Load Ambient-Vibration Responses');
%===== Load Responses Data
%=====
NumRes = 1;LongFree = 1600;
for i=1:NumSet;clear Data
    fprintf(' - Load Set %0.f => ',i);
    [Fname,Pname]=uigetfile('*.out;*.txt','Select file');
    FID=[Pname,Fname];disp(FID);
    FID=fopen(FID,'rt');
    %Data=fscanf(FID,'%f',[NumRes,inf]);%Num.Signal*Long

Data=fscanf(FID,'%f');Fs(i)=Data(1);dt(i)=1/Fs(i);Data=reshape(Data(2
:end),NumRes,[]);
    %Dat_tm=Data(2:end,:);clear Data
    Data=Data';
    %convert to displacement by factor 0.02 m / volt
    Data(:,1)=Data(:,1)*0.207; % no.072
    Data(:,2)=Data(:,2)*0.185; % no. 084

    % calculate vertical & torsional disp
    ver=(Data(:,1)+Data(:,2))/2;
    tor=(Data(:,1)-Data(:,2))/0.38;

    %% Reduce sampling rate to 10 times lesser than original to get
better

    r_ver = decimate(ver,4);
    r_tor = decimate(tor,4);
    Fs =Fs/4
    dt = dt*4
    %r_ver1 = decimate(r_ver,2);
    %r_tor1 = decimate(r_tor,2);

```

```

%Fs =Fs/2
%dt = dt*2
clear Data
Data(:,1)=r_ver;
Data(:,2)=r_tor;

%%%%%%%%% save data to fourier transform ( not yet deduct mean)
%ya = Data;

%deducted mean
Data = DTREND(Data);

Data = Data';
%Data(:,:)=Data-ones(size(Data))*diag(mean(Data));

% Data=Data'
[m,n]=size(Data);
figure(1)
for k=1:l
subplot(1,1,k);plot(1:n,Data(k,:));hold on;
xlabel('timestep');hold on
end
% Deducted mean
%Data(:,:,i) = Data-ones(size(Data))*diag(mean(Data))
end
y = Data; % save data in y %

clear Data;
% sub routine to deduct mean of data
% y = y';
%y = DTREND(y);
% y=y'
% %%%%%%%%%%%%%call frequency analysis%%%%%%%%%%%%
[FouAmp,Freq]=Analysis(y,Fs,Fname);
i=1;

figure(4)
PlotSpectral(FouAmp,Freq,i);hold on
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% start ssi_cov method%
disp('=====')
disp('start ssi_cov method')
disp('=====')
% General subspace identification
% -----
%i_min = input(' min Num. of block rows :: ')
%i_max = input(' max Num. of block rows :: ')
%i_inc = input(' increm Num. of block rows :: ')
%         i: number of block rows in Hankel matrices
%         (i * #outputs) is the max. order that can be estimated
%         Typically: i = 2 * (max order)/(#outputs)

if (i < 0);error('Number of block rows should be positive');end

```

```

if (l < 0);error('Need a non-empty output vector');end

%for i=i_min:i_inc:i_max
for i=100:100
[l,ny] = size(y)
m = 0;
disp('Number of data');ny
disp('total time record(s)');ny*dt

%if ((ny-2*i+1) < (2*1*i));error('Not enough data points');end
if ((ny-2*i) < (2*1*i));error('Not enough data points');end
% Determine the number of columns in the Hankel matrices
%j = ny-2*i+1;
j = ny-2*i
%j=10000

% Compute the Y-Hankel matrix(output Hankel matrix)

Y = blkhank(y/sqrt(j),2*i,j);      % Output block Hankel

% Compute the future & past Y-Hankel matrix(output Hankel matrix)

Yp = Y(1:l*i,:);
Yf = Y((l*i)+1:l*2*i,:);
% Yp = Yp/sqrt(j);
% Yf = Yf/sqrt(j);

% Compute Toeplitz matrix: T1/i of covariance

T1i = Yf*Yp';

% Compute the next-Y-Hankel matrix(output Hankel matrix)

Y = blkhank(y/sqrt(j),2*i+1,j);   % Output block Hankel
%Yp = Y(1:l*i,:);
Yf = Y(1*(i+1)+1:l*(2*i+1),:);

% Compute Toeplitz matrix: T2/i+1 of covariance

T2i1 = Yf*Yp';
% Compute singular value
for jk=1:NumSet;
[Rm Sm]=size(y);%Rm=ceil(800/Rm);
Rm=i; Sm=i;
Nres=size(y,1);
[R D S]=svd(T1i);
%dia=diag(D)/D(1,1);Diff=log10(dia(1:100-1))-
log10(dia(2:100));Diff(1:2)=0;
%dia=diag(D)/D(1,1);Diff=log10(dia(1:50-1))-
log10(dia(2:50));Diff(1:2)=0;
dia=diag(D)/D(1,1);Diff=log10(dia(1:(l*i)-1))-
log10(dia(2:(l*i)));Diff(1:2)=0;
[Val Or]=sort(Diff);Order1=sort(Or(end-(2*1):end)); %%
select 6 largest difference of singular

```

```

        %Plot singular value graph, this singular are normalized by
the largest one*****
        %figure(2);semilogy([1:50],dia(1:50)*D(1,1),'-*'); %plot only
50 values
        figure(2);semilogy([1:(2*i)],dia(1:(2*i))*D(1,1),'-*'); %plot
only 30 values
        xlabel('System-Order'); ylabel('Normalized Singular Value');
title('Singular Value Graph');

%*****

        %for pp=1:length(Order1);clear Fn_ERA Sn_ERA Shape_ERA Result
Identify
        for pp=1:10;clear Fn_ERA Sn_ERA Shape_ERA Result Identify
            %Order=Order1(pp);clear Identify
            Order=2*pp

            Rn=R(:,1:Order);    Dn=D(1:Order,1:Order);
Sn=S(:,1:Order);
            EmT= eye(Nres, (Rm)*Nres);    Er= eye(Sm,1);

            %The System-
Matrix*****
            A=(Dn^-0.5)*Rn'*T2i1*Sn*(Dn^-0.5);    [vecERA valERA] =
eig(A);
            EigenValue=eig(A);
            C=EmT*Rn*(Dn^0.5);Shape=C*vecERA;

%*****
%*****
            %*****calculate system
matrix*****
            Shape=C*vecERA;
% mode shape
            Ac=logm(A)/(dt);
            l_valERA=logm(valERA)/(dt);
% continuous eigenvalue
            A1=[Shape*(l_valERA)
conj(Shape)*(conj(l_valERA));Shape*(l_valERA)^2
conj(Shape)*(conj(l_valERA))^2];

            %% A1= mode shape matrix(W) multiply with continuous
            %% eigenvalue(A)
            %% matrix = [ WA W*A*
            %% WA^2 W*A^2]

            %A1=[Shape*(l_valERA)^2 conj(Shape)*(conj(l_valERA))^2]
            B1=[Shape conj(Shape);Shape*l_valERA
conj(Shape)*(conj(l_valERA))];
            B2=pinv(B1);
            %M=[1 0 0 0 ;0 1 0 0;0 0 1 0; 0 0 0 1];
            %M=[1 0 ;0 1 ]

```

```

        SYS_M=A1*B2;                               %==>SYS_M = Matrix Ac=[0I
%-inv(M)Ke  -inv(M)Ce ]

        % end loop calculate systemmatrix
*****
*
        Conj=0;
        for ij=1:Order-1
            if abs(valERA(ij,ij))-
abs(valERA(ij+1,ij+1))==0;Conj=[Conj ij];end
        end
        Conj=Conj(:,2:end);

        Lamda=logm(valERA)/dt(jk);
        f=1/dt(jk);
        for ik = 1:length(Conj);

            %re = real(valERA(Conj(i),Conj(i)));      im =
            imag(valERA(Conj(i),Conj(i)));
            %ak = (1/(2*dt(jk)))*log(re^2+im^2);      bk =
            (1/(dt(jk)))*atan(im/re);
            re = real(Lamda(Conj(ik),Conj(ik)));      im =
            imag(Lamda(Conj(ik),Conj(ik)));
            ak = re ;  bk = im ;
            Fn_ERA(ik) = sqrt(ak^2 +
bk^2)/(2*pi);%Wn_ERA(i)=Fn_ERA(i)*(2*pi)
            Sn_ERA(ik) = 100*sqrt(1/(1+(bk/ak)^2));
            %Sn_ERA(i) = 2*pi*-ak/(sqrt(ak^2 + bk^2)); % Log
decrement
            %Sn_ERA(i) = 100*(-ak/sqrt(ak^2 + bk^2)); % damping ratio
in %

            for ii =1:Nres
                for j = 1:length(Conj);Shape_ERA(ii,j) =
abs(Shape(ii,Conj(j))) *sign(real(Shape(ii,Conj(j)))));end
            end

            %Mode Shape
            for in = 1:length(Conj)
                %Shape_ERA(1:2,in) =
                Shape_ERA(1:2,i)./sign(Shape_ERA(1,in));
                %Shape_ERA(3:4,in) =
                Shape_ERA(3:4,i)./sign(Shape_ERA(3,in));
            end

            %Rearrange parameters
            [W1 W2]=sort(Fn_ERA);
            Result=[Fn_ERA;Sn_ERA;zeros(1,size(Shape_ERA,2));Shape_ERA];

            for ik =1:length(Conj)
                Identify(:,ik)=Result(:,W2(ik));

```

```

figure(3)

subplot(2,1,1),plot(Identify(1,ik),Order,'r+',(Identify(2,ik)/100),Order,'b*'),axis tight; hold on

subplot(2,1,2),plot(Identify(1,ik),Order,'r+',(Identify(2,ik)/100),Order,'b*'),axis tight; hold on

        %i=1;
        %PlotSpectral(FouAmp,Freq,i);hold on

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Parameters Exhibition
fprintf(' : At number of block = %0.f \n',i);
fprintf(' : At System-Order = %0.f \n',Order);%disp('-----');

        disp(Identify)                                % modal freq in
Hz, modal damping in percent%
        disp('SYSTEM MATRIX')
        %format bank
        disp(SYS_M)
        format short
end%Loop pp
        %hold off
        %%%%%%%%% plot stabilize
chart%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %%%%%%%%% create scale plot%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %this subsection for making nice looking of
stabilizechart
        maxFrq1=max(FouAmp(:,1));
        maxFrq2=max(FouAmp(:,2));
        maxpp=max(pp);
        rat1 = maxpp*2/maxFrq1;
        rat2 = maxpp*2/maxFrq2;
        figure(3)
        subplot(2,1,1),plot(Freq(:,1),FouAmp(:,1)*rat1,axis
tight,xlabel('Frequency'),Title('CH1'),ylabel('Fourier Amplitude'));
        subplot(2,1,2),plot(Freq(:,1),FouAmp(:,2)*rat2,axis
tight,xlabel('Frequency'),Title('CH2'),ylabel('Fourier Amplitude'));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        end % Loop jk ( number of set data)
        % Lamda = log(EigenValue)/(dt)
end %loop of i that vary number of block rows

```



```
%*****  
*****  
        %Chk  = input(' Try another order [Y=1] or [N=2] :: ');  
        %fprintf(' : At System-Order = %0.f \n',Order);  
        %Ac=log(A)/(dt)  
    end % end loop of find A  
    %else  
%end  
diary off
```

บรรณานุกรม

- พีระศักดิ์ พานิชไตรภพ. “การควบคุมการสั่นของสะพานแขวนช่วงยาวด้วยมวลหน่วงที่เหมาะสม.”
วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2543.
- โสภาค กาญจนโสธ. “ตัวหน่วงแบบไม่เชิงเส้นที่เหมาะสมสำหรับระบบมวลหน่วง.” วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2543.
- สุกิตย์ เทพมัทธ, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และวรศักดิ์ กนกนุกุลชัย.
“การศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารพัทธพาร์ค ทาวเวอร์ เมื่อรับแรงลม โดยการ
ทดสอบในอุโมงค์ลม.” เอกสารการประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2537,
2337 (ตุลาคม 2537) : 239-259.
- สุกิตย์ เทพมัทธและ Kenny C.S. Kwok. “การทดสอบแบบจำลองอาคารสูงในอุโมงค์ลมและการ
จำลองการโยกตัวของอาคารโดยวิธี Base Hinged Assembly.” *Engineer
Transactions* 1998 (July-October 1998): 265-277.
- อดุลย์ อักษร. “การวิเคราะห์ Aerodynamics และการควบคุมการสั่นไหวของสะพานแขวนช่วง
ยาว.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2546.
- Aerodynamics Committee of Aerospace Division. Wind Tunnel Studies of Buildings
and Structures. Reston:ASCE, 1978.
- Ayorinde, E.O., and Warburton, G.B. (1980), "Minimizing Structural Vibrations with
Absorbers" J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 8, pp.
219-236.
- Boonyapinyo, V., Miyata, T. and Yamada, H., “Advanced Aerodynamic Analysis of
Suspension Bridge by State-Space Approach.” J. of Structural Engineering.
(December 1999) : 1357-1366.
- Brownjohn J.M.W., (1994), Estimation of Damping in Suspension Bridges, Buildings
Struct. Proc. Inst. Civil Eng., 104,. pp. 401–415
- Clough, R.W. and Penzien, J. Dynamics of Structures. 2d ed. New York: McGraw-
Hill,1993.

- DMI., "Wind-Tunnel Study for IRR Cable-Stayed Bridges." Final Report., IRR Project Consultants J.V., Bangkok, July 1997.
- Davenport A.G., King J.P.C. and Larose G., (1992), Taut strip model testing, Aerodynamics of Large Bridges, Balkema, Rotterdam.
- Den Hartog, J.P. Mechanical Vibrations. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- DMI., "Wind-Tunnel Study for IRR Cable-Stayed Bridges." Final Report ., IRR Project Consultants J.V., Bangkok, July 1997.
- Gu, M., Chang, C.C., Wu, W., and Xiang, H.F. (1998) "Increase of Critical Flutter Wind Speed of Long – Span Bridges Using Tuned Mass Damper" J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 73 , 111-123.
- Gu, M., Chang, C.C., Wu, W., and Xiang, H.F. (1998) "Increase of Critical Flutter Wind Speed of Long – Span Bridges Using Tuned Mass Damper" J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 73 , 111-123.
- Hjorth-Hansen E.. (1992), Section model tests, Aerodynamics of Large Bridges, Balkema, Rotterdam.
- Igusa, T., and Xu, K. "Vibration Reduction Characteristics Distributed Tuned Mass Dampers." Proceeding of the 4th International Conference, (1991): 596-605.
- Dinh Manh Duc. "Wind Tunnel Model Test of a Cable-Stayed Bridge in the South of Vietnam." Master's thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand, 2002.
- Praveen K.Malhotra. "Tuned Mass Damper(TMD) For Suppressing Wind Effects in Cable Stayed Bridge Decks." Master's thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand, 1987.
- McNamara, R. J. "Tuned Mass Damper of Buildings." J. of Struct. Div., ASCE, Vol.103,ST9(1977): 1758-1798.
- Simiu, E. and Scanlan, R.H. Wind Effects on Structures. 3rd ed, New York : John Wiley & Sons, 1996.
- Tharat Janesupasaeree., "Aerodynamic Response of Cabled Supported Bridge in Wind Tunnel Test." Progress of Doctoral dissertation, School of Civil Engineering, Thammasat University, Thailand, 2008.