

การศึกษาการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ

อานนท์ นิยมสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ อานนท์ นิยมสุข ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)



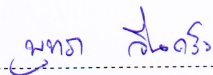
..... กรรมการ

(ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)



..... กรรมการ

(ดร. อมรชัย ไยรงค์)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พุทธา จินคร้ว)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 16 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ ต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เนื่องจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่มีนโยบายส่งเสริมบุคคลที่มีผลการเรียนดีเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรระดับมหาบัณฑิต และได้มอบทุนการศึกษาให้แก่ผู้วิจัยตลอด การศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 108/2558 จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออุบล นิยมสุข คุณแม่รัศมี ปานแดง และญาติพี่น้องทุกคนที่ ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแด่ บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

อานนท์ นิยมสุข

56910174: สาขาวิชา: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ความถี่ธรรมชาติของสะพาน/ ยานพาหนะเคลื่อนที่/ ผลตอบสนองความเร่ง/

การทดสอบแบบทางอ้อม/ แบบจำลองย่อส่วน

อานนท์ นิยมสุข: การศึกษาการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนอง

ความเร่งของยานพาหนะ (A STUDY OF BRIDGE NATURAL FREQUENCY

IDENTIFICATION FROM VEHICLE ACCELERATION RESPONSE) คณะกรรมการควบคุม

วิทยานิพนธ์ : พัทธพงษ์ อาสนจินดา, ปร.ด. 150 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบทางอ้อม และพิจารณารูปแบบการสัจจรที่เหมาะสมในการประยุกต์ การระบุความถี่ของสะพานทำได้ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และใช้วิธีการแยกรูปแบบสัญญาณเชิงสังเกตุในการจำแนกความถี่ยานพาหนะและความถี่สะพานจากการคัดแยกความถี่ที่ไม่พึงประสงค์ออกจากสัญญาณตรวจวัด ด้วยเหตุนี้ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจึงสามารถระบุได้ โดยได้จากความชัดเจนของความถี่ในช่วงที่เป็นไปได้ งานวิจัยได้ทำการศึกษาด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แบบจำลองย่อส่วน เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วในการสัจจร มวลของยานพาหนะ ความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะ และการสัจจรในช่องจราจรที่แตกต่างกัน รวมถึงพิจารณาคุณลักษณะของยานพาหนะที่เหมาะสมในการทดสอบ

จากผลการศึกษา พบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถช่วยวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบว่าค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้เป็นความถี่ที่มีค่าสอดคล้องกันกับพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานที่ได้จากการวัดที่โครงสร้างสะพาน โดยตรง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการทดสอบทางอ้อมที่สามารถทำการตรวจวัดที่ยานพาหนะแทนการตรวจวัดที่สะพาน โดยตรงได้ จากผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 94.44% พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากการใช้ยานพาหนะต่อพ่วงและยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อพ่วงเท่ากับ 11.57% และ 7.36% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการ ใช้ยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อพ่วงในการตรวจวัดให้ผลที่ดีกว่ากรณีที่ใช้ยานพาหนะต่อพ่วง ทั้งนี้ความเร็วในการสัจจรที่เหมาะสมต่อการทดสอบในทุกช่องจราจร โดยไม่ส่งผลต่อระดับความคลาดเคลื่อนได้แนะนำที่ความเร็วประมาณ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

56910174 : MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng.

KEYWORDS: BRIDGE NATURAL FREQUENCY/ MOVING VEHICLE/
ACCELERATION RESPONSE/ INDIRECT TEST

AR-NON NIYOMSUK: A STUDY OF BRIDGE NATURAL FREQUENCY
IDENTIFICATION FROM VEHICLE ACCELERATION RESPONSE. ADVISORY
COMMITTEE: PATTARAPONG ASNACHINDA, Ph.D. 150 P. 2016.

This research studied the determination of bridge natural frequency from acceleration response of the passing vehicle. The objectives were to develop the approach of efficiency improvement of bridge natural frequency identification by indirect testing method, and to consider appropriate patterns of vehicle travel for application. The bridge frequency could be identified by Fast Fourier Transformation. Moreover, the Empirical Mode Decomposition technique was applied to specify the vehicle and bridge frequencies by extraction unwanted frequencies from the measured signal. Consequently, the bridge natural frequency was identified in accordance with possibility range of frequencies. The research was experimentally studied in the laboratory using Scale-down Model. Various effects of related parameters such as moving speed, vehicle mass, vehicle fundamental frequency, travel path as well as the appropriate vehicle characteristic were considered.

Regarding to the result of this study, it was found that the proposed method effectively improves bridge natural frequency identification. It was revealed that analyzed bridge frequency is consistent directly with bridge vibration by observation at the bridge structure. Consequently, it could be confirmed as the hypothesis of the indirect test which said that the measurement can be done at the vehicle instead. According to the experimental result, it was observed that at the 94.44% confidence level, the errors of bridge natural frequency identification by using a tractor-trailer and vehicle without cart are 11.57% and 7.36%, respectively. It could be concluded that using vehicle without cart was better than tractor-trailer. Finally, the appropriate moving speed for testing in any traffic lanes without affecting to the error was recommended at 50 km/hr approximately.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย.....	1
งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	2
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	11
ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	12
การดำเนินงานวิจัย	12
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
ความถี่ธรรมชาติของสะพาน	13
การหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน	13
ทฤษฎีของการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม...	17
ทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณ	24
3 วิธีการศึกษา.....	32
การศึกษาเชิงตัวแปรจากการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน	32
การออกแบบและติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนและอุปกรณ์ตรวจวัด	32
พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา.....	43
รูปแบบการทดสอบ	45
การดำเนินการทดสอบ.....	54
วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน	56
ขั้นตอนการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ ของยานพาหนะ	63

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการศึกษาการหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความเร่งของ ยานพาหนะต่อพ่วง	65
การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ ต่อพ่วง	65
พฤติกรรมของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะขณะเคลื่อนที่.....	65
ผลของพารามิเตอร์และรูปแบบของการตรวจวัดที่มีผลต่อการระบุความถี่ ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะต่อพ่วง.....	70
ผลของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมด้วย ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่.....	81
5 ผลการศึกษาการหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความเร่งของ ยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อ.....	89
การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่ ปราศจากส่วนต่อพ่วง	89
การศึกษาพฤติกรรมของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะ เคลื่อนที่และผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	89
ผลของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมด้วย ยานพาหนะเคลื่อนที่	97
ความคลาดเคลื่อนจากการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานและแนวทางใน การปรับแก้.....	103
6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	111
สรุปผลการศึกษา	111
ข้อเสนอแนะ	113
บรรณานุกรม.....	114
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก	117
ภาคผนวก ข	139
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	150

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ	24
3-1 ขนาดและสัดส่วนของยานพาหนะจำลอง	36
3-2 น้ำหนักของยานพาหนะจำลองที่เทียบเท่ากับยานพาหนะจริงที่กระทำกับสะพาน เมื่อพิจารณาผลของความเครียด.....	38
3-3 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
3-4 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของยานพาหนะทดสอบ	46
3-5 การทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนว กึ่งกลางสะพาน.....	48
3-6 การทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนว ช่องจราจรด้านริมสะพาน.....	49
3-7 การทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ไปพร้อมกับยานพาหนะอื่น	51
3-8 การทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนว กึ่งกลางสะพาน.....	52
3-9 การทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนว ช่องจราจรด้านริมสะพาน.....	52
4-1 ผลการทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ของสะพาน.....	69
4-2 ตัวอย่างรูปแบบผลจากการทดสอบและการใช้วิธีพิจารณาเพื่อช่วยในการระบุความถี่ ธรรมชาติของสะพาน	80
4-3 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพานของชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ ต่ำกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ	82
4-4 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพานของชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ สูงกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ.....	82
4-5 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวด้านริมสะพานของชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ ต่ำกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ	85
4-6 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวด้านริมสะพานของชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ สูงกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-7 ผลการทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานไปพร้อมกับ ยานพาหนะอื่นในแนวกึ่งกลางสะพาน.....	88
5-1 ตัวอย่างรูปแบบผลจากการทดสอบและการใช้วิธีพิจารณาเพื่อช่วยในการระบุความถี่ ธรรมชาติของสะพาน	96
5-2 ผลการทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวกึ่งกลางสะพาน ...	99
5-3 ผลการทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวด้านริมสะพาน.....	101
5-4 ผลการปรับแก้ของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวกึ่งกลาง สะพาน	105
5-5 ผลการปรับแก้ของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวด้านริม สะพาน	105
5-6 ผลการปรับแก้ด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพาน ในแนวกึ่งกลางสะพาน.....	107
5-7 ผลการปรับแก้ด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพาน ในแนวด้านริมสะพาน	107

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 สเปกตรัมความถี่ของยานพาหนะจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิมเม้นท์.....	2
1-2 ผลของผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะที่ถูกแยกเป็นหลายโหมดด้วยวิธี EMD...	4
1-3 ผลตอบสนองจากยานพาหนะที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม (ที่ไม่ได้ผ่าน EMD) ...	5
1-4 สเปกตรัมของผลตอบสนองความถี่ที่ถูกแยกย่อยด้วยวิธี EMD ในโหมดต่าง ๆ.....	6
1-5 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะเคลื่อนที่.....	9
1-6 สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดของกรณีที่ไม่ผ่านการกรองสัญญาณและกรณีผ่านการกรองสัญญาณ	10
2-1 เครื่องให้การสั่นสะเทือนในแนวดิ่งที่ถูกติดตั้งบนสะพาน.....	14
2-2 สัญญาณความถี่จากการตรวจวัดบนสะพานที่ถูกให้แรงด้วยเครื่องให้การสั่นสะเทือน	15
2-3 สัญญาณการตรวจวัดที่สะพานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ	16
2-4 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณตรวจวัดสะพานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ.....	16
2-5 ตัวอย่างการตรวจวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์ด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม.....	17
2-6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน	18
2-7 ตัวอย่างการสร้างเส้นกรอบและการเฉลี่ยเส้นกรอบ.....	27
2-8 ตัวอย่างการแยกสัญญาณด้วยวิธี EMD.....	29
2-9 การกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน	29
2-10 การกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน.....	30
2-11 การกรองสัญญาณแบบช่วงผ่าน	30
2-12 การกรองสัญญาณแบบช่วงหยุด.....	31
3-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงสะพาน	33
3-2 ชุดสะพานจำลองย่อส่วน.....	35
3-3 ลักษณะและขนาดรถบรรทุกยี่ห้อ Hino รุ่น FC9JELA ที่ใช้สำหรับย่อส่วน	36
3-4 ลักษณะของยานพาหนะจำลองย่อส่วน	36
3-5 แบบจำลองแรงกระทำแบบจุดที่เกิดขึ้นในคันทั่วไป	37

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-6 แบบจำลองโมเมนต์คัตเมื่อมีแรง P มากกระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน	37
3-7 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง	39
3-8 เกจวัดความเครียด	39
3-9 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด	40
3-10 อุปกรณ์แปลงสัญญาณแบบบริดจ์ซึ่งใช้กับหัววัดการเปลี่ยนตำแหน่งหรืออุปกรณ์ ตรวจวัดความเร่ง	40
3-11 อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178	41
3-12 อุปกรณ์ชักลากยานพาหนะจำลองและชุดควบคุมความเร็ว.....	41
3-13 ผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด.....	42
3-14 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด.....	43
3-15 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด.....	43
3-16 สัญญาณความเร่งและการแปลงสัญญาณด้วย FFT ของการหาค่าความถี่ธรรมชาติและ สัดส่วนความหน่วงของสะพานทดสอบเบื้องต้น	46
3-17 ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวกึ่งกลาง.....	47
3-18 ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวช่องจราจรด้านริมของสะพาน.....	49
3-19 กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานนำหน้ายานพาหนะคันอื่น.....	50
3-20 กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานตามหลังยานพาหนะคันอื่น.....	50
3-21 กรณีที่ยานพาหนะปราศจากส่วนต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนว กึ่งกลางสะพาน	51
3-22 แผนภาพสรุปการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม.....	53
3-23 สัญญาณความเครียดที่ได้จากเกจวัดความเครียด	55
3-24 สัญญาณผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่บันทึกได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด.....	55
3-25 สัญญาณผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่พิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่ยานพาหนะ อยู่บนสะพานทั้งสองเพลลา.....	56
3-26 สัญญาณความเร่งที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณและสัญญาณความเร่งที่ผ่าน การกรองสัญญาณ	57
3-27 ตัวอย่างผลของการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว.....	58

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-28 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและสัญญาณที่ผ่านวิธี EMD.....	58
3-29 สัญญาณที่ผ่านการแยกองค์ประกอบด้วยวิธี EMD.....	59
3-30 สเปกตรัมของสัญญาณ IMF 1 ถึง IMF 6	60
3-31 สเปกตรัมของสัญญาณ IMF 7 ถึง IMF 11	61
3-32 ตัวอย่างการคัดแยกสัญญาณความเร่งของยานพาหนะออกจากสัญญาณตรวจวัด.....	62
3-33 ตัวอย่างสเปกตรัมความเร่งของการแยกองค์ประกอบความถี่ของยานพาหนะออกจาก สัญญาณตรวจวัด.....	62
3-34 ขั้นตอนในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่ง ของยานพาหนะ.....	64
4-1 สัญญาณความเร่งของยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ	66
4-2 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ.....	66
4-3 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของสะพานและยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ ข้ามสะพานด้วยความเร็วเทียบเคียงพฤติกรรมจริงที่ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ณ ตำแหน่ง กึ่งกลางสะพาน	68
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสะพานกับสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวล ของสะพาน	69
4-5 ผลของความเร็วของการสัญจรที่มีต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน ด้วยวิธีทางอ้อม.....	71
4-6 ผลของมวลของยานพาหนะที่มีต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน ด้วยวิธีทางอ้อม.....	72
4-7 ตัวอย่างผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วง ที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพานเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน	73
4-8 ตัวอย่างผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วง ที่มีความถี่สูงกว่าสะพานเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน.....	74
4-9 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพ่วงในแนวกึ่งกลางสะพาน.....	75
4-10 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพ่วงในแนวด้านริมสะพาน	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-11 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานนำหน้า ยานพาหนะคันอื่นในแนวกึ่งกลางของสะพาน.....	77
4-12 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานตามหลัง ยานพาหนะคันอื่นในแนวกึ่งกลางของสะพาน.....	78
4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจร และสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพาน.....	83
4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจร และสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพาน	84
4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจร และสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพาน.....	86
4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจร และสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพาน	87
5-1 สัญญาณความเร่งของยานพาหนะหลักที่เคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ.....	90
5-2 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ.....	91
5-3 สัญญาณความเร่งของสะพานและยานพาหนะที่ได้จากการทดสอบ	92
5-4 ผลของการแปลงสเปกตรัมความเร่งของสะพานและยานพาหนะ ที่ความเร็วในการสัญจร 0.70, 1.49 และ 2.15 เมตรต่อวินาที ของกรณีสัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน	93
5-5 สัญญาณความเร่งของผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะของ กรณีสัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน.....	94
5-6 สเปกตรัมความเร่งของผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะของ กรณีสัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน.....	94
5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและ สัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณียานพาหนะหลักตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพาน....	100
5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและ สัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณียานพาหนะหลักตรวจวัดในแนวด้านริมสะพาน.....	102
5-9 ผลการปรับแก้ความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีตรวจวัดใน แนวกึ่งกลางสะพาน	108

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-10 ผลการปรับแก้ความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีตรวจวัดใน แนวด้านริมสะพาน	108

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย

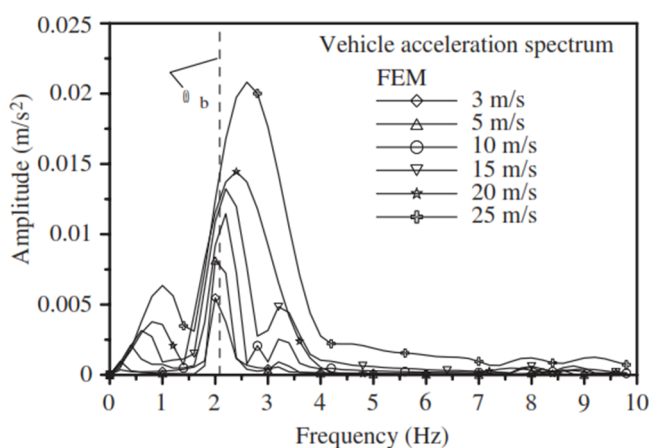
ปัจจุบันการคมนาคมและขนส่งทางรถยนต์เป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อน การขยายตัวทางเศรษฐกิจ และสังคมของประเทศ ดังนั้นสะพานเป็นสิ่งจำเป็นตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีส่วนช่วยในการพัฒนาความเจริญเติบโตทางสังคมเป็นอย่างมาก สะพานที่ถูกใช้ในปัจจุบันมีรูปแบบหลากหลายออกไป อาทิเช่น สะพานแบบคาน สะพานแบบโค้ง สะพานแบบแขวน และ สะพานแบบซ้อหมุนหรือโครงถัก เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสะพานที่เปิดการใช้งานไปแล้วในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการเสื่อมสภาพ และการเสียหายของตัวโครงสร้าง ซึ่งต้นเหตุของการเสื่อมสภาพและเสียหายดังกล่าวอาจเกิดจาก การฟุกร่อนหรือการแตกร้าวของตัวสะพาน การล้าเนื่องจากการรับน้ำหนักเป็นเวลานาน การรับน้ำหนักหรือแรงกระทำที่สูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ การรับแรงกระทำในลักษณะที่ไม่ได้ออกแบบไว้ หรือการเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ด้วยปัจจัยอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ทั้งนี้การประเมินสภาพความแข็งแรงของสะพานจึงเป็นสิ่งสำคัญในการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการทำการบำรุง และซ่อมโครงสร้างให้มีอายุการใช้งานที่ยืดยาวต่อไป

การประเมินสภาพความแข็งแรงของสะพาน โดยการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Bridge natural frequency) เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการตรวจสอบ ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาตินั้นเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างมวล (Mass) และสติฟเนส (Stiffness) โดยค่าสติฟเนสจะขึ้นกับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ (Elastic modulus) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) และความยาวช่วงของสะพาน (Span length) หากโครงสร้างเกิดการเสื่อมสภาพ จะส่งผลให้ค่าสติฟเนสของโครงสร้างลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถอธิบายถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้ แต่เนื่องจากการที่จะทำการตรวจวัดพฤติกรรมทางพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสะพานนั้นจำเป็นที่จะต้องติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้ที่ตัวโครงสร้างโดยตรงซึ่งถูกเรียกว่า วิธีแบบทางตรง (Direct approach) ซึ่งค่อนข้างที่จะยุ่งยาก ใช้เวลานาน มีค่าดำเนินการที่สูง รวมไปถึงความเสี่ยงต่ออันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ในขณะติดตั้ง และเนื่องจากโดยทั่วไปแล้วสะพานจะถูกสร้างตามประโยชน์การใช้งาน และถูกพิจารณารูปแบบของตัวโครงสร้างตามลักษณะของพื้นที่ที่ต้องการสร้าง เช่น สะพานข้ามแม่น้ำ

หรือสะพานข้ามหุบเขา เป็นต้น ด้วยเหตุนี้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อม (Indirect approach) จึงเป็นวิธีที่ถูกรับรองขึ้นมา เพื่อความสะดวกในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน อีกทั้งยังช่วยให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

Yang, Lin and Yau (2004) ได้ริเริ่มนำเสนอหลักการ การคัดแยกความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยทำการศึกษาเชิงทฤษฎีในสองรูปแบบ คือ ด้วยการวิเคราะห์การแก้ปัญหาของระบบปฏิสัมพันธ์ยานพาหนะกับสะพานในรูปแบบ Single mode และจำลองด้วยระบบไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element) จากผลการศึกษาของทั้งสองระบบได้ทำให้มั่นใจถึงความสามารถที่จะคัดแยกความถี่ธรรมชาติของสะพาน ออกจากสเปกตรัมความเร่งของยานพาหนะได้ ซึ่งความเร็วของยานพาหนะ (Vehicle speed) เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแอมพลิจูดของความถี่สะพาน เมื่อยานพาหนะมีความเร็วที่มากก็จะส่งผลทำให้แอมพลิจูดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการประมวลผลสัญญาณ แต่จำเป็นต้องแก้ไขปัญหาของผลที่ทำให้เกิดการขยับของความถี่สะพาน ดังแสดงในภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 สเปกตรัมความเร่งของยานพาหนะจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

(Yang, Lin & Yau, 2004)

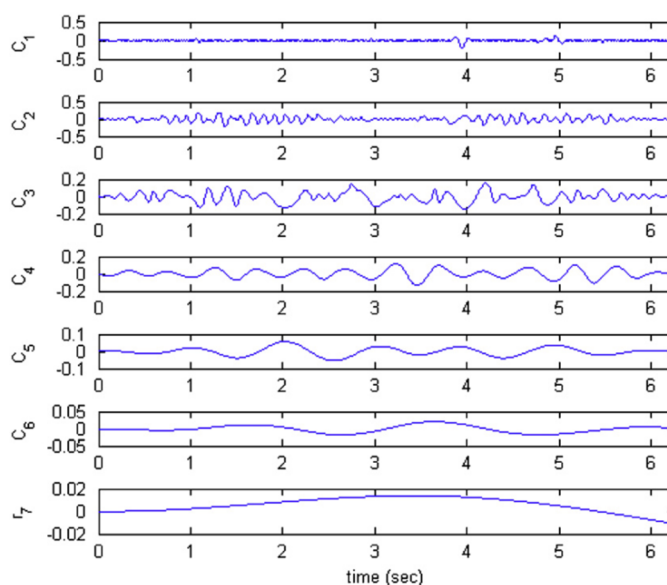
Lin and Yang (2005) ได้ทำการศึกษาค้นหาความถี่ธรรมชาติในโหมดพื้นฐานของสะพานด้วยการใช้ยานพาหนะเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน ซึ่งการศึกษานี้เป็นการทดสอบภาคสนาม

แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยการทดสอบเลือกทดสอบกับสะพาน Da-Wu-Lun ที่ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของไต้หวัน ซึ่งยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ รถบรรทุกต่อพ่วง ที่ทำการติดอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วไว้ที่ตัวพ่วง (Cart) ที่มีลักษณะเป็นพ่วง 2 ล้อ ที่ถูกลากด้วยรถบรรทุกทุกเบา จากผลการทดสอบในหลาย ๆ รูปแบบ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ตรวจวัดได้มีค่าใกล้เคียงกับ ค่าความถี่ที่วัดได้จากการทดสอบสั่นสะเทือนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ (Ambient vibration test) ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจริงที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบนี้ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นที่ยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบความเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน และจากผลการทดสอบในภาคสนามพบว่าความเร็วของยานพาหนะตรวจวัดที่ใช้ต่ำกว่า 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำให้ให้ระบุความถี่ของสะพานได้ง่าย ซึ่งถ้าใช้ความเร็วที่มากกว่านั้นความถี่ของสะพานจะถูกบดบังด้วยส่วนประกอบความถี่ที่สูงที่เป็นผลมาจาก ความถี่ของตัวเอง และผลของความขรุขระของถนน ในขณะที่เดียวกันการทดสอบในสภาพจราจรปกติเป็นที่น่าสนใจ เพราะมีแนวโน้มทำให้แอมพลิจูดของผลตอบสนองที่ดีขึ้น

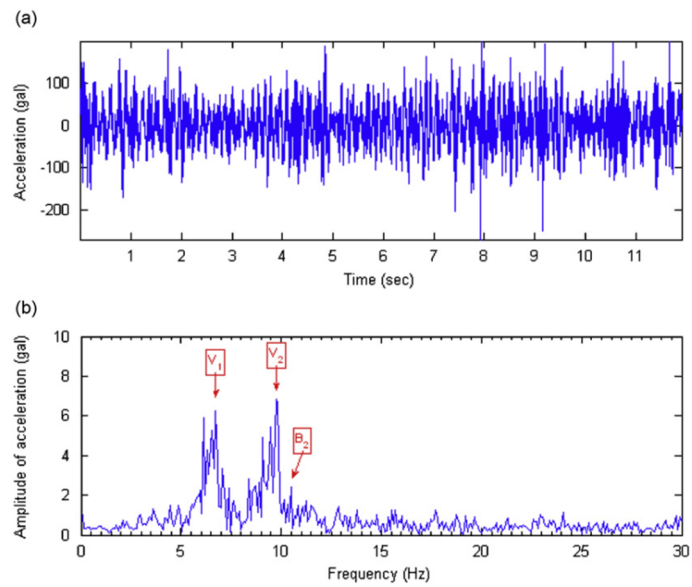
McGetrick, Gonzalez and O'Brien (2009) ได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีของการใช้ยานพาหนะเคลื่อนที่เพื่อหาพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ของสะพาน โดยทำการศึกษาด้วยวิธีจำลองปฏิสัมพันธ์ของสะพานกับยานพาหนะด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ยานพาหนะที่ทำการศึกษากถูกจำลองเป็นแบบ Quarter car ที่มี 2 ดิกรีอิสระ และสะพานถูกจำลองตามทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli ซึ่งการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นในการตรวจสอบความเป็นไปได้ ของการใช้ยานพาหนะที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วในการหาค่าความถี่ธรรมชาติสะพาน โดยการวิ่งผ่าน และรวมไปถึงทำการศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วของยานพาหนะ น้ำหนักของยานพาหนะ ความยาวช่วงของสะพาน ค่าความหน่วงของสะพาน และความขรุขระของพื้นผิวสะพาน เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ผลของการศึกษานี้ได้ยืนยันถึงความเป็นไปได้ของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากการใช้ยานพาหนะตรวจวัดที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งได้ผลที่ดีมากที่สุดที่ความเร็ว 5 เมตรต่อวินาที กับสะพานที่มีพื้นผิวเรียบ และจะได้ผลที่แย่กับสะพานที่พื้นผิวขรุขระ โดยความเร็วของยานพาหนะที่สูง และความขรุขระของพื้นผิวสะพาน มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของตัวยานพาหนะเอง ซึ่งทำให้ไปบดบังสเปกตรัมของความถี่สะพาน โดยการศึกษาในอนาคตจึงควรที่จะใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนักที่มากอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อที่จะช่วยกระตุ้นผลของการโค้งตัวของสะพานให้มากขึ้น ให้มีอิทธิพลต่อการสั่นมากกว่าผลของตัวยานพาหนะ

Yang and Chang (2009) ได้ทำการศึกษาการคัดแยกความถี่ของสะพานจากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน โดยใช้วิธีการแยกรูปแบบสัญญาณ

เชิงสังเกต (The empirical mode decomposition, EMD) ที่เป็นเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่คงที่ ประกอบกับการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยรูปแบบการศึกษาได้ทำการศึกษาคู่การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบปฏิสัมพันธ์ของยานพาหนะกับสะพานในรูปแบบ Single mode และเปรียบเทียบกับผลที่จำลองด้วยระบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของวิธีการ แล้วจึงนำไปใช้กับข้อมูลสัญญาณความเร่งที่เคยถูกทดสอบในภาคสนามไว้แล้วในงานของ Lin and Yang (2005) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเทคนิค EMD จะทำหน้าที่ย่อยสัญญาณความเร่งออกเป็นสัญญาณย่อยของ IMF ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 1-2 โดยโหมดของการสั่นไหวที่มีช่วงคาบที่สั้นก็จะถูกคัดแยกออกให้อยู่ใน IMF ช่วงต้น และโหมดของการสั่นไหวที่มีช่วงคาบที่ยาวจะถูกแยกไว้ใน IMF ช่วงที่สูงต่อไป จึงเป็นผลทำให้สามารถที่จะเห็นผลของความถี่ของสะพานในโหมดที่สูงที่มีแอมพลิจูดต่ำ ๆ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1-3 และภาพที่ 1-4

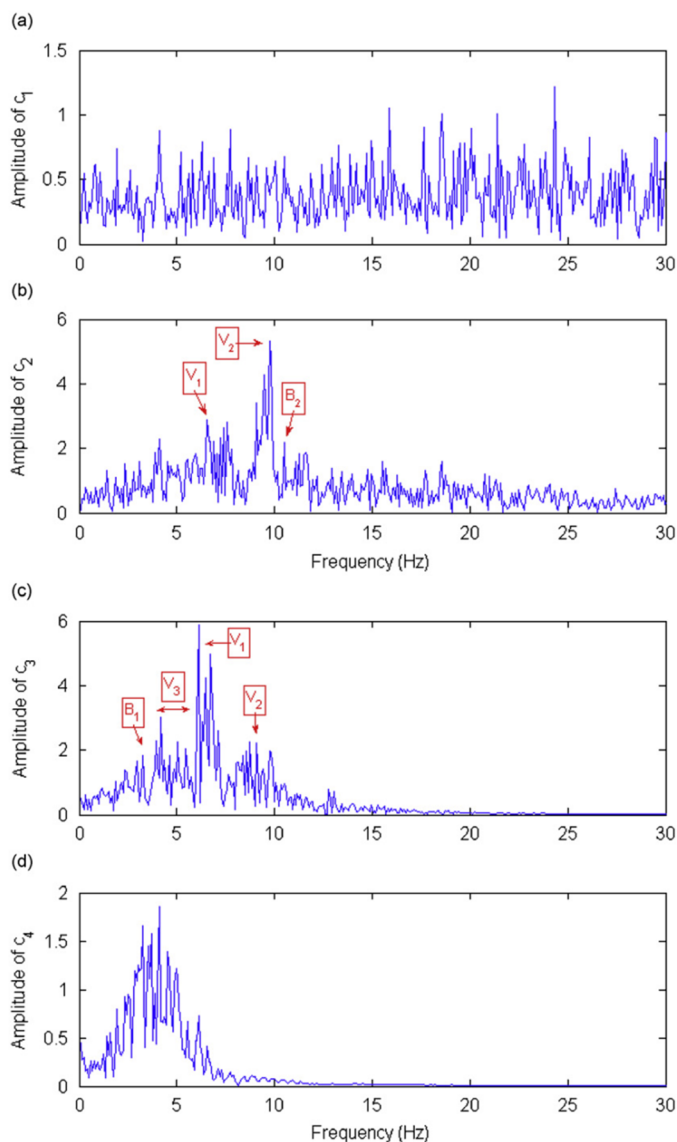


ภาพที่ 1-2 ผลของผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่ถูกแยกเป็นหลายโหมดด้วยวิธี EMD (Yang & Chang, 2009)



ภาพที่ 1-3 ผลตอบสนองจากยานพาหนะที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม (ที่ไม่ได้ผ่าน EMD)

(a) คือ ผลตอบสนองความเร่ง และ (b) คือ สเปกตรัมของผลตอบสนองความเร่ง (Yang & Chang, 2009)



ภาพที่ 1-4 สเปกตรัมของผลตอบสนองความถี่ที่ถูกแยกย่อยด้วยวิธี EMD ในโหมดต่าง ๆ ตามลำดับ (a) c_1 , (b) c_2 , (c) c_3 และ (d) c_4 (Yang & Chang, 2009)

McGetrick, Kim, Chul-Woo and O'Brien (2010) ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยยานพาหนะเคลื่อนที่ โดยรูปแบบการศึกษาเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยสะพานและยานพาหนะจำลองย่อส่วน ซึ่งยานพาหนะจะถูกจำลองเป็นแบบ 2 เฟลา โดยที่เฟลาหลังมีการบรรทุกน้ำหนักที่มากกว่าเฟลาหน้า และช่วงล่างของยานพาหนะถูกจำลองเป็นระบบสปริง เพื่อให้เคลื่อนที่อิสระในแนวดิ่ง ซึ่งยานพาหนะจะถูกติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความถี่ไว้ที่เฟลาหน้าและเฟลาหลัง และทำให้เคลื่อนที่ข้ามสะพานเหล็กจำลอง

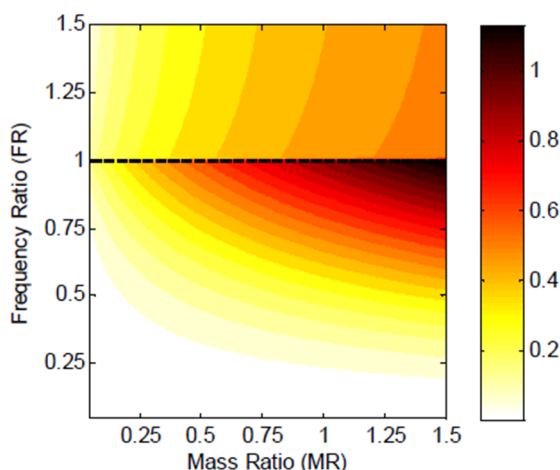
ด้วยระบบราง โดยตัวสะพานเหล็กเองนั้นถูกจำลองให้เพิ่มมวลของสะพานได้ที่กึ่งกลางสะพาน และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งไว้ที่ใต้ท้องสะพาน ในตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และที่ตำแหน่ง 3 ใน 4 ของช่วงความยาวสะพาน โดยการศึกษานี้ได้มุ่งเน้นในการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติสะพานจากสเปกตรัมความเร่งของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน และรวมไปถึงทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเป็นที่ชัดเจนว่า ความเร็วของยานพาหนะ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการตรวจสอบความถี่ของสะพานจากสเปกตรัมความเร่งของยานพาหนะ โดยความเร็วที่สูงจะให้ผลต่อขนาดของยอดสเปกตรัมที่สูงแต่ให้ผลของความละเอียดของสเปกตรัมที่ต่ำกว่าความเร็วที่ต่ำ และจากผลการศึกษายังแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการตรวจวัดความถี่ของสะพาน และการเปลี่ยนแปลงความหน่วงของสะพานจากสเปกตรัมความเร่งของยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน และเพื่อที่จะยืนยันความเป็นไปได้ของระบบนี้ ในการศึกษาในอนาคตจึงควรที่จะศึกษาเพิ่มเติมถึงการกำหนดค่าของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้น ทดสอบในความถี่ที่หลากหลายยิ่งขึ้น รวมไปถึงการจำลองความหน่วงของสะพานที่เพิ่มมากขึ้น

Siringoringo and Fujino (2010) ได้ทำการศึกษาการประมาณค่าความถี่พื้นฐานของสะพานจากผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของยานพาหนะเคลื่อนที่ ซึ่งรูปแบบของการศึกษาได้ทำการศึกษาในเชิงทฤษฎีด้วยวิธีการวิเคราะห์ปัญหาเชิงตัวเลข และวิเคราะห์โดยจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อด้วยการทดสอบในภาคสนาม ด้วยสะพานและยานพาหนะจริง เพื่อใช้เป็นหลักฐานในการยืนยันความเป็นไปได้ของแนวคิดนี้ ซึ่งในการทดสอบในภาคสนามนั้นได้ทดสอบกับสะพานข้ามแม่น้ำขนาดสั้นในกรุงโตเกียว โดยที่ตัวโครงสร้างเป็น Steel-box girder ที่จุกตรองรับอย่างง่าย และตัวผิวบนของสะพานทำมาจาก คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกล่อไว้บนตัว Steel-box girder ส่วนตัวของยานพาหนะได้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลที่ติดด้วยอุปกรณ์วัดความเร่งในการทดสอบ ซึ่งจากผลการศึกษาดูการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองยานพาหนะและสะพานพบว่า ผลตอบสนองของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้จะรับอิทธิพลจากองค์ประกอบความถี่ที่เป็นฟังก์ชันของ ความเร็วของยานพาหนะ ความถี่ของยานพาหนะและความถี่ของสะพาน ซึ่งเมื่อตั้งความเร็วให้เป็นค่าคงที่และใช้ความรู้ดั้งเดิมในการหาค่าความถี่ของยานพาหนะได้ ก็จะทำให้สามารถที่จะประเมินความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ และจากผลการทดสอบในภาคสนาม ยังแสดงว่าความถี่พื้นฐานของสะพานสามารถระบุได้อย่างแม่นยำภายใต้ความเร็วของยานพาหนะที่ต่ำกว่า 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ด้วยความคลาดเคลื่อนสูงสุดในการระบุค่าความถี่อยู่ที่ 11.40 % โดยการทดสอบได้มีการยืนยันผลที่ได้ด้วยการทำซ้ำ

Yang, Chang and Li (2013) ได้ทำการศึกษาด้วยการใช้เทคนิคการกรองสัญญาณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกความถี่ธรรมชาติของสะพาน จากผลตอบสนองของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านพบว่า หนึ่งปัญหาของการหาค่าความถี่ของสะพาน จากผลตอบสนองของยานพาหนะด้วยวิธีทางนั้น คือ ความถี่ของยานพาหนะที่ไม่พึงประสงค์ มักจะเป็นยอดที่โดดเด่นเมื่อผ่านการทำสเปกตรัมมาแล้ว จึงทำให้ยากต่อการระบุค่าความถี่ของสะพานที่ปนมาด้วยกับสัญญาณนั้น เพื่อเพิ่มการแสดงผลของความถี่สะพานนั้นจึงจำเป็นต้องกรองความถี่ของยานพาหนะและความถี่ไม่พึงประสงค์ออก โดยตัวกรองที่นำมาใช้ในการศึกษา มี 3 แบบ คือ Band-Pass filter (BPF), Singular spectrum analysis (SSA), และ Singular spectrum analysis คู่กับ Band-Pass filter (SSA-BPF) ซึ่งรูปแบบการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ ใช้ยานพาหนะที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่โหมดที่ 1 ของสะพาน และยานพาหนะที่มีความถี่ที่สูงกว่าความถี่โหมดที่ 1 ของสะพาน โดยทำการศึกษาในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าเทคนิค SSA-BPF ให้ผลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการแยกความถี่ของสะพานจากสเปกตรัมความถี่ของยานพาหนะ เนื่องจากเทคนิค SSA-BPF ลักษณะเด่นตรงที่ไม่จำเป็นต้องเลือกจำนวนของ Singular values ในขั้นตอนของ SSA ซึ่งต่างจากเทคนิค SSA ที่จำเป็นต้องเลือกจำนวนของ Singular values และในส่วนของ BPF จะให้ข้อมูลที่ผ่านการกรองออกมาไม่พบผลของความถี่ที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งโดยภาพรวมแล้วถ้ารู้ความถี่ของยานพาหนะ การใช้เทคนิค SSA-BPF ช่วยในการกรองสัญญาณก็จะมีรูปแบบการทำงานค่อนข้างจะอัตโนมัติ โดยการศึกษาในอนาคตอาจจะพิจารณาวิธีที่ศึกษาไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลทดสอบที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม

Cantero and Obrien (2013) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของความเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติของสะพาน ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่งได้ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยที่จำลองสะพานให้มีจุดรองรับอย่างง่าย และเป็นไปตามทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli โดยด้วยยานพาหนะถูกจำลองให้อยู่ในระบบของเสาอิสระเดี่ยวที่มีช่วงล่างเป็นระบบสปริงและตัวหน่วง ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้เทคนิค Wavelet transform ร่วมกับ Modified littlewood-paley พร้อมกับใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วช่วยในการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ของระบบ จากการศึกษาพบว่าความถี่ของทั้งยานพาหนะ และความถี่พื้นฐานของสะพาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ตามตำแหน่งของยานพาหนะในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่งจะมีผลของการเปลี่ยนแปลงหรือการขยับของความถี่มากที่สุดเมื่อยานพาหนะอยู่กึ่งกลางของสะพาน และจากการศึกษาพบว่าผลของ Frequency ratio (Vehicle frequency/ Bridge frequency, FR) และ Mass ratio (Vehicle mass/ Bridge mass, MR) เป็นอีกปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ

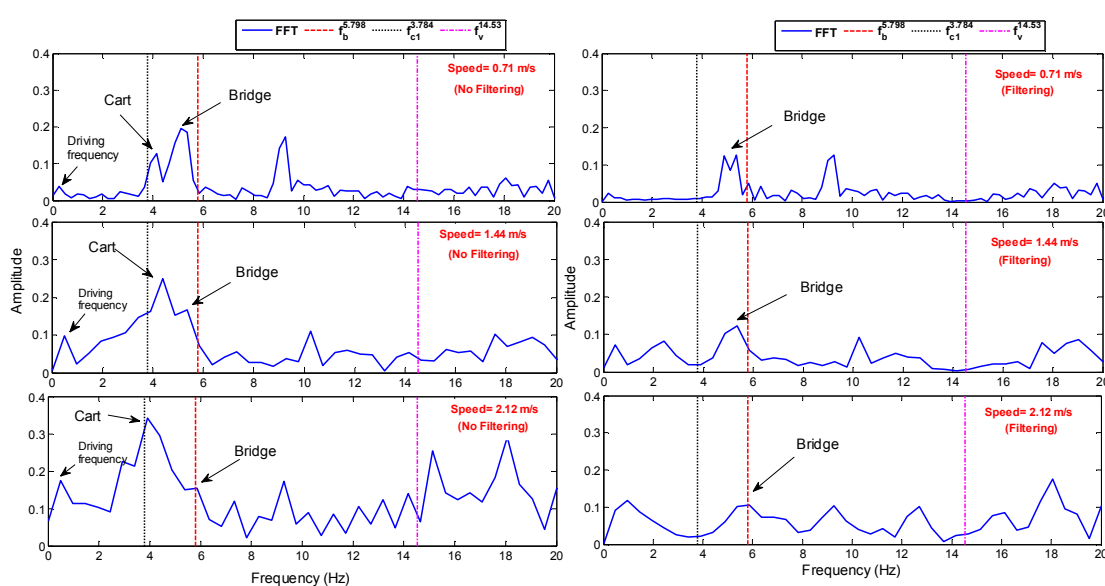
ระบบ ดังแสดงในภาพที่ 1-5 คือ กราฟการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่อยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยที่การเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในรูปของค่าสมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น สะพานและยานพาหนะมี $MR = FR = 0.75$ จะได้สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 0.46 หมายความว่า ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะเปลี่ยนไปด้วยสัมประสิทธิ์การคูณที่ $1+0.46$ ของค่าความถี่เดิม ซึ่งหาก $FR < 1$ ความถี่มักจะเปลี่ยนแปลงในทิศทางสูงกว่าค่าความถี่เดิม และหากค่าความถี่มักจะมีเปลี่ยนแปลงในทิศทางต่ำกว่าค่าความถี่เดิม โดยผลการศึกษาพบว่าถ้า Frequency ratio มีค่าที่เข้าใกล้ 1 และผลของ Mass ratio มีค่าที่สูง จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการขยับของความถี่ที่สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งในความเป็นจริงอาจจะพบในเหตุการณ์ของโครงสร้างสะพานที่สร้างด้วยเหล็กหรือมียานพาหนะที่หนักอยู่บนสะพานพร้อม ๆ กันหลายคัน อย่างไรก็ตามการศึกษาด้วยระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน (Vehicle-Bridge interaction, VBI) จำเป็นจะต้องคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติของสะพานอยู่เสมอไม่มากก็น้อย



ภาพที่ 1-5 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะเคลื่อนที่ (Cantero & Obrien, 2013)

อานนท์ นิยมสุข และพัทธพงษ์ อาสนจินดา (2558) ได้ทำการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ ด้วยแบบจำลองสะพานและยานพาหนะย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นที่จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่มักจะถูกความถี่ของยานพาหนะที่เด่นชัดกว่าบดบัง โดยใช้วิธีการกรองสัญญาณแบบช่วงหยุด (Band-Stop filtering) ซึ่งเป็นวิธีการกรองสัญญาณ (Signal filtering) ชนิดหนึ่ง ที่จะทำให้การกรองสัญญาณ โดยการตัดช่วงสัญญาณ (Cutoff) ที่กำหนดออก ซึ่งวิธีนี้จะช่วยในการกรองช่วง

ความถี่ที่ไม่พึงประสงค์หรือความถี่ของยานพาหนะตรวจวัดที่ทราบจากการทดสอบเบื้องต้นออกจากสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัด โดยกำหนดช่วงของความถี่ที่ตัดออก ± 0.5 Hz ของความถี่ของยานพาหนะ จากผลการศึกษาพบว่าวิธีดังกล่าวช่วยทำให้การระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานทำได้ง่ายขึ้นหากความถี่ของสะพานและยานพาหนะไม่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากกรณีที่ช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกัน ความถี่ของสะพานมักจะถูกลบผลกระทบของการรบกวนทำให้ยอดความถี่มีลักษณะที่เปลี่ยนไปหรืออาจถูกรองออกไปพร้อมกับสัญญาณความถี่ของยานพาหนะ ดังแสดงในภาพที่ 1-6



ภาพที่ 1-6 สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดของกรณีที่ไม่ผ่านการกรองสัญญาณ และกรณีผ่านการกรองสัญญาณ (อานนท์ นิยมสุข และพัชรพงษ์ อาสนจินดา, 2558)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งการทดสอบจริงในภาคสนาม และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพบว่า การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ ยังมีความคลาดเคลื่อนและมีข้อจำกัดอยู่ในบางกรณี ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปัญหาของความถี่ของยานพาหนะที่ค่อนข้างจะโดดเด่น และมีแอมพลิจูดที่มากซึ่งไปบดบังความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ต้องการหา ซึ่งในงานวิจัยหลาย ๆ งาน จึงพยายามที่จะทำการศึกษาและนำเสนอวิธีการต่าง ๆ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม เช่นเดียวกับงานของ Lin and Yang (2005) ที่ได้นำเสนอการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ชุดต่อพ่วงแทนที่การติดตั้งที่

รถบรรทุกหลักโดยตรง เพื่อช่วยลดอิทธิพลของการสั่นของตัวเครื่องยนต์ของยานพาหนะ อีกทั้งในงานของ Yang and Chang (2009) งานของ Yang et al. (2013) และงานของ อานนท์ นิยมสุข และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา (2015) ที่ได้นำเสนอวิธีการแยกโหมดของความถี่และวิธีการกรองสัญญาณ เพื่อช่วยในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดีในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการศึกษาที่ยังไม่ครอบคลุมถึงผลและกรณีต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ที่เหมาะสมต่อการตรวจวัด ยกตัวอย่างเช่น ผลของน้ำหนักของยานพาหนะที่เหมาะสม ผลของความถี่ของยานพาหนะตรวจวัด รวมไปถึงกรณีในการสัจจรและช่องจราจรที่ทำการตรวจวัด เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมของการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูเรียร์แบบเร็วร่วมกับเทคนิคการแยกโหมดความถี่ ในการคัดกรองความถี่ของยานพาหนะออกจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ เพื่อให้ได้ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ต้องการ ซึ่งการศึกษานี้จะมุ่งเน้นนำเสนอผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและรูปแบบการสัจจรของยานพาหนะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ครอบคลุมและเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม โดยปราศจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด โดยตรงที่โครงสร้างสะพานอย่างมีประสิทธิภาพ
2. เพื่อศึกษารูปแบบในสัจจรของยานพาหนะที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมที่นำเสนอ

ขอบเขตของงานวิจัย

1. การศึกษาพิจารณาโครงสร้างสะพานแบบช่วงเดียวที่มีจุดรองรับอย่างง่าย
2. พฤติกรรมของโครงสร้างที่ศึกษารับน้ำหนักกระทำอยู่ในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น
3. ศึกษาด้วยแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ
4. โครงสร้างสะพานจำลองย่อส่วนทำจากเหล็กรูปพรรณ
5. ตัวยานพาหนะจำลองย่อส่วนทำมาจากอลูมิเนียม
6. พิจารณาสภาพการสัจจรของยานพาหนะบนสะพานไม่เกิน 2 คัน
7. ยานพาหนะจำลองย่อส่วนถูกจำลองให้มีช่วงล่างเป็นระบบสปริงและไม่มีตัวหน่วง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เพื่อให้ทราบถึงวิธีการที่สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. เพื่อให้ทราบถึงผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ที่เหมาะต่อการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม
3. เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานต่อไป

การดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อในงานวิจัย ด้วยการรวบรวมข้อมูลและทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต รวมถึงศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้
2. ออกแบบและประดิษฐ์แบบจำลองย่อส่วนของสะพานและยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม
3. ปรับเทียบแบบจำลองย่อส่วนเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของสะพานและยานพาหนะจำลองย่อส่วน
4. ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม เพื่อเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการทดสอบ
5. ดำเนินการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการสั่นของยานพาหนะ โดยมีรูปแบบการสั่นที่แตกต่างกัน
6. วิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษา
7. สรุปผลการศึกษา
8. จัดทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับสะพาน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่มีความสัมพันธ์กับค่าสถิติเฟสของสะพาน โดยค่าสถิติเฟสของสะพานจะขึ้นกับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และความยาวช่วงของสะพาน ซึ่งถ้าหากสะพานเกิดการเสื่อมสภาพ จะส่งผลให้ค่าสถิติเฟสของสะพานลดลง จึงเป็นผลทำให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถอธิบายถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้

โดยทั่วไปแล้วการสั่นสะเทือนของ โครงสร้างเป็นผลรวมของการสั่นเนื่องจากความถี่ธรรมชาติที่มีแอมพลิจูดที่แตกต่างกันประกอบกัน ซึ่งความถี่แต่ละค่าจะมีรูปแบบการสั่นไหว (Mode shape) ที่แตกต่างกันออกไป โดยความถี่ในโหมดที่ 1 เป็นความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ของ โครงสร้างสะพาน ที่มีค่าความถี่ต่ำที่สุดแต่จะมีสัดส่วนมากที่สุดในการสั่นไหว ดังนั้นความถี่ในโหมดที่ 1 จึงมีความสำคัญกับความแข็งแรงของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด

การหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน

การทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของสะพานที่มีอยู่แล้ว สามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด วัดการสั่นสะเทือนของสะพานเพื่อพิจารณาระดับสัญญาณแล้ววิเคราะห์ออกมาเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งการทดสอบสามารถทำได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

1. การทดสอบด้วยการสั่นไหวแบบอิสระ (Free vibration test)

การทดสอบด้วยวิธีการสั่นไหวแบบอิสระ คือ การให้น้ำหนักหรือกระตุ้นให้สะพานเกิดการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุล และปล่อยให้สะพานเคลื่อนที่กลับอย่างอิสระด้วยแรงคืนกลับของตัวเอง โดยสะพานจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความถี่ธรรมชาติของตัวเอง หากระบบไม่มีการสูญเสียพลังงานในการเคลื่อนที่ ตัวสะพานนั้นก็จะแกว่งหรือสั่นสะเทือนตลอดไปด้วยความถี่ธรรมชาติ แต่ในความเป็นจริงแล้ววัตถุจะสูญเสียพลังงานจากการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น แรงเสียดทาน ซึ่งจัดเป็นการหน่วง (Damping) แบบหนึ่ง ที่ทำให้วัตถุไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระได้ตลอดไป แต่ระยะทางการเคลื่อนที่รวมถึงความถี่ในการสั่นสะเทือนจะลดลง จนหยุด

เคลื่อนที่หรือหยุดสั่นสะเทือนในที่สุด ซึ่งการทดสอบด้วยการสั่นไหวแบบอิสระเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้น ได้ถูกใช้ในงานของ Magalhães , Caetano, Cunha, Flamand and Grillaud (2012) โดยทำการทดสอบด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งของการสั่นสะเทือนไว้ที่สะพาน แล้วจึงทำการกระตุ้นสะพานให้เกิดการสั่นไหวด้วยการถ่วงมวลน้ำหนักไว้ที่สะพานแล้วจึงทำการปล่อยมวลนั้นให้ตกสู่พื้นด้านล่างอย่างอิสระ ซึ่งสัญญาณความเร่งที่วัดได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของสะพานต่อไป

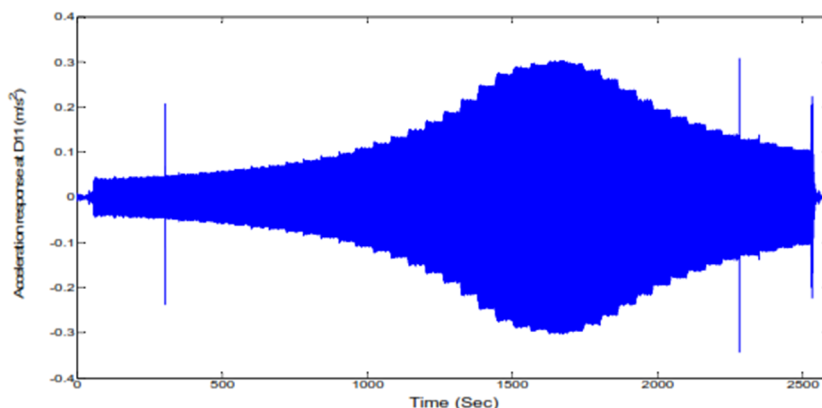
2. การทดสอบด้วยการสั่นไหวแบบบังคับ (Forced vibration test)

การทดสอบด้วยการสั่นไหวแบบบังคับ เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องให้การสั่นสะเทือน (Shaker) กับโครงสร้างสะพาน ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่ตัวสะพานเพื่อตรวจวัดค่าความถี่ที่เกิดขึ้น โดยความถี่ของแรงที่ให้กับสะพานจะถูกปรับให้สูงขึ้นไปเรื่อย ๆ เพื่อสังเกตความผิดปกติของความถี่ที่ทำการตรวจวัด ซึ่งสภาวะการสั่นสะเทือนผิดปกติจะเกิดในช่วงความถี่ของแรงที่กระทำกับสะพานมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งการสั่นสะเทือนดังกล่าวถูกเรียก การสั่นพ้อง (Resonance) โดยการสั่นพ้องนั้นจะให้แอมพลิจูดของการสั่นที่สูงกว่าการสั่นปกติ ดังนั้นค่าความถี่ของแรงที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องจึงเป็นค่าเดียวกับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งการทดสอบด้วยการสั่นไหวแบบบังคับเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้นได้ถูกใช้ในงานของ Omenzetter et al. (2013) ที่ทำการทดสอบโดยการติดตั้งเครื่องให้การสั่นสะเทือนแนวตั้งบนสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ซึ่งเมื่อทำการปรับความถี่ของแรงเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนอยู่ในสภาวะการสั่นสะเทือนผิดปกติกับสะพานหรือการสั่นพ้อง ผลของการสั่นจะมีแอมพลิจูดที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-1 เครื่องให้การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง (Horizontal shaker) ที่ถูกติดตั้งบนสะพาน

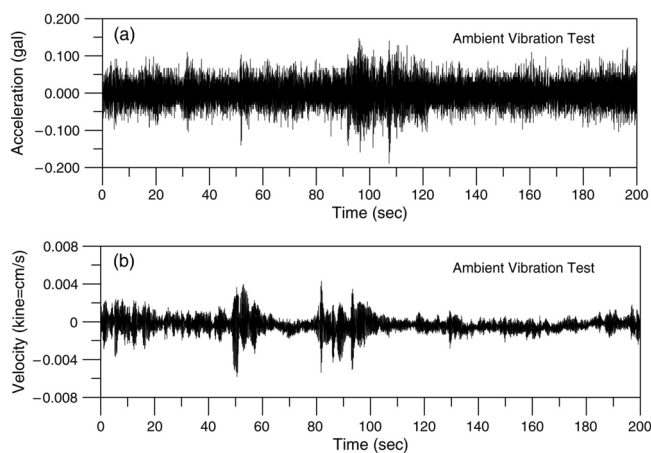
(Omenzetter et al, 2013)



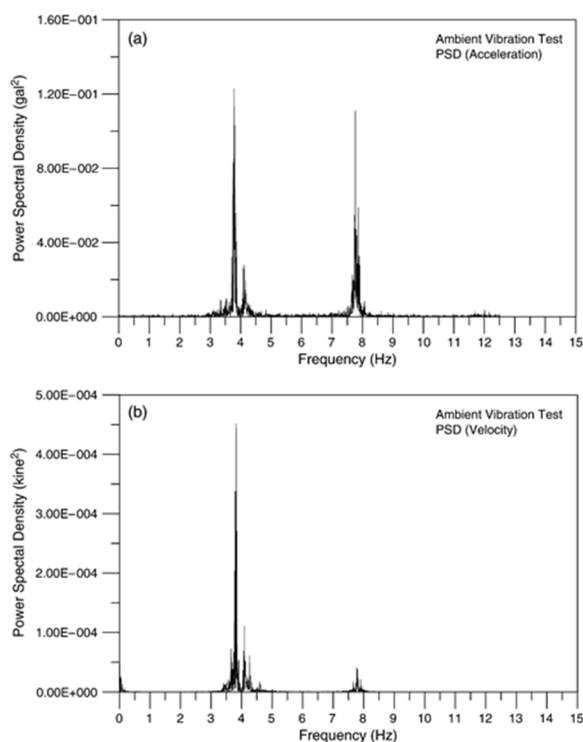
ภาพที่ 2-2 สัญญาณความเร่งจากการตรวจวัดบนสะพานที่ถูกให้แรงด้วยเครื่องให้การสั่นสะเทือน (Omenzetter et al, 2013)

3. การทดสอบด้วยการวัดการสั่นสะเทือนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ (Ambient vibration test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบโดยอาศัยแรงกระทำตามสภาพแวดล้อมปกติ เช่น การสัญจรของยานพาหนะทั่วไปที่สัญจรข้ามผ่านสะพาน เป็นต้น เพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือนกับโครงสร้างสะพาน โดยการทดสอบทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่โครงสร้างสะพาน เพื่อตรวจวัดผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงที่ยานพาหนะทั่วไปสัญจรผ่านสะพาน ซึ่งผลตอบสนองที่เกิดจากแรงกระทำตามสภาพแวดล้อมนั้นจะประกอบด้วย ผลรวมของการสั่นไหวของสะพานในหลายระดับความถี่ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนของความถี่ โดยความถี่ที่มีแอมพลิจูดของความถี่ที่มีค่าสูงสุด นั่นคือ ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ทำการทดสอบ ซึ่งการทดสอบด้วยการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้น ได้ถูกใช้ในงานของ Lin and Yang (2005) โดยทำการทดสอบด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง และตัวแปลงความเร็วของการสั่นสะเทือนไว้ที่สะพานทดสอบ เพื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของสะพาน ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่งตัวอย่างผลที่ได้จากการทดสอบถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 2-3 และภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-3 สัญญาณการตรวจวัดที่สะพานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ
 (a) สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง (b) สัญญาณที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณความเร็ว
 (Lin & Yang, 2005)

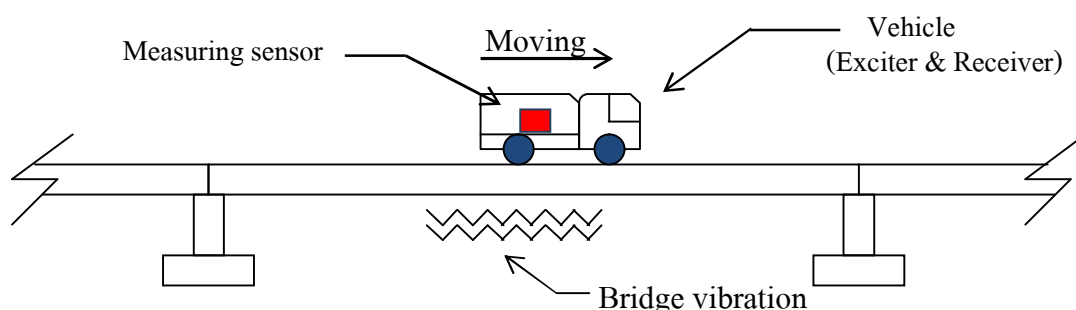


ภาพที่ 2-4 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณตรวจวัดสะพานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนเนื่องจาก
 สิ่งแวดล้อมตามปกติ (a) สเปกตรัมของสัญญาณความเร่ง (b) สเปกตรัมของสัญญาณ
 ความเร็ว (Lin & Yang, 2005)

เนื่องด้วยวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่มีอยู่แล้วที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่ตัวสะพาน โดยตรงหรือเรียกอีกอย่างได้ว่า วิธีทางตรง (Direct approach) ซึ่งวิธีทางตรงนี้ค่อนข้างที่จะมีข้อจำกัดในการดำเนินการ โดยทั่วไปแล้วสะพานจะถูกสร้างตามประโยชน์การใช้งาน และถูกพิจารณารูปแบบของตัวโครงสร้างตามลักษณะของพื้นที่ที่ต้องการสร้าง เช่น สะพานข้ามแม่น้ำ หรือสะพานข้ามหุบเขา เป็นต้น ซึ่งยากต่อการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นอย่างมาก รวมไปถึงในการตรวจวัดในแต่ละสะพานจำเป็นต้องใช้ทั้งงบประมาณที่สูงและเวลาในการตรวจสอบที่มาก ด้วยเหตุนี้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อมโดยปราศจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่โครงสร้างสะพาน จึงเป็นวิธีที่ถูกนำเสนอขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

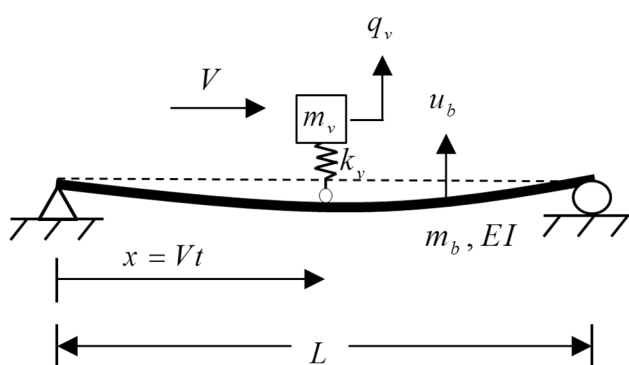
ทฤษฎีของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม

การทดสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม (Indirect approach) เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้น โดย Yang et al. (2004) เพื่อมุ่งเน้นการหาค่าความถี่ของสะพาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์ไว้ที่ยานพาหนะทดสอบ แทนการติดตั้งที่ตัวสะพานโดยตรง โดยมีแนวคิดที่ว่า การสั่นสะเทือนของยานพาหนะจะมีปฏิสัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของสะพาน โดยเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน คือ ให้น้ำหนักบรรทุก (Loader) แก่สะพานเพื่อเกิดการโก่งตัวและการสั่นไหว ซึ่งสะพานจะส่งถ่ายการสั่นสะเทือนนั้นกลับไปยังยานพาหนะทดสอบที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ ซึ่งวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมนี้ยานพาหนะจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้น (Exciter) ให้เกิดการสั่นสะเทือนและตัวรับ (Receiver) ผลตอบสนองการสั่นสะเทือน ในช่วงเวลาเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ตัวอย่างการตรวจวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์ด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม

ซึ่งแนวคิดดังกล่าวสามารถที่จะยืนยันความเป็นไปได้เบื้องต้น โดยการวิเคราะห์ปัญหา จากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน (Vehicle-Bridge interaction) ด้วยการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ที่มี ยานพาหนะถูกจำลองให้อยู่ในรูปแบบกระจุกมวล (Lumped mass) แบบองศาอิสระเดียว (Single degree-of-freedom) ในแนวตั้ง เคลื่อนที่ด้วยความเร็วผ่านสะพานจำลองที่มีจุดรองรับอย่างง่าย โดย สะพานถูกจำลองให้มีความกว้างคงที่ตลอดความยาวสะพาน และมีพื้นผิวที่เรียบ (Smooth pavement) โดยสมมติให้เป็นไปตามทฤษฎีแกนของ Euler-Bernoulli ซึ่งในที่นี้จะไม่คิดผลของค่า ความหน่วง (Damping effect) ของทั้งสะพานและยานพาหนะ



ภาพที่ 2-6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับ สะพาน

โดยที่ m_v คือ มวลของยานพาหนะ

k_v คือ สติฟเนสของช่วงล่างของยานพาหนะ

V คือ ความเร็วของยานพาหนะ

L คือ ความยาวช่วงของสะพาน

m_b คือ มวลของสะพานต่อหนึ่งหน่วยความยาว

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของสะพาน

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของสะพาน

$u(x, t)$ คือ การกระจัดในแนวตั้งของสะพาน ณ ระยะที่ x และที่เวลา t ใด ๆ

$q_v(t)$ คือ การกระจัดในแนวตั้งของยานพาหนะ ที่เวลา t ใด ๆ

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$f_c(t)$ คือ แรงสัมผัสระหว่างยานพาหนะกับสะพานที่เวลา t ใด ๆ

ω_b คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ω_v คือ ความถี่เนื่องจากการสั่นของยานพาหนะ

ϕ_n คือ โหมดการสั่นในโหมดที่ n

δ คือ เดลต้าฟังก์ชัน

$P(x, t)$ คือ แรงที่กระทำกับสะพานที่จุดสัมผัส ณ ระยะที่ x และที่เวลา t ใด ๆ

จากการวิเคราะห์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังภาพที่ 2-6 สามารถเขียนสมการสั่นไหวในแนวตั้งของสะพานและสมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะได้ ดังสมการที่ 2-1 และสมการที่ 2-2 ตามลำดับ

$$m_b \ddot{u} + EIu'''' = P(x, t) \quad (2-1)$$

$$m_v \ddot{q}_v + k_v q_v = k_v u|_{x=Vt} \quad (2-2)$$

สามารถหา แรงสัมผัส $f_c(t)$ ได้จากกฎของการรวมแรงในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักของยานพาหนะกับแรงที่เกิดจากระบบช่วงล่างของยานพาหนะ โดยที่ \ddot{q}_v คือ ความเร่งของยานพาหนะในแนวตั้ง ซึ่งถูกวัดที่ตำแหน่งที่สมดุลทางสถิตของตัวยานพาหนะจึงทำให้เป็นค่าเดียวกันกับค่า g หรือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-3

$$f_c(t) = -m_v g + k_v (q_v - u|_{x=Vt}) \quad (2-3)$$

เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน ณ ระยะที่ x และที่เวลา t ใด ๆ แล้วจะทำให้เกิดแรง $P(x, t)$ ที่กระทำกับสะพานที่จุดสัมผัส ณ ตำแหน่ง Vt โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2-4

$$P(x, t) = f_c(t) \delta(x - Vt) \quad (2-4)$$

ซึ่ง $\delta(x - Vt)$ คือ เดลต้าฟังก์ชัน (Dirac delta function) ณ จุดสัมผัส $x = Vt$ ดังนั้นจึงทำให้ได้ สมการที่ 2-5 คือ สมการการเคลื่อนที่ของระบบสะพานและยานพาหนะ

$$m_b \ddot{u} + EIu^{IV} = f_c(t) \delta(x-Vt) \quad (2-5)$$

เนื่องจากสะพานถูกจำลองให้อยู่ในรูปคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย เมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary conditions) จึงทำให้ทราบว่าโหมดของการสั่น ϕ_n จะอยู่ในรูปแบบไซน์ซอย (Sinusoid) เมื่อแก้สมการที่ 2-5 ด้วยวิธีการรวมโหมด (Modal superposition method) จะทำให้ได้ โหมดของการสั่น ϕ_n และพิกัดโหมด $q_{b,n}(t)$ ณ โหมดที่ n ดังแสดงในสมการที่ 2-6

$$u(x,t) = \sum_n \phi_n(x) q_{b,n}(t) = \sum_n \sin \frac{n\pi x}{L} q_{b,n}(t) \quad (2-6)$$

แทนการกระจัดในแนวดิ่งของสะพาน $u(x,t)$ ในสมการที่ 2-6 ลงในสมการที่ 2-5 และใช้เงื่อนไขตั้งฉาก (Orthogonality conditions) สำหรับโหมดของการสั่น ϕ_n พร้อมกับสมมติฐานที่ว่าน้ำหนักของยานพาหนะ m_v มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของสะพาน $m_b L$ ซึ่งหมายถึง $m_v / m_b L \ll 1$ ทำให้สามารถประมาณสมการที่ 2-1 ให้อยู่ในรูปของสมการควบคุม (Governing equation) ได้ดังสมการที่ 2-7

$$\ddot{q}_{b,n} + \omega_{b,n}^2 q_{b,n} = -\frac{2m_v g}{m_b L} \sin \frac{n\pi Vt}{L} \quad (2-7)$$

เมื่อ $\omega_{b,n}$ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ณ โหมดที่ n

$$\omega_{b,n} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_b}} \quad (2-8)$$

ในขณะเดียวกันจากสมการที่ 2-2 คือ สมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\ddot{q}_v + \omega_v^2 q_v = \omega_v^2 u|_{x=Vt} \quad (2-9)$$

เมื่อ ω_v คือ ความถี่เนื่องจากการสั่นของยานพาหนะ

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} \quad (2-10)$$

และเมื่อใช้เงื่อนไขเบื้องต้น (Initial conditions) ในการแก้สมการของสะพานในสมการที่ 2-7 จะได้

$$q_{b,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{1-S_n^2} [\sin \eta - S_n \sin \omega_{b,n} t] \quad (2-11)$$

โดยที่ $\Delta_{st,n}$ คือ การโก่งตัวทางสถิตินโมเมนต์ที่ n ที่เกิดจากแรงของยานพาหนะกระทำ η คือ ความถี่เนื่องจากการจกการขับ (Driving frequency) ของยานพาหนะ S_n คือ พารามิเตอร์เชิงความเร็ว ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ

$$\Delta_{st,n} = \frac{-2m_v g L^3}{n^4 \pi^4 EI} \quad (2-12)$$

$$\eta = \frac{n\pi V}{L} \quad (2-13)$$

$$S_n = \frac{n\pi V}{L\omega_{b,n}} = \frac{\eta}{\omega_{b,n}} \quad (2-14)$$

แทนสมการที่ 2-11 ลงในสมการที่ 2-6 จะทำให้ได้ ผลตอบสนองการกระจัดทั้งหมดของสะพาน เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V ซึ่งสามารถเขียนได้ดัง สมการที่ 2-15

$$u(x,t) = \sum_n \frac{\Delta_{st,n}}{1-S_n^2} \left\{ \sin \frac{n\pi x}{L} \{ \sin \eta t - S_n \sin \omega_{b,n} t \} \right\} \quad (2-15)$$

เมื่อได้ ผลตอบสนองการกระจัดทั้งหมดของสะพาน จากสมการที่ 2-15 แล้ว ทำให้สามารถหาการกระจัดทั้งหมดของยานพาหนะได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีอินทิกรัลของดูฮามเมล (Duhamel integral method) ในสมการที่ 2-9 โดยผลตอบสนองการกระจัดทั้งหมดของยานพาหนะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-16

$$q_v(t) = \sum_n \left\{ -A_{dl,n} \cos \frac{(n-1)\pi V}{L} t - A_{dr,n} \cos \frac{(n+1)\pi V}{L} t + A_{v,n} \cos \omega_v t - A_{bl,n} \cos(\omega_{b,n} - \eta)t + A_{br,n} \cos(\omega_{b,n} + \eta)t \right\} \quad (2-16)$$

โดยที่ $A_{dl,n}$, $A_{dr,n}$, $A_{v,n}$, $A_{bl,n}$ และ $A_{br,n}$ คือ สัมประสิทธิ์คงที่ ที่มีความสอดคล้องกับค่าแอมพลิจูดของผลตอบสนอง โดยแสดงค่าต่าง ๆ ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$A_{dl,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1-S_n^2)(1-\mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)} \quad (2-18)$$

$$A_{dr,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1-S_n^2)(1-\mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} \quad (2-19)$$

$$A_{v,n} = \frac{2\Delta_{st,n}\mu_n^2 S_n^2}{(1-S_n^2)} \left[\frac{1}{(1-\mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)(1-\mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} - \frac{1}{(1-\mu_n^2(1-S_n^2))(1-\mu_n^2(1+S_n^2))} \right] \quad (2-20)$$

$$A_{bl,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1-S_n^2)(1-\mu_n^2(1-S_n^2)^2)} \quad (2-21)$$

$$A_{br,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1-S_n^2)(1-\mu_n^2(1+S_n^2)^2)} \quad (2-22)$$

และ μ_n คือ สัดส่วนของความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ของยานพาหนะ (Bridge-Vehicle frequency ratio) ณ โหมดที่ n

$$\mu_n = \frac{\omega_{b,n}}{\omega_v} \quad (2-23)$$

จากผลตอบสนองการกระจัดทั้งหมดของสะพาน ในสมการที่ 2-16 พบว่ามีกลุ่มความถี่อยู่ 3 กลุ่ม คือ ความถี่เนื่องจากการขับของยานพาหนะ η ความถี่ของตัวยานพาหนะเอง ω_v และ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน $\omega_{b,n}$ ซึ่งก็พบเหมือนกันในสมการความเร็ว และสมการความเร่งของ

สะพาน โดยไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ ซึ่งก็ตรงกับแนวคิดดั้งเดิม ที่สามารถตรวจวัดหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจาก ผลตอบสนองความเร็วและความเร่งของสะพานได้ โดยแนวคิดนี้ถูกเรียกว่า วิธีทางอ้อม (Indirect approach)

หลังจากนั้นได้ทำการอนุพันธ์ ลำดับที่ 2 ของฟังก์ชัน ในสมการที่ 2-16 เพื่อหาผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ ได้ผลแสดงดังสมการที่ 2-24

$$\ddot{q}_v(t) = \sum_n \left\{ -\tilde{A}_{dl,n} \cos\left(\frac{(n-1)\pi V}{L}t\right) + \tilde{A}_{dr,n} \cos\left(\frac{(n+1)\pi V}{L}t\right) - \tilde{A}_{v,n} \cos\omega_v t + \tilde{A}_{bl,n} \cos\left(\omega_{b,n} - \frac{n\pi V}{L}t\right) - \tilde{A}_{br,n} \cos\left(\omega_{b,n} + \frac{n\pi V}{L}t\right) \right\} \quad (2-24)$$

จากการสังเกตสมการที่ 2-16 และ 2-24 ซึ่งเป็นสมการของผลตอบสนองรวมของยานพาหนะพบว่ามี 5 องค์ประกอบความถี่ที่แตกต่างกันออกไปรวมกันอยู่ โดยสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้ดังนี้

1. ความถี่ขับเคลื่อนของยานพาหนะ $\eta = n\pi V / L$ เป็นความถี่ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วของยานพาหนะและความยาวช่วงของสะพาน ซึ่งมีรูปแบบของความถี่เป็นสองรูปแบบ คือ ความถี่ขับเคลื่อนด้านซ้าย $(n-1)\pi V / L$ และความถี่ขับเคลื่อนด้านขวา $(n+1)\pi V / L$ โดยมีแอมพลิจูด คือ $\sum_n A_{dl,n}$ และ $\sum_n A_{dr,n}$ ตามลำดับ

2. ความถี่ของยานพาหนะ ω_v ที่มีแอมพลิจูด คือ $\sum_n A_{v,n}$

3. ความถี่ของสะพาน ω_b รวมไปถึงมีความถี่ที่มีความสัมพันธ์กับความถี่ขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการขยับไปด้านซ้าย $\omega_{bl,n} = \omega_b - \eta$ และขยับไปทางด้านขวา $\omega_{br,n} = \omega_b + \eta$ ที่มีแอมพลิจูด คือ $\sum_n A_{bl,n}$ และ $\sum_n A_{br,n}$ ตามลำดับ

ซึ่งเหตุผลนี้ เป็นข้อยืนยันแนวคิดทางทฤษฎีได้ว่า สามารถที่จะหาความถี่ธรรมชาติของสะพานได้จากผลตอบสนองโดยรวมของยานพาหนะด้วยวิธีทางอ้อม

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ

สัญลักษณ์	ค่าสัมประสิทธิ์
$\tilde{A}_{dl,n}$	$A_{dl,n} \omega_{b,n-1}^2 S_{n-1}^2$
$\tilde{A}_{dr,n}$	$A_{dr,n} \omega_{b,n+1}^2 S_{n+1}^2$
$\tilde{A}_{v,n}$	$A_{v,n} \omega_v^2$
$\tilde{A}_{bl,n}$	$A_{bl,n} \omega_{b,n}^2 (1 - S_n)^2$
$\tilde{A}_{br,n}$	$A_{br,n} \omega_{b,n}^2 (1 + S_n)^2$

ทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณ

เนื่องด้วยการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมนั้น เป็นการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ปะปนอยู่กับสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ ดังนั้นเพื่อที่จะระบุความถี่ของธรรมชาติของสะพาน จึงจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้ง่ายต่อการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ต้องการหา ซึ่งในปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์สัญญาณมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และความต้องการของผู้ที่ต้องการใช้ในการศึกษา โดยวิธีที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย 3 วิธี ดังนี้

1. วิธีการแปลงโดเมนของสัญญาณ (Signal domain transformation)

วิธีการแปลงโดเมนของสัญญาณ คือ วิธีการเปลี่ยนรูปสัญญาณที่อยู่ในรูปของโดเมนของเวลา (Time domain) ให้ไปอยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ (Frequency domain) โดยสัญญาณที่เป็นรายคาบ (Periodic) จะสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้นุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) และสัญญาณที่ไม่มีลักษณะไม่เป็นคาบ (Non-Periodic) จะวิเคราะห์ได้ด้วยการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier transform) ซึ่งพื้นฐานของทฤษฎีนี้ คือ การแสดงสัญญาณจากความสัมพันธ์ของจำนวน Sine และ Cosine เทอม หรือก็คือ การวิเคราะห์สัญญาณโดยรวมกันหลาย ๆ ค่าความถี่ และแสดงออกเป็นสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันของแต่ละค่าความถี่

ฟังก์ชัน Sine และ Cosine มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) ในสมการของ Euler ดังสมการที่ 2-25 และสมการที่ 2-26

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (2-25)$$

เมื่อ i เป็นหน่วยเชิงซ้อน สามารถเขียนได้ว่า

$$e^{-i\theta} = \cos(-\theta) + i \sin(-\theta) = \cos \theta - i \sin \theta \quad (2-26)$$

จากความสัมพันธ์นี้ จะสามารถแสดงพจน์ของฟังก์ชัน Sine และ Cosine ในรูปฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลได้ดังสมการที่ 2-27 และสมการที่ 2-28

$$\sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} \quad (2-27)$$

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \quad (2-28)$$

เมื่อกำหนดให้ ω_n คือ ค่าความถี่ของสัญญาณลำดับที่ n สามารถแสดงค่าในรูปของฟังก์ชัน Sine และ Cosine ได้ดังสมการที่ 2-29

$$\omega_n = \cos\left(\frac{2\pi}{n}\right) - i \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) = e^{-\frac{2\pi i}{n}} \quad (2-29)$$

นอกจากนี้การวิเคราะห์สัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวิธีการแปลงฟูเรียร์ และการพิจารณานขนาดของฟังก์ชัน Sine และ Cosine ในแต่ละความถี่

สมมติฟังก์ชันหรือสัญญาณ $y(t)$ โดยขึ้นอยู่กับเวลา t มีสัญญาณจำนวน n ความถี่ดังแสดงในสมการที่ 2-30

$$y_i = y_i(t) , i = 1, 2, \dots, n \quad (2-30)$$

โดยวิธีการแปลงฟูเรียร์นี้จะทำให้แยกสัญญาณออกมาได้ เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete fourier transform, DFT) สำหรับสัญญาณที่มีจำนวนข้อมูลที่แน่นอน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมได้ดังนี้

$$Y_i = \sum_{k=1}^n y_k \omega_n^{(k-1)(i-1)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-31)$$

หรือสามารถเขียนในรูปของเมตริกได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_n^1 & \dots & \omega_n^{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \omega_n^n & \dots & \omega_n^{(n-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}$$

ในการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ DFT นั้น จะมีข้อมูลที่มากและใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นาน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast fourier transform, FFT) จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อความรวดเร็วในการวิเคราะห์สัญญาณ โดยวิธี FFT จะช่วยทำให้จำนวนของการคูณกันของสมการเมตริกลดลง โดยแยกย่อยการคำนวณเป็นชุดเล็ก ๆ จำนวนมากซึ่งแทบไม่ต้องอาศัยการคูณเลย ซึ่งเป็นผลทำให้วิเคราะห์ข้อมูลได้เร็วขึ้น โดยข้อมูลของสัญญาณที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจะถูกรวบรวมและแสดงผลในรูปแบบความหนาแน่นของสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพลังงานในรูปแบบฟังก์ชันของความถี่

2. วิธีการแยกรูปแบบสัญญาณเชิงสังกต (The empirical mode decomposition, EMD)

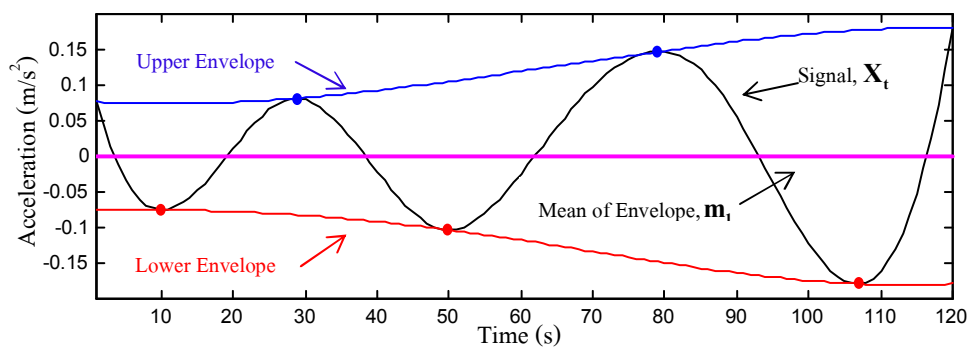
โดยทั่วไปแล้วสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามสะพานจะมีรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่คงที่ ซึ่งเป็นสัญญาณที่รวมองค์ประกอบของความถี่ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ไม่เพียงพอต่อการแยกสัญญาณความถี่ของสะพานที่ต้องการหาออกจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้ เนื่องจากอิทธิพลการสั่นสะเทือนของยานพาหนะที่ทำให้ขนาดแอมพลิจูดของผลตอบสนองมีมากเมื่อเทียบกับสะพาน ดังนั้นวิธีการแยกรูปแบบสัญญาณเชิงสังกต ที่ Huang et al. (1998) นำเสนอขึ้นจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการนำมาวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจวัดมาได้ในการศึกษา นี้ เนื่องจากวิธี EMD มีคุณสมบัติพิเศษในการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่คงที่ โดยวิธี EMD จะทำการ แยกโหมดของการแกว่ง (Oscillatory mode) ที่ประกอบกันอยู่ในสัญญาณตรวจวัด ออกเป็นโหมดย่อยหรือฟังก์ชันรูปแบบที่แท้จริง (Intrinsic mode function, IMF) โดยโหมดของการสั่นที่ละเอียดหรือมีช่วงคาบที่สั้นจะถูกแยกให้อยู่ใน IMF ต้น ๆ และโหมดของการสั่นที่มีช่วงคาบที่ยาวกว่าจะถูกแยกให้อยู่ใน IMF ต่อ ๆ ไป โดยแต่ละ IMF ที่ถูกแยกออกมาจากสัญญาณหลักจะต้องเป็นไปตาม 2 เงื่อนไขดังนี้

1. จำนวนยอดของค่าสูงสุดกับจำนวนยอดของค่าต่ำสุด และจำนวนของข้อมูลที่ข้ามผ่านเส้นศูนย์กลาง (Zero-Mean) ต้องมีจำนวนที่เท่ากันหรือต่างกันไม่เกิน 1

2. ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นกรอบ (Envelope line) หรือเส้นที่ลากเป็นขอบของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดต้องมีค่าเท่ากับ 0

โดยขั้นตอนการสร้าง IMF ของวิธี EMD มีดังนี้

1. สร้างเส้นกรอบบน (Upper envelope) ของค่าสูงสุดและสร้างเส้นกรอบล่าง (Lower envelope) ของค่าต่ำสุด ของสัญญาณหลัก (X_t) โดยลากจากยอดสุดต่อยอดของชุดข้อมูล และจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของเส้นกรอบบนและเส้นกรอบล่าง (m_1) ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างการสร้างเส้นกรอบและการเฉลี่ยเส้นกรอบ

2. นำค่าเฉลี่ยของเส้นกรอบที่ได้ไปลบออกจากสัญญาณหลักซึ่งจะได้ค่าองค์ประกอบของสัญญาณครั้งที่ 1 หรือ h_1

$$X_t - m_1 = h_1 \quad (2-32)$$

3. ตรวจสอบสัญญาณของ h_1 ว่าเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ข้อของการสร้าง IMF หรือไม่ ซึ่งถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขก็นำสัญญาณ h_1 ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 จนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (2-33)$$

เมื่อแทนการทำซ้ำของการหา IMF ที่ 1 ด้วย k จะถ้าสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\mathbf{h}_{1(k-1)} - \mathbf{m}_{1k} = \mathbf{h}_{1k} \quad (2-34)$$

เมื่อทำซ้ำจนเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ข้อ ของการสร้าง IMF แล้ว จึงจะกำหนดได้ว่า \mathbf{h}_{1k} นั้นเป็นค่า IMF ที่ 1 หรือแทนด้วย \mathbf{IMF}_1

$$\mathbf{IMF}_1 = \mathbf{h}_{1k} \quad (2-35)$$

4. แยก IMF ที่ 1 ออกจากสัญญาณหลักเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหลือ (\mathbf{r}_1) โดยเขียนสมการได้ว่า

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{X}_t - \mathbf{IMF}_1 \quad (2-36)$$

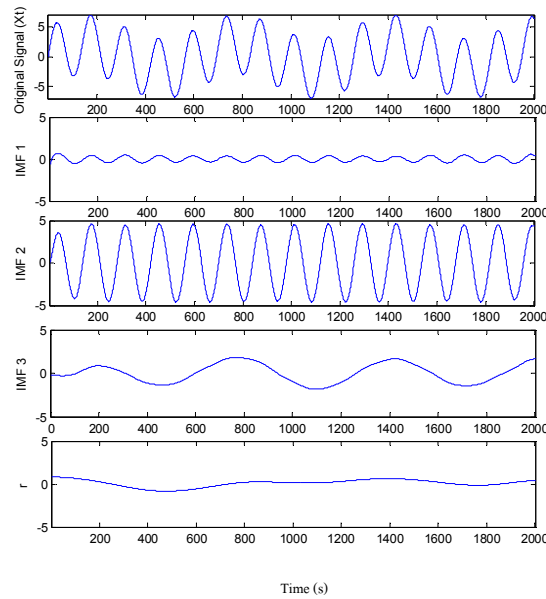
5. นำสัญญาณ \mathbf{r}_1 ไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 จำนวน n รอบ ก็จะทำได้ IMF ทั้งหมด n ตัว โดยแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 - \mathbf{IMF}_2 &= \mathbf{r}_2 \\ &\vdots \\ \mathbf{r}_{n-1} - \mathbf{IMF}_n &= \mathbf{r}_n \end{aligned} \quad (2-37)$$

โดยการทำซ้ำจะหยุดลงก็ต่อเมื่อ สัญญาณ \mathbf{r}_n กลายเป็นฟังก์ชันความถี่เดียว (Monotonic function) ที่ไม่สามารถแยก IMF ต่ออีกได้ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า

$$\mathbf{X}_t = \sum_{j=1}^n \mathbf{IMF}_j + \mathbf{r}_n \quad (2-38)$$

โดยลักษณะของตัวอย่างการแยกสัญญาณด้วยวิธี EMD ที่ได้ทำการแยกสัญญาณต้นแบบ (Original signal) ออกเป็นรูปแบบของสัญญาณย่อย ๆ ในรูปแบบของ IMF ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2-8



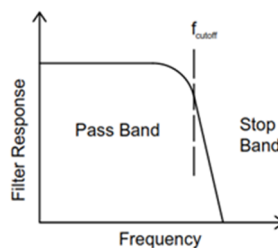
ภาพที่ 2-8 ตัวอย่างการแยกสัญญาณด้วยวิธี EMD

3. วิธีการกรองสัญญาณ (Signal filtering)

สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดนั้นเป็นสัญญาณที่รวมองค์ประกอบของหลาย ๆ องค์ประกอบเข้าด้วยกัน เช่น สัญญาณเนื่องจากการสั่นไหวของยานพาหนะ สัญญาณเนื่องจากการสั่นไหวของสะพาน และสัญญาณรบกวนต่าง ๆ (Noise) เป็นต้น ดังนั้นถ้าต้องการนำสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ออกจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้ จึงจำเป็นต้องทำการกรองสัญญาณเพื่อนำสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ออก โดยวิธีการกรองสัญญาณทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ

3.1 วิธีการกรองสัญญาณแบบต่ำผ่าน (Low-Pass filtering)

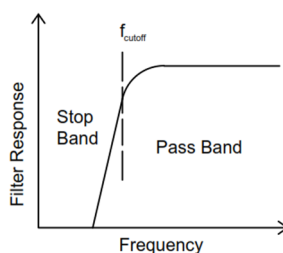
เป็นการกรองสัญญาณโดยตัดช่วงสัญญาณ (Cutoff) ที่มีค่าความถี่สูงกว่าที่กำหนดออกให้เหลือแต่สัญญาณที่มีความถี่ต่ำที่ต้องการไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass filtering)

3.2 วิธีการกรองสัญญาณแบบสูงผ่าน (High-Pass filtering)

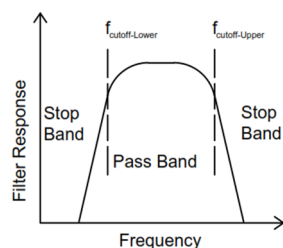
เป็นการกรองสัญญาณโดยตัดช่วงสัญญาณ (Cutoff) ที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าที่กำหนด ออกให้เหลือแต่สัญญาณที่มีความถี่ที่ต้องการไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 การกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน (High-Pass filtering)

3.3 วิธีการกรองสัญญาณแบบช่วงผ่าน (Band-Pass filtering)

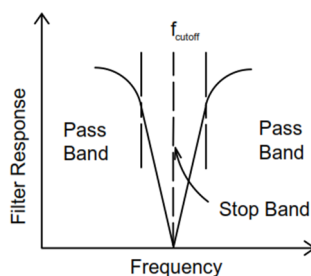
เป็นการกรองสัญญาณโดยกำหนดช่วงแถบของสัญญาณที่ต้องการให้ผ่าน และตัดสัญญาณที่ไม่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการออก ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 การกรองสัญญาณแบบช่วงผ่าน (Band-Pass filtering)

3.4 วิธีการกรองสัญญาณแบบช่วงหยุด (Band-Stop filtering)

เป็นการกรองสัญญาณโดยกำหนดช่วงของสัญญาณที่ไม่ต้องการให้ผ่านออก ให้เหลือแต่สัญญาณที่ต้องการให้ผ่าน ซึ่งในบางครั้งอาจถูกเรียกว่า นอตช์ฟิลเตอร์ (Notch filtering) ที่ทำการกรองสัญญาณที่เป็นช่วงแคบมาก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การกรองสัญญาณแบบช่วงหยุด (Band-Stop filter)

โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบด้วยการสั่นไหวแบบอิสระ (Free vibration test) ในการหาความถี่ธรรมชาติจริงของสะพานและยานพาหนะ และใช้วิธีการทดสอบด้วยการวัดการสั่นสะเทือนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมตามปกติ (Ambient vibration test) ในการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานทดสอบในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนผ่าน เพื่อใช้เป็นตัวแทนความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธีทดสอบแบบทางตรง (Direct approach) ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีทดสอบแบบทางอ้อม โดยผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วในการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของโดเมนของความถี่ และใช้วิธีการแยกรูปแบบเชิงสังเกต และวิธีการกรองสัญญาณในการคัดแยกความถี่ที่ไม่พึงประสงค์ รวมถึงความถี่รบกวนอื่น ๆ ออกจากสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัด เพื่อช่วยให้การวิเคราะห์เพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

การศึกษาเชิงตัวแปรจากการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน

ในการศึกษาการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ยานพาหนะเคลื่อนที่ ซึ่งหากทำการศึกษาที่โครงสร้างสะพานจริงและใช้ยานพาหนะจริงนั้น จำเป็นต้องใช้งบประมาณและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาดูด้วยแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้งบประมาณในการศึกษาค่อนข้างน้อย และสามารถทดลองปรับพารามิเตอร์ที่พิจารณาได้อย่างหลากหลาย โดยการจำลองสะพานและยานพาหนะย่อส่วนให้มีพฤติกรรมทางพลศาสตร์ และได้ลักษณะสัญญาณตรวจวัดใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริง ซึ่งผลของการศึกษาจะช่วยยืนยันความเป็นไปได้ของวิธีการศึกษา รวมถึงความเหมาะสมและประสิทธิภาพของวิธีการ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาในการศึกษา ณ สภาพจริงต่อไป

การเตรียมการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน เพื่อให้แบบจำลองย่อส่วนที่มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริง แบบจำลองย่อส่วนจึงถูกย่อส่วนให้อยู่ในช่วงอัตราส่วนที่เทียบเท่ากับสะพานและรถบรรทุกจริง โดยสัดส่วนที่ใช้ในการย่อส่วนอยู่ที่อัตราส่วน 1 : 10 ซึ่งหมายถึงสะพานและยานพาหนะจะถูกจำลองย่อส่วนให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดต้นแบบจริง 10 เท่า โดยที่สะพานถูกจำลองด้วยเหล็กรูปพรรณให้มีความถี่ของตัวสะพานใกล้เคียงกับค่าความถี่ของโครงสร้างสะพานจริง และยานพาหนะถูกจำลองด้วยวัสดุคูมิเนียมที่มีขนาดช่วงเพลาย่อส่วนเทียบเท่ากับยานพาหนะต้นแบบ และสามารถปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะได้ โดยมวลของยานพาหนะที่ใช้ถูกออกแบบให้สามารถทำให้สะพานเกิดค่าความเครียดในระดับที่เกิดขึ้นในสะพานจริง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองย่อส่วน ตั้งแต่การออกแบบ การเตรียมการทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด รวมไปถึงการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา และกรณีที่จะทำการศึกษาจากแบบจำลองย่อส่วน พร้อมนำเสนอหลักการและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการทดสอบมีประสิทธิภาพมากที่สุด

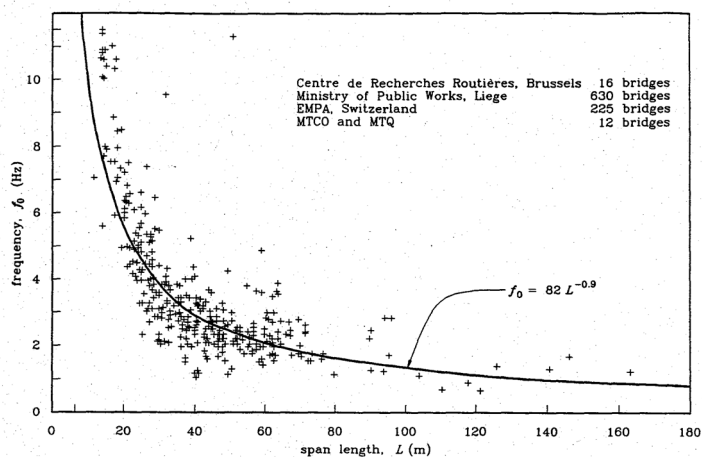
การออกแบบและติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนและอุปกรณ์ตรวจวัด

แบบจำลองย่อส่วนถูกออกแบบให้มีขนาดและสัดส่วนใกล้เคียงกับตัวโครงสร้างจริง เพื่อให้ได้สัญญาณใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงที่สุด โดยการออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่

แบบจำลองสะพานย่อส่วน และแบบจำลองยานพาหนะย่อส่วน ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบได้ถูกแสดงคั้งหัวข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบสะพานจำลองย่อส่วน

สะพานจำลองย่อส่วน ถูกออกแบบให้มีความถี่ธรรมชาติของสะพานใกล้เคียงกับความถี่ของโครงสร้างจริง ซึ่งสะพานที่ใช้ในการทดสอบถูกจำลองด้วยเหล็กรูปพรรณ เนื่องจากเหล็กวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและสะดวกต่อการจำลองความถี่ให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริง โดยการศึกษานี้จะพิจารณาสะพานเพียงช่วงเดียวที่มีจุดรองรับอย่างง่าย ซึ่งการจำลองสะพานย่อส่วนนั้นอาศัยความสัมพันธ์ของความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความยาวช่วงสะพาน จากงานศึกษาของ Tilly (1986)



ภาพที่ 3-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงสะพาน (Tilly, 1986)

$$f_0 = 82L^{-0.9} \quad (3-1)$$

โดยที่ f_0 คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน

L คือ ความยาวช่วงสะพาน

จากสมการที่ 2-8 ในบทก่อนหน้านี เมื่อทำการแปลงความถี่เชิงมุมให้อยู่ในรูปแบบของความถี่ ก็จะสามารถทำให้เชื่อมความสัมพันธ์กับสมการที่ 3-1 ได้ ดังแสดงในสมการที่ 3-2

$$f_n = \frac{\omega_{b,n}}{2\pi} = \frac{n^2\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_b}} \quad (3-2)$$

เมื่อสะพานจำลองย่อส่วนมีลักษณะเป็นคานช่วงเดียว ที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอทำให้ทราบว่า

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3-3)$$

$$m_b = Ay \quad (3-4)$$

โดยที่ b คือ ความกว้างของสะพาน

h คือ ความหนาสะพาน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสะพาน

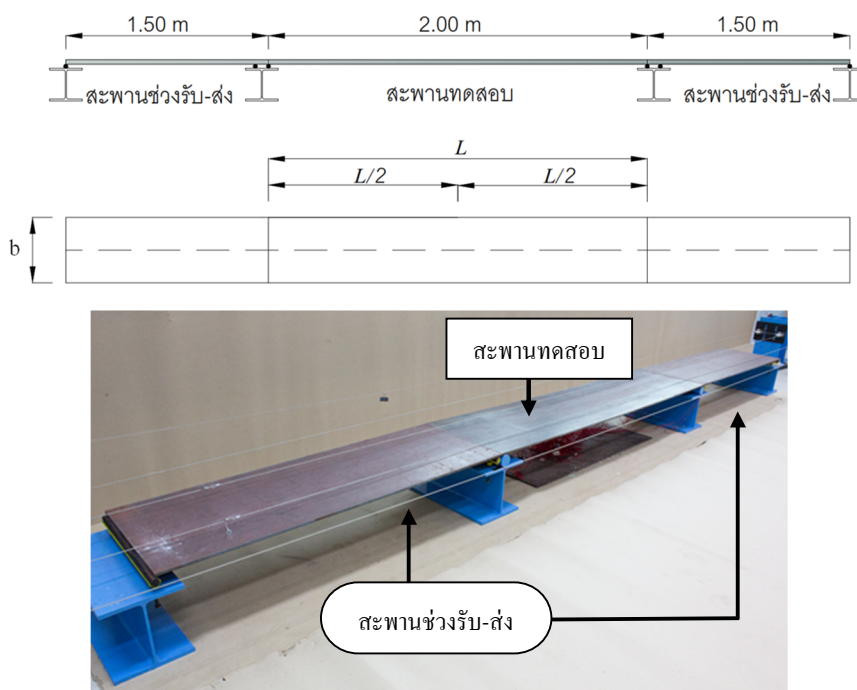
γ คือ หน่วยน้ำหนักของวัสดุ โครงสร้างสะพาน

เมื่อทำการแก้สมการที่ 3-2 ถึงสมการที่ 3-4 เพื่อหาความหนาของสะพาน ได้ตั้งสมการที่ 3-5

$$h = \frac{2f_n L^2}{n^2\pi} \sqrt{\frac{12\gamma}{E}} \quad (3-5)$$

เมื่อพิจารณาสะพานจริงที่มีความยาวช่วง 20 เมตร ลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงสะพานหรือสมการที่ 3-1 จะได้ว่าที่สะพานจริงที่มีความยาวช่วง 20 เมตร มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 5.532 Hz เมื่อพิจารณาสะพานจำลองย่อส่วน ที่จำลองด้วยเหล็ก รูปพรรณ โดยมีหน่วยน้ำหนัก γ เท่ากับ 7,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก E เท่ากับ 2.04×10^6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความยาวช่วงสะพานจำลองย่อส่วน 2 เมตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนการจำลองที่ 1 : 10 เท่า จะให้ความหนาสะพานจำลองย่อส่วนที่ใช้อยู่ที่ 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีการผลิตและจำหน่ายทั่วไป โดยกำหนดความกว้างของสะพานให้มีขนาดเท่ากับ 50 เซนติเมตร เมื่อทำการแทนค่าคุณสมบัติของสะพานจำลองย่อส่วนที่กล่าวมาข้างต้นลงในสมการที่ 3-5 จะทำให้ได้ความถี่ของสะพานจำลองย่อส่วนในโหมดที่ 1 เท่ากับ 5.781 Hz ซึ่ง

ใกล้เคียงกับความถี่ของสะพานจริงที่ได้กล่าวไว้ในช่วงต้น โดยได้แสดงชุดสะพานจำลองย่อส่วน และผังขนาดของสะพานย่อส่วนไว้ดังภาพที่ 3-2

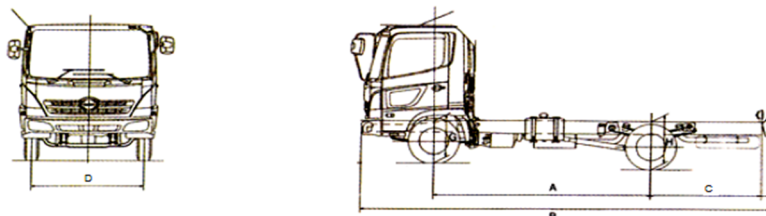


ภาพที่ 3-2 ชุดสะพานจำลองย่อส่วน

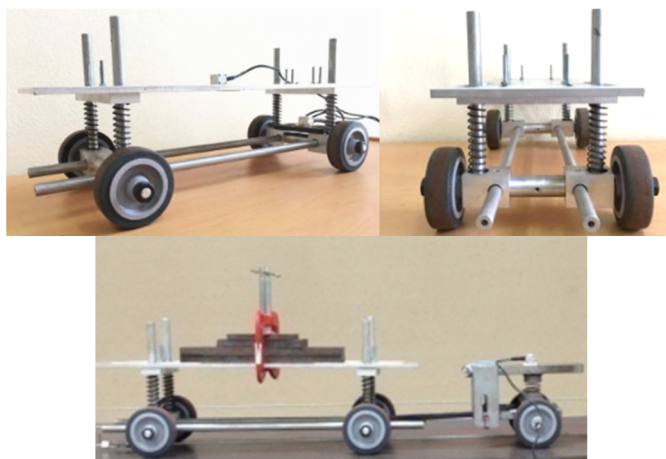
2. การออกแบบยานพาหนะจำลองย่อส่วน

ยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของยานพาหนะหลัก และ ชุดต่อพ่วง โดยการจำลองได้จำลองให้มีพฤติกรรมคล้ายกับยานพาหนะจริงกระทำกับสะพานเมื่อยานพาหนะเคลื่อนผ่าน โดยยานพาหนะถูกจำลองให้มีช่วงล่างที่สามารถสั่นขึ้นลงได้ด้วยสปริงที่มีความเหมาะสมกับมวลของยานพาหนะที่ใช้ รวมไปถึงความถี่ของยานพาหนะที่พิจารณา ซึ่งตัวยานพาหนะหลักถูกจำลองด้วยวัสดุอลูมิเนียมเนื่องจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา สามารถตัดตามแบบเป็นส่วนประกอบของแบบจำลองได้ง่าย ในการออกแบบตัวยานพาหนะจำลองเลือกใช้รถบรรทุก 6 ล้อ ยี่ห้อ Hino รุ่น FC9JELA เป็นต้นแบบที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังภาพที่ 3-3 โดยยานพาหนะจำลองถูกย่อส่วนจากรถบรรทุกยี่ห้อ Hino รุ่น FC9JELA ในอัตราส่วนประมาณ 1 : 10 ตามอัตราการย่อส่วนจากความยาวสะพานจำลอง ซึ่งจะได้นขนาดและสัดส่วนของยานพาหนะจำลองดังตารางที่ 3-1 โดยส่วนของชุดต่อพ่วงถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นเพลาดียวที่เป็นระบบองศาอิสระเดี่ยว ซึ่งสามารถเชื่อมต่อเข้ากับยานพาหนะหลัก โดยที่ปราศจากการส่งถ่ายแรงค้ำซึ่งกันและ

กัน โดยช่วงล่างของชุดต่อพ่วงถูกจำลองด้วยสปริงเพื่อให้สามารถสั่นไหวได้อย่างอิสระในแนวดิ่ง โดยลักษณะของยานพาหนะหลักและชุดต่อพ่วงได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-3 ลักษณะและขนาดรถบรรทุกยี่ห้อ Hino รุ่น FC9JELA ที่ใช้สำหรับย่อส่วน



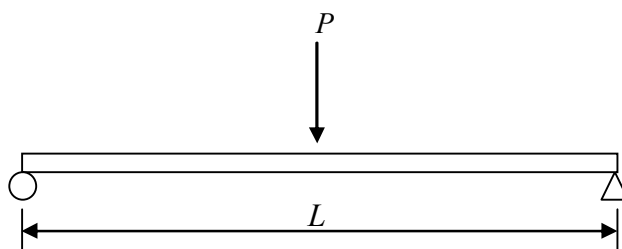
ภาพที่ 3-4 ลักษณะของยานพาหนะจำลองย่อส่วน

ตารางที่ 3-1 ขนาดและสัดส่วนของยานพาหนะจำลอง

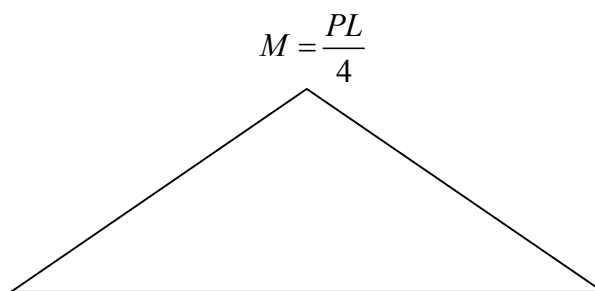
ยานพาหนะ	ขนาด (เมตร)			
	A	B	C	D
Hino - FC9JELA	3.42	6.19	1.49	1.77
ยานพาหนะจำลอง	0.34	0.62	0.15	0.18

ในการทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของยานพาหนะจำลอง โดยการจำลองน้ำหนักของยานพาหนะจำลองที่กระทำบนสะพานจำลอง ให้เกิดความเครียด (Strain) จากการตัด ณ

จุดกึ่งกลางสะพาน ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ที่น้ำหนักของยานพาหนะกระทำกับสะพานคอนกรีตทั่วไป โดยสมมติให้น้ำหนักของยานพาหนะเป็นแรงที่กระทำแบบจุดที่กระทำ ณ กึ่งกลางคานอย่างง่าย ซึ่งจะให้ค่าความเครียดที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3-5 และภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-5 แบบจำลองแรงกระทำแบบจุดที่เกิดขึ้นในคานทั่วไป



ภาพที่ 3-6 แบบจำลองโมเมนต์คัตเมื่อมีแรง P มากระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน

จากแรง P ที่กระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานทำให้ได้ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด M เท่ากับ

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3-6)$$

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับ โมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นกับคานในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic) ดังสมการที่ 3-7 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับคาน ดังสมการที่ 3-8

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = E\varepsilon \quad (3-7)$$

$$P = \frac{4EI\varepsilon}{cL} \quad (3-8)$$

โดยที่ P คือ แรงกระทำแบบจุดเนื่องจากมวลของยานพาหนะ

E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ε คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นกับคาน

c คือ ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดคานถึงขอบบนหรือขอบล่างของหน้าตัด

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน

จากสมการที่ 3-8 สามารถคำนวณน้ำหนักของยานพาหนะจำลองได้ โดยพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่าง ยานพาหนะจำลองกับสะพานจำลอง ให้เทียบเท่ากับ มวลของยานพาหนะจริงที่กระทำกับ โครงสร้างสะพานคอนกรีตจริง ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 น้ำหนักของยานพาหนะจำลองที่เทียบเท่ากับยานพาหนะจริงที่กระทำกับสะพานเมื่อพิจารณาผลของความเครียด

มวลของยานพาหนะจริง (ตัน)	ค่าความเครียดจากสะพาน คอนกรีตจริง ($\mu\varepsilon$)	มวลของยานพาหนะจำลอง (กิโลกรัม)
15	8.76	3.82
25	14.6	6.00
35	20.4	8.52

3. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.1 อุปกรณ์ตรวจวัด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ เพื่อตรวจวัดค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนของสะพานและยานพาหนะจำลองย่อส่วนมีดังต่อไปนี้

3.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Acceleration transducer)

อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งหรือหัววัดความเร่ง คือ อุปกรณ์เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าความเร่ง ความสั่นสะเทือนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ โดยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งที่ใช้ในการทดสอบเป็นรุ่น AS-2GB ยี่ห้อ KYOWA ที่มีขนาดวัดความเร่งสูงสุด $\pm 2g$ (19.61 m/s^2)

แสดงดังภาพที่ 3-7 โดยการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งไว้ที่ยานพาหนะจำลองที่ตำแหน่งศูนย์รวมมวล เพื่อวัดสัญญาณความเร่งของการสั่นสะเทือนเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพานจำลองซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ในหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจำลองต่อไป



ภาพที่ 3-7 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Acceleration transducer)

3.1.2 เกจวัดความเครียด (Strain gauge)

เกจวัดความเครียด คือ มาตรฐานที่สามารถวัดค่าการยืดหรือหดตัวของวัสดุได้ โดยมาตรฐานจะให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถแปลงเป็นค่าความเครียดได้โดยเกจวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบเป็นรุ่น KFG-10-120-C1-11L2M2R ยี่ห้อ KYOWA แสดงดังภาพที่ 3-8 โดยการทดสอบจะทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางสะพานทดสอบ 1 ตัว และที่ตำแหน่งหัวท้ายสะพานทดสอบด้านละ 1 ตัว เพื่อเป็นตัวช่วยในการพิจารณาช่วงสัญญาณความเร่งเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าและออกจากสะพาน

KYOWA		MADE IN JAPAN		
TYPE	KFG-10-120-C1-11L2M2R			
GAGE FACTOR (24°C, 50%RH)	2.08 ± 1.0%	LOT No.	Y3455S	BATCH 047C S12
GAGE LENGTH	10 mm	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	+0.008 %/°C	
GAGE RESISTANCE(24°C, 50%RH)	120.0 ± 0.8 Ω	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A , EP-34B	
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7 PPM/°C	QUANTITY	10	



ภาพที่ 3-8 เกจวัดความเครียด (Strain gauge)

3.2 ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Signal transformer module)

อุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ยี่ห้อ National instrument จำนวน 2 ชุด ได้แก่ ชุดแปลงสัญญาณความเครียดขนาด 8 ช่องสัญญาณ ซึ่งใช้กับเกจวัดความเครียด และชุดแปลงสัญญาณแบบวงจรบริดจ์ขนาด 4 ช่องสัญญาณ ซึ่งใช้กับหัววัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรืออุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง แสดงดังภาพที่ 3-9 และภาพที่ 3-10 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-9 อุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด (Strain gauge transformer module)



ภาพที่ 3-10 อุปกรณ์แปลงสัญญาณแบบบริดจ์ซึ่งใช้กับหัววัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรืออุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Bridge transformer module)

3.3 อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition)

อุปกรณ์รวมสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลจริงในงานวิจัยเพื่อแปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้นในลักษณะเวลาจริง (Real time) โดยในการศึกษานี้ใช้ชุดอุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178 เพื่อรวมสัญญาณจากชุดแปลงสัญญาณความเครียดขนาด 8 ช่องสัญญาณ และชุดแปลงสัญญาณแบบวงจร

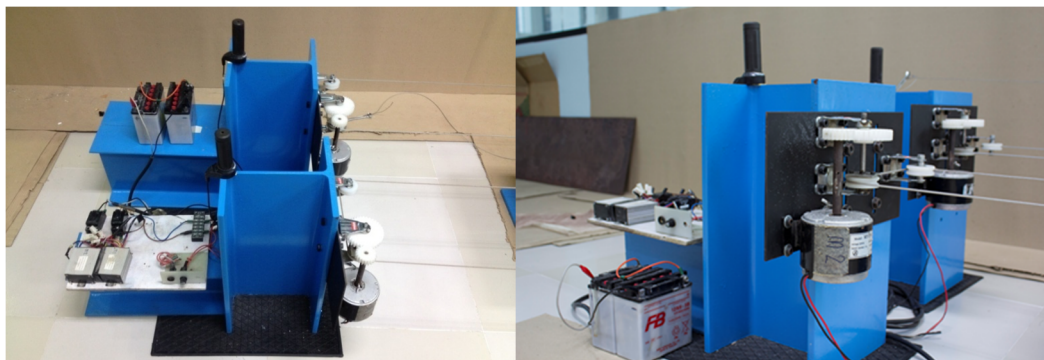
บริษัทขนาด 4 ช่องสัญญาณ แปลงส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม NI Signal Express 2013 โดยลักษณะอุปกรณ์รวมสัญญาณที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 อุปกรณ์รวมสัญญาณยี่ห้อ National Instruments NI CDAQ 9178

3.4 อุปกรณ์ชักลากยานพาหนะจำลองและชุดควบคุมความเร็ว

อุปกรณ์การชักลากยานพาหนะจำลองนี้เป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้าพร้อมชุดควบคุมความเร็ว โดยสามารถควบคุมช่วงความเร็วได้ตั้งแต่ 10 ถึง 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในการใช้งานบนจักรยานไฟฟ้าจริง โดยใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ (DC) 24 โวลต์ ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 อุปกรณ์ชักลากยานพาหนะจำลองและชุดควบคุมความเร็ว

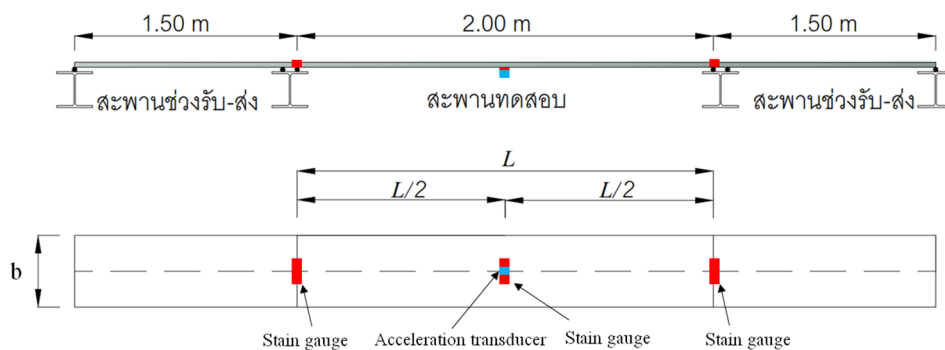
4. การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและการบันทึกข้อมูล

4.1 การติดตั้งชุดทดสอบแบบจำลองย่อส่วน

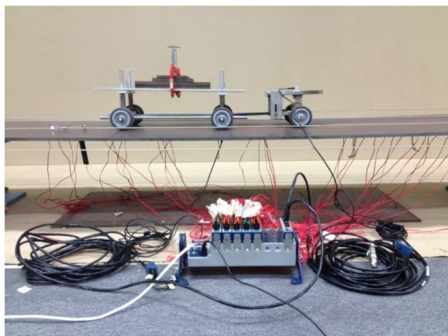
ชุดอุปกรณ์ทดสอบย่อส่วนถูกติดตั้งในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิภายในห้องที่คงที่ ซึ่งตัวสะพานทดสอบจะถูกติดตั้งไว้บนจตุรรองรับที่เป็นเหล็กรูปพรรณ โดยให้มีรูปแบบพฤติกรรมของสะพานเหมือนกันอย่างง่าย โดยตัวสะพานเองจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ สะพานช่วงส่ง สะพานช่วงรับ และสะพานทดสอบ โดยสะพานช่วงส่งและช่วงรับจะถูกติดตั้งไว้เป็นช่วงต่อที่หัวและท้ายของสะพานทดสอบที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลาง ซึ่งในการทดสอบยานพาหนะทดสอบจะถูกติดตั้งไว้บนสะพานช่วงส่ง แล้วจึงถูกลากด้วยอุปกรณ์ชักลากให้เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพานทดสอบด้วยความเร็วที่ต้องการ เมื่อยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพานทดสอบแล้วจะถูกทำให้หยุดการเคลื่อนที่ที่สะพานช่วงรับ

4.2 การติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ตรวจวัด

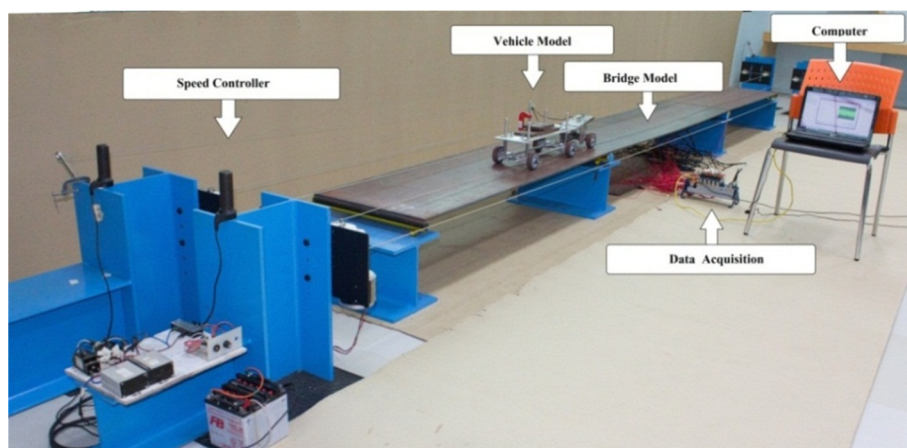
ในการทดสอบหัววัดความเร่งจะถูกติดตั้งไว้ที่ศูนย์รวมมวลยานพาหนะทดสอบ 1 ตัว และที่กึ่งกลางสะพานทดสอบ 1 ตัว และติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ที่โครงสร้างสะพาน 3 ตัว โดย 2 ตัว จะติดตั้งที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านของสะพานจำลอง และอีก 1 ตัว ติดตั้งบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 3-13 โดยอุปกรณ์ตรวจวัดทุกตัวจะถูกต่อรวมเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement signal transformer module) และอุปกรณ์แปลงสัญญาณความเครียด (Strain gauge transformer module) เพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อข้อมูลไปยังอุปกรณ์รวมสัญญาณ (Data acquisition) ที่มีหน้าที่รวม และส่งถ่ายสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อจัดเก็บข้อมูลนำวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-14 และภาพที่ 3-15 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-13 ฟังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด



ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด



ภาพที่ 3-15 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์และปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งในแนวตั้งของยานพาหนะ โดยพารามิเตอร์และปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ มวลของยานพาหนะ จำลอง ความเร็วของยานพาหนะ ความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะ และช่องจรรยาจรที่แตกต่างกัน เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. มวลของยานพาหนะ (Vehicle mass)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนมวลรวมของยานพาหนะจำลองแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3.82, 6.00 และ 8.52 กิโลกรัม โดยพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างยานพาหนะกับสะพานจำลอง ให้เทียบเท่ากับความเครียดของสะพานจริงที่เกิดขึ้นเมื่อ ยานพาหนะจริงที่กระทำกับโครงสร้างสะพานคอนกรีตจริง

2. ความเร็วของยานพาหนะ (Vehicle speeds)

ความเร็วของยานพาหนะจำลองที่ใช้ในการศึกษา เป็นความเร็วที่จำลองให้เทียบเท่ากับความเร็วของยานพาหนะจริงที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน โดยพิจารณาจากระยะเวลาทั้งหมดที่ยานพาหนะเคลื่อนอยู่บนสะพานที่ความเร็วใด ๆ ซึ่งระยะเวลาที่ได้ก็จะเป็นตัวกำหนดจำนวนข้อมูลที่ทำการบันทึกให้เทียบเท่ากับพฤติกรรมจริงอีกด้วย โดยการศึกษาได้ทำการศึกษาผลของความเร็ว โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ความเร็วต่ำ (Low speed) ความเร็วปานกลาง (Moderate speed) และความเร็วสูง (High speed) ซึ่งความเร็วที่ใช้อยู่ในช่วงประมาณ 25 ถึง 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อเทียบกับความเร็วของยานพาหนะจริง โดยแสดงความเร็วไว้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ

กรณี	ระดับความเร็ว	ยานพาหนะ		ระยะเวลาที่ อยู่บนสะพาน (s)	ความเร็วใน การทดสอบ (m/s)
		จริง	(m/s)		
ยานพาหนะต่อ ฟ่วง	ความเร็วต่ำ	25	(7.20)	3.60	0.72
	ความเร็วปานกลาง	50	(14.30)	1.80	1.43
	ความเร็วสูง	75	(21.15)	1.20	2.15
ยานพาหนะหลัก	ความเร็วต่ำ	25	(7.10)	3.30	0.71
	ความเร็วปานกลาง	50	(14.36)	1.60	1.46
	ความเร็วสูง	75	(21.13)	1.10	2.13

3. ความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะทดสอบ

ยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบถูกจำลองให้มีช่วงล่างเป็นระบบสปริงที่ไม่มีตัวหน่วง เพื่อให้ยานพาหนะสั่นไหวได้อย่างอิสระในแนวดิ่ง โดยค่าสติเฟนของสปริงและมวลของยานพาหนะจะเป็นตัวกำหนดความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะ ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาผลของความถี่ของยานพาหนะทดสอบที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน งานวิจัยนี้จึงได้จำลองยานพาหนะที่มีความถี่ที่สูงกว่า และต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทดสอบ

4. ความถี่ในการบันทึกข้อมูล

ความถี่ในการบันทึกข้อมูล (Sampling frequency) เพื่อให้สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีความละเอียดเพียงพอที่จะแสดงถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง จำเป็นที่จะต้องบันทึกข้อมูลที่มีความละเอียดสูงกว่าความถี่ของสัญญาณที่พิจารณา ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ความถี่ในการบันทึกข้อมูลไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความถี่โหมดที่ 1 ของโครงสร้างที่พิจารณา หรือไม่น้อยกว่า 2 เท่าของความถี่ในโหมดที่ 5 ของโครงสร้างที่พิจารณา แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบนี้สามารถเก็บข้อมูลได้ต่ำสุด 1,682 Hz (สามารถเก็บข้อมูลได้ต่ำสุด 1,682 ข้อมูลในเวลา 1 วินาที) ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ 2,000 Hz ซึ่งเป็นค่าที่ลงตัวและละเอียดพอต่อการเก็บข้อมูล

รูปแบบการทดสอบ

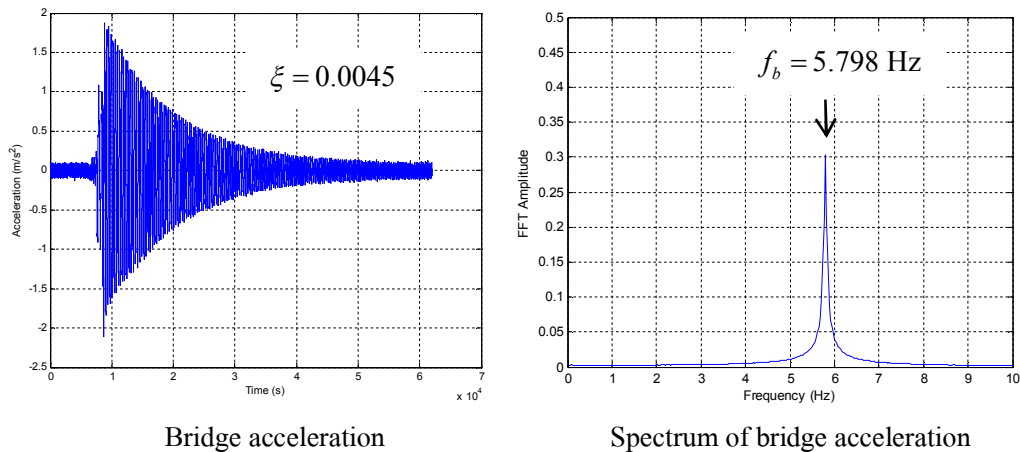
1. การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของสะพานและยานพาหนะทดสอบ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการหา

ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความถูกต้องของการตรวจวัด จึงจำเป็นต้องทราบความถี่ของสะพานและยานพาหนะทดสอบก่อนที่จะทำการทดสอบในกรณีอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบความถูกต้องกับกรณีที่ศึกษาอื่น ๆ ต่อไป

1.1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของสะพานทดสอบ

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทดสอบเบื้องต้น ทำได้ด้วยวิธีการทดสอบการสั่นไหวแบบอิสระ (Free vibration test) โดยใช้มือกระตุ้นให้สะพานที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง เกิดการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลและปล่อยให้สะพานเคลื่อนที่กลับอย่างอิสระด้วยแรงคืนกลับของตัวเองสะพานเองเมื่อนำสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ไปทำการแปลงสเปกตรัมด้วยวิธี FFT ก็จะสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ ดังแสดงในภาพที่ 3-16 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทดสอบมีค่าเท่ากับ 5.798 Hz และมีค่าสัดส่วนความหน่วง (Damping ratio, ξ) เท่ากับ 0.0045 หรือ 0.45% ซึ่งเป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ต่อไป



ภาพที่ 3-16 สัญญาณความเร่งและการแปลงสัญญาณด้วย FFT ของการหาค่าความถี่ธรรมชาติและ
สัดส่วนความหน่วงของสะพานทดสอบเบี่ยงต้น

1.2 การทดสอบเบี่ยงต้นเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะทดสอบ
การหาค่าความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะทดสอบ สามารถทำได้โดยใช้หลักการ
เดียวกันกับการหาของสะพานคังหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งค่าความถี่ของยานพาหนะที่ได้จากการ
ทดสอบได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของยานพาหนะทดสอบ

ประเภท	มวล	ความถี่	สัญลักษณ์
ยานพาหนะหลัก	8.52 กิโลกรัม (35 ตัน*)	3.906 Hz	$f_v^{3.906}$
	6.00 กิโลกรัม (25 ตัน*)	4.517 Hz	$f_v^{4.517}$
	3.82 กิโลกรัม (15 ตัน*)	6.348 Hz	$f_v^{6.348}$
ส่วนต่อพ่วง	ต่ำกว่าสะพาน**	3.784 Hz	$f_{c1}^{3.784}$
	สูงกว่าสะพาน**	7.446 Hz	$f_{c2}^{7.446}$

หมายเหตุ: *ตัวเลขในวงเล็บคือค่าเทียบเท่าน้ำหนักบรรทุกทึ่จริง

**ปรับความถี่ของส่วนต่อพ่วงโดยใช้ชุดสปริงที่มีค่านิจของสปริงที่แตกต่างกัน

2. การทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม

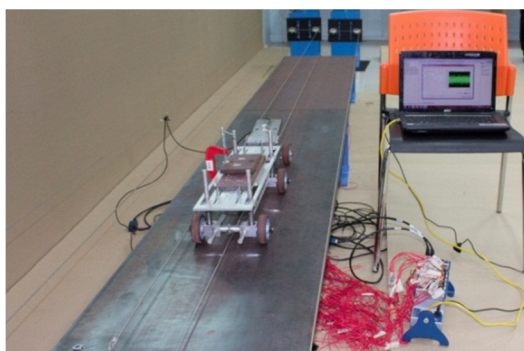
การทดสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม คือ การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน ซึ่งลักษณะของยานพาหนะที่ใช้ตรวจวัดในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) ใช้ชุดต่อพ่วงเป็นตัวตรวจหลัก และ 2) ใช้ยานพาหนะหลักเป็นตัวตรวจวัดหลัก โดยรายละเอียดในการทดสอบของ 2 ลักษณะการตรวจวัดได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

2.1 กรณีที่ใช้ชุดต่อพ่วงเป็นตัวตรวจวัดหลัก

กรณีที่ใช้ชุดต่อพ่วงเป็นตัวตรวจวัดหลัก คือ การตรวจวัดโดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งไว้ที่ชุดต่อพ่วงที่พ่วงติดกับยานพาหนะหลักในขณะที่ทดสอบ โดยมีหลักการของการตรวจวัดที่ว่า ยานพาหนะหลักจะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหว และสะท้อนการสั่นไหวนั้นกลับมายังชุดต่อพ่วงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเอาไว้ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพของยานพาหนะตรวจวัดที่หลากหลายรูปแบบ เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดในการนำไปประยุกต์ใช้จริงต่อไป โดยรูปแบบการศึกษาที่ทำการทดสอบ มี 5 กรณีที่ในการทดสอบ ได้แก่

2.1.1 กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน

กรณีนี้ได้ทดสอบโดยใช้ยานพาหนะต่อพ่วงในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการวิ่งข้ามผ่านสะพานเพียงคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 3-17 ซึ่งการทดสอบในกรณีนี้ได้ทำการศึกษามวลของยานพาหนะหลักที่เป็นตัวลากออกเป็น 3 ระดับ และศึกษาความถี่ธรรมชาติของยานพาหนะต่อพ่วงที่ 2 ระดับ โดยมีความเร็วในการตรวจวัดที่แตกต่างกันออกไป โดยแสดงรายละเอียดในการทดสอบดังตารางที่ 3-5



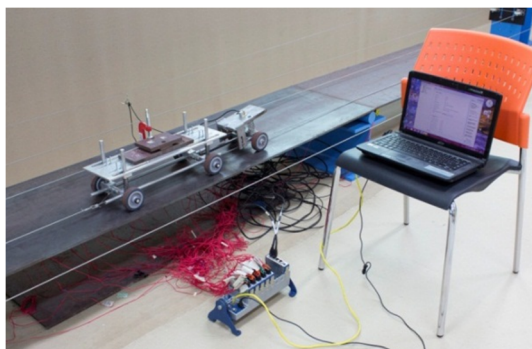
ภาพที่ 3-17 ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวกึ่งกลาง

ตารางที่ 3-5 การทดสอบกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวตั้งกลาง สะพาน

กรณี ที่	มวลของ ยานพาหนะหลัก (kg)	สัญลักษณ์ความถี่ของ ชุดต่อพ่วง	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)	ช่องจราจร
1	3.82	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	0.72	กึ่งกลาง
2	3.82	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	1.43	กึ่งกลาง
3	3.82	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	2.15	กึ่งกลาง
4	6.00	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	0.72	กึ่งกลาง
5	6.00	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	1.43	กึ่งกลาง
6	6.00	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	2.15	กึ่งกลาง
7	8.52	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	0.72	กึ่งกลาง
8	8.52	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	1.43	กึ่งกลาง
9	8.52	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	2.15	กึ่งกลาง

2.1.2 กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวช่องจราจรด้านริมของสะพาน

กรณีนี้ได้ทดสอบโดยใช้ยานพาหนะต่อพ่วงในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการวิ่งข้ามผ่านสะพานเพียงคันเดียวในแนวช่องจราจรด้านริมของสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 3-18 ซึ่งการทดสอบในกรณีนี้ได้ทำการศึกษามวลของยานพาหนะหลักที่เป็นตัวลากออกเป็น 3 ระดับ และศึกษาความถี่ธรรมชาติของรถต่อพ่วงที่ 2 ระดับ โดยมีความเร็วในการตรวจวัดที่แตกต่างกันออกไป โดยแสดงรายละเอียดในการทดสอบดังตารางที่ 3-6



ภาพที่ 3-18 ยานพาหนะต่อฟุ้งเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวช่องจราจรด้านริมของสะพาน

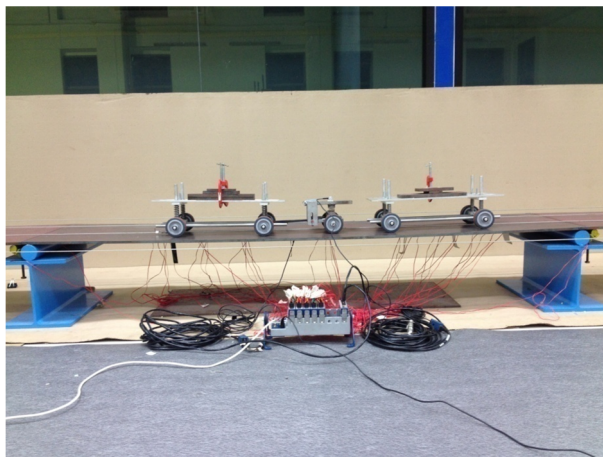
ตารางที่ 3-6 การทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อฟุ้งเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวช่องจราจรด้านริมสะพาน

กรณีที่	มวลของ ยานพาหนะหลัก (kg)	สัญลักษณ์ความถี่ของ ชุดต่อฟุ้ง	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)	ช่องจราจร
1	3.82	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	0.72	ด้านริม
2	3.82	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	1.43	ด้านริม
3	3.82	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	2.15	ด้านริม
4	6.00	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	0.72	ด้านริม
5	6.00	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	1.43	ด้านริม
6	6.00	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	2.15	ด้านริม
7	8.52	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	0.72	ด้านริม
8	8.52	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	1.43	ด้านริม
9	8.52	$f_{c1}^{3.784}, f_{c2}^{7.446}$	2.15	ด้านริม

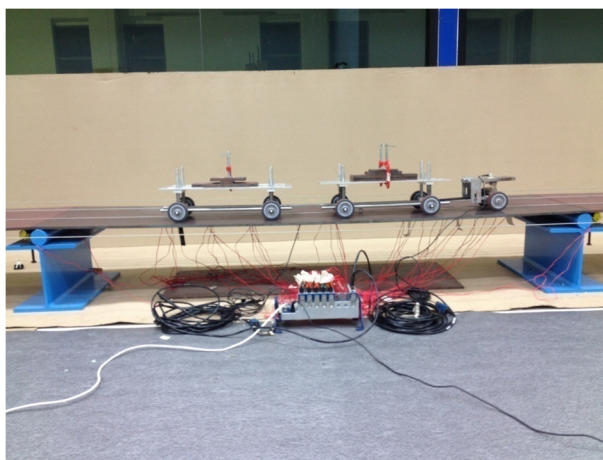
2.1.3 กรณีที่ยานพาหนะต่อฟุ้งเคลื่อนที่ไปพร้อมกับยานพาหนะอื่น

กรณีนี้ได้ทดสอบโดยใช้ยานพาหนะต่อฟุ้งในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการวิ่งข้ามผ่านสะพานไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่น โดยมีรูปแบบของการทดสอบอยู่ 2 แบบ คือ 1) กรณีที่ยานพาหนะต่อฟุ้งวิ่งนำหน้ายานพาหนะคันอื่น ดังภาพที่ 3-19 และ 2) กรณีที่

ยานพาหนะต่อพ่วงวิ่งตามหลังยานพาหนะคันอื่น ดังภาพที่ 3-20 ซึ่งรายละเอียดในการทดสอบได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 3-7



ภาพที่ 3-19 กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานนำหน้ายานพาหนะคันอื่น



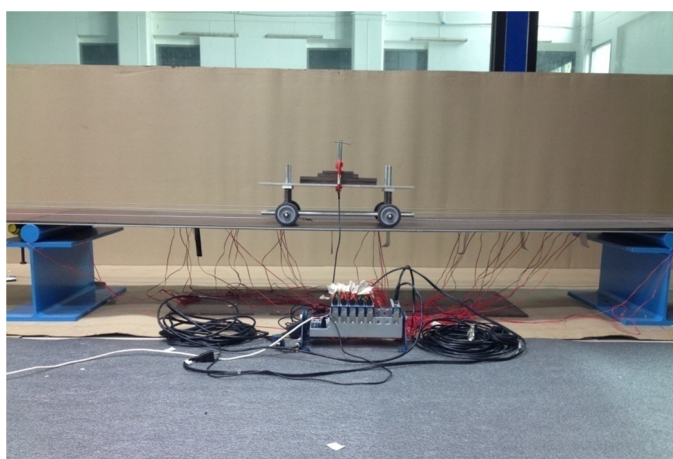
ภาพที่ 3-20 กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานตามหลังยานพาหนะคันอื่น

ตารางที่ 3-7 การทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ไปพร้อมกับยานพาหนะอื่น

กรณี ที่	มวลของ ยานพาหนะ หลัก (kg)	มวลของ ยานพาหนะ คันอื่น (kg)	ความเร็วใน การทดสอบ (m/s)	สัญลักษณ์ ความถี่ของ ชุดต่อพ่วง $f_{cl}^{3.784}$	ช่องจราจร	รูปแบบ การทดสอบ
1	6.00	6.00	0.72	$f_{cl}^{3.784}$	กึ่งกลาง	วิ่งนำ
2	6.00	6.00	0.72	$f_{cl}^{3.784}$	กึ่งกลาง	วิ่งตาม

2.2 กรณีที่ใช้ยานพาหนะหลักเป็นตัวตรวจวัดหลัก

กรณีที่ใช้นานพาหนะหลักเป็นตัวตรวจวัดหลัก คือ การตรวจวัดโดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งไว้ที่ยานพาหนะหลักในขณะทดสอบ โดยมีหลักการของการตรวจวัดที่ว่ายานพาหนะหลักจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้น และตัวเก็บสัญญาณการสั่นไหวของสะพานในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพาน โดยภาพตัวอย่างการทดสอบได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-21 โดยมีรูปแบบของการทดสอบอยู่ 2 แบบ คือ 1) กรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน และ 2) กรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวช่องจราจรด้านริมของสะพาน ได้แสดงรายละเอียดในการทดสอบไว้ดัง ตารางที่ 3-8 และ ตารางที่ 3-9 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-21 กรณีที่ยานพาหนะปราศจากส่วนต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน

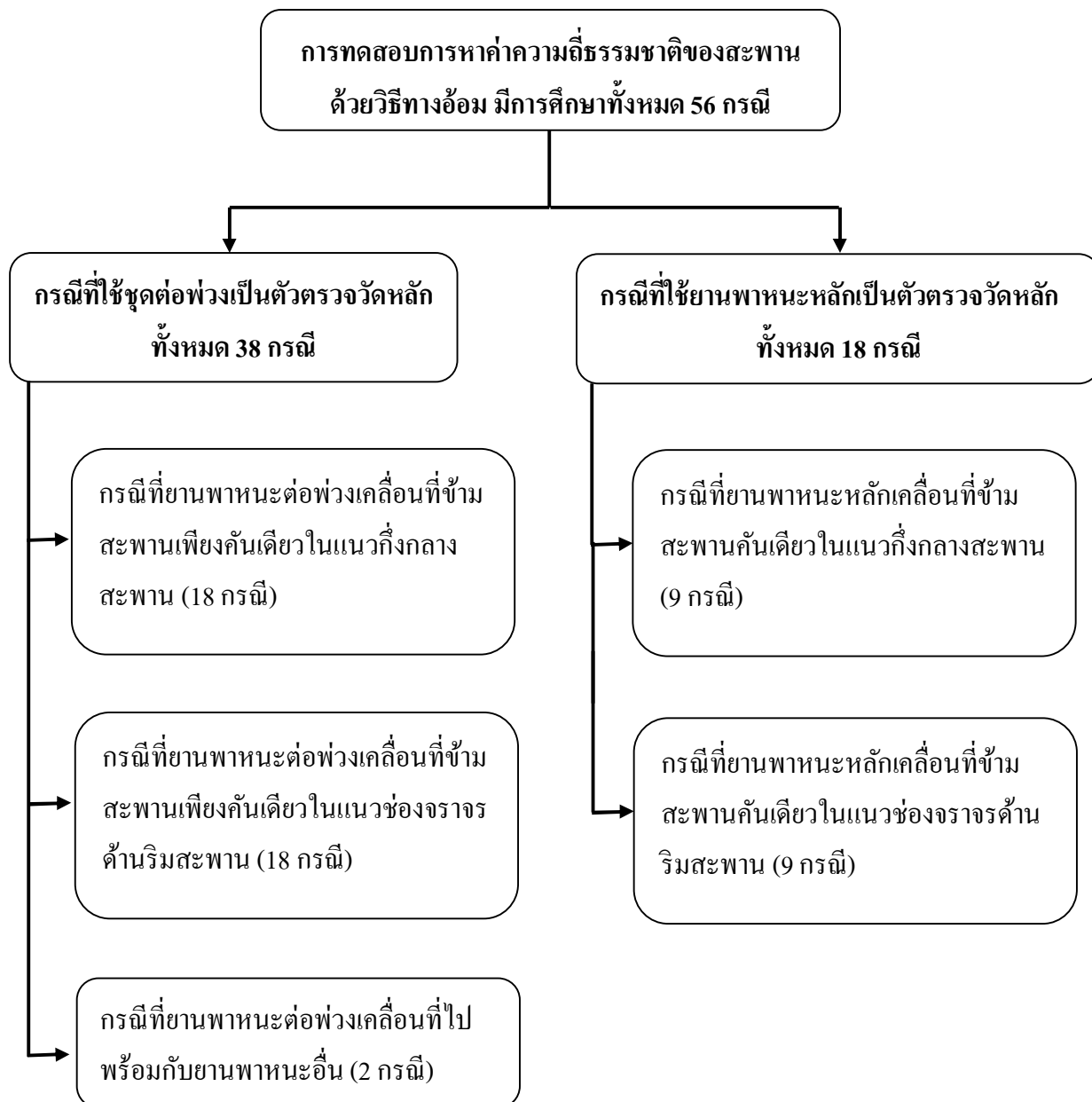
ตารางที่ 3-8 การทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน

กรณีที่	มวลของยานพาหนะหลัก (kg)	สัญลักษณ์ความถี่ของชุดต่อพ่วง	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)	ช่องจราจร
1	3.82	$f_v^{6.348}$	0.71	กึ่งกลาง
2	3.82	$f_v^{6.348}$	1.46	กึ่งกลาง
3	3.82	$f_v^{6.348}$	2.13	กึ่งกลาง
4	6.00	$f_v^{4.517}$	0.71	กึ่งกลาง
5	6.00	$f_v^{4.517}$	1.46	กึ่งกลาง
6	6.00	$f_v^{4.517}$	2.13	กึ่งกลาง
7	8.52	$f_v^{3.906}$	0.71	กึ่งกลาง
8	8.52	$f_v^{3.906}$	1.46	กึ่งกลาง
9	8.52	$f_v^{3.906}$	2.13	กึ่งกลาง

ตารางที่ 3-9 การทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวช่องจราจรด้านริมสะพาน

กรณีที่	มวลของยานพาหนะหลัก (kg)	สัญลักษณ์ความถี่ของชุดต่อพ่วง	ความเร็วในการทดสอบ (m/s)	ช่องจราจร
1	3.82	$f_v^{6.348}$	0.71	ด้านริม
2	3.82	$f_v^{6.348}$	1.46	ด้านริม
3	3.82	$f_v^{6.348}$	2.13	ด้านริม
4	6.00	$f_v^{4.517}$	0.71	ด้านริม
5	6.00	$f_v^{4.517}$	1.46	ด้านริม
6	6.00	$f_v^{4.517}$	2.13	ด้านริม
7	8.52	$f_v^{3.906}$	0.71	ด้านริม
8	8.52	$f_v^{3.906}$	1.46	ด้านริม
9	8.52	$f_v^{3.906}$	2.13	ด้านริม

2.3 สรุปการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม



ภาพที่ 3-22 แผนภาพสรุปการทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม

การดำเนินการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านด้วยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการทดสอบรวมถึงการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมการทดสอบ

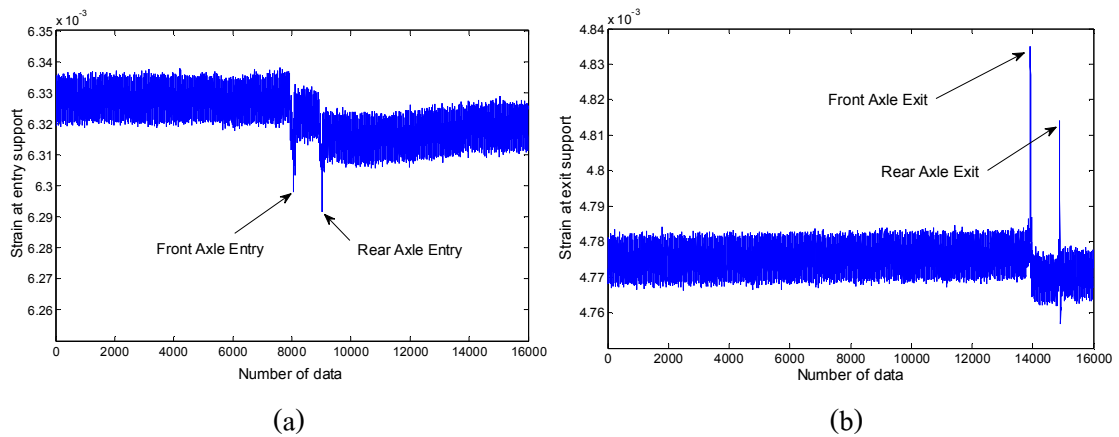
ก่อนที่จะเริ่มต้นทำการทดสอบ จำเป็นต้องเตรียมความพร้อมแบบจำลองและอุปกรณ์ตรวจวัดให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทดสอบ โดยนำยานพาหนะตามรูปแบบที่ใช้ทดสอบ ไปติดตั้งที่สะพานช่วงส่งในช่องจราจรที่ทำการทดสอบ และทำการเชื่อมอุปกรณ์ตรวจวัดให้อยู่ในสถานะพร้อมเก็บข้อมูล ซึ่งก่อนที่จะทำการทดสอบจริงทุกครั้งจะมีการทำการทดสอบเบื้องต้นก่อนเพื่อยืนยันความพร้อมของอุปกรณ์ทั้งระบบ

2. การทดสอบ

ในการทดสอบจริงได้เริ่มต้นด้วยการปรับชุดควบคุมความเร็วให้มีความเร็วตามที่ต้องการ แล้วจึงทำการเปิดให้อุปกรณ์ตรวจวัดให้เริ่มต้นการบันทึกข้อมูล หลังจากนั้นจึงทำการเปิดอุปกรณ์ชั่งลากเพื่อให้ยานพาหนะทดสอบที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเคลื่อนที่ข้ามผ่านสะพานทดสอบ และเมื่อยานพาหนะทดสอบเคลื่อนที่ออกจากสะพานทดสอบแล้วจึงทำการหยุดการบันทึกข้อมูลและปิดชุดอุปกรณ์ชั่งลาก โดยการทดสอบแต่ละกรณีจะถูกทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง เพื่อความถูกต้องในการเก็บข้อมูล

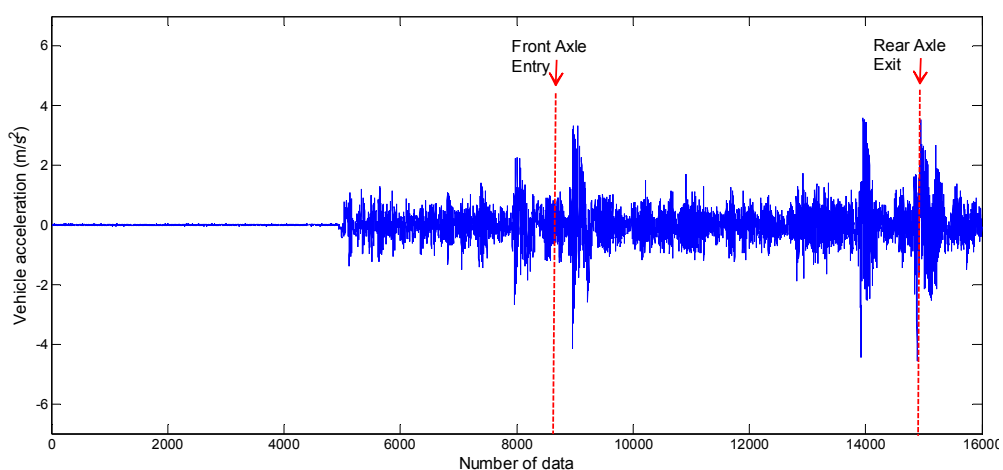
3. การประมวลผลสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ

โดยข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบ ยังเป็นสัญญาณดิบที่รวมผลของทุกเหตุการณ์ เช่น ช่วงที่ยานพาหนะทดสอบก่อนเข้าสู่สะพาน ช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพาน และช่วงที่ยานพาหนะออกจากสะพานไปแล้ว ซึ่งสัญญาณที่บันทึกมาจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด คือ สัญญาณความเร่งในแนวดิ่งของยานพาหนะและสัญญาณความเครียด เพื่อเป็นการพิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานทดสอบเท่านั้น การศึกษานี้จึงได้ทำการตัดสัญญาณที่บันทึกมาได้เฉพาะช่วงที่ต้องการ โดยพิจารณาสัญญาณความเครียดที่ได้จากเกจวัดความเครียดที่ติดไว้ที่ตำแหน่งขาเข้าของสะพานและที่ตำแหน่งขาออกของสะพาน ซึ่งจะเป็นตัวบอกช่วงเวลาที่ยานพาหนะเข้าสู่สะพาน และช่วงที่ยานพาหนะออกจากสะพาน โดยพิจารณาจากยอดของสัญญาณที่จะเกิดขึ้น เมื่อล้อของยานพาหนะมาสัมผัสกับตัวของเกจวัดความเครียด ดังแสดงตัวอย่างสัญญาณในภาพที่ 3-23

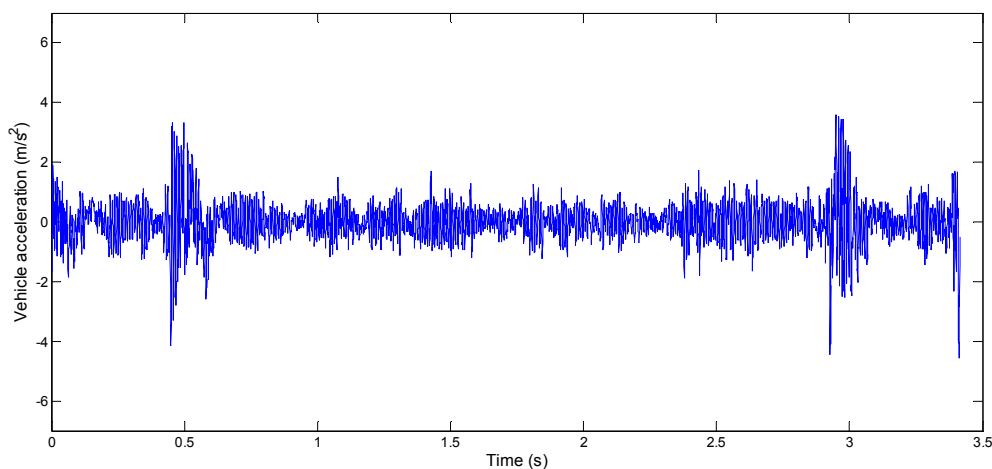


ภาพที่ 3-23 สัญญาณความเครียดที่ได้จากเกจวัดความเครียด (a) ที่ตำแหน่งขาเข้าสะพาน
(b) ที่ตำแหน่งขาออกสะพาน

จากภาพที่ 3-23 ทำให้สามารถระบุช่วงเวลาที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานได้ โดยการศึกษา
นี้ได้ศึกษาเฉพาะช่วงเหตุการณ์ที่เพลาน้ำของยานพาหนะเริ่มเข้าสู่สะพานจนถึงเพลของล้อหลัง
ออกจากสะพาน ดังนั้นช่วงเวลาที่ได้จากการระบุจากสัญญาณความเครียด จะถูกนำไปใช้ในการ
ระบุช่วงที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 3-24 และเมื่อทำการตัดสัญญาณเฉพาะช่วงเวลาที่ยานพาหนะ
อยู่บนสะพานทั้งสองเพลามาแล้ว จะได้สัญญาณความเร่งดังในภาพที่ 3-25 โดยสัญญาณที่ผ่านการ
ตัดช่วงแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานต่อไป



ภาพที่ 3-24 สัญญาณผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่บันทึกได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด



ภาพที่ 3-25 สัญญาณผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่พิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่
ยานพาหนะอยู่บนสะพานทั้งสองเพลลา

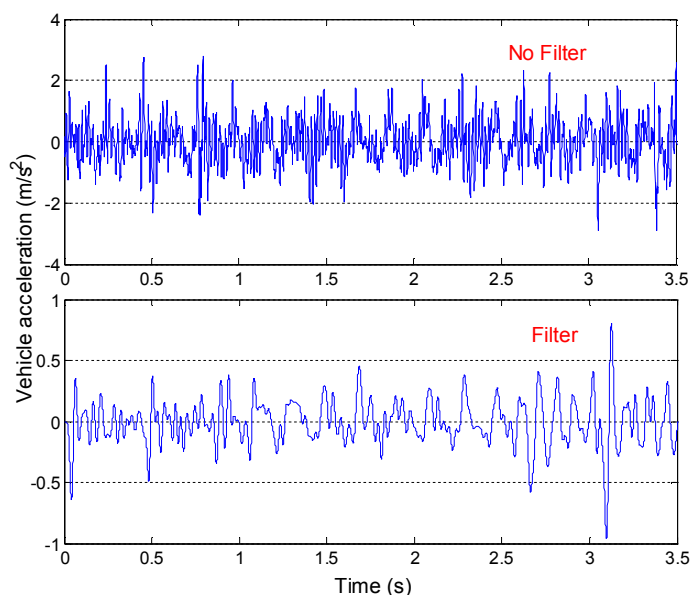
วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

เนื่องจากสัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่ตรวจวัดมาเป็นสัญญาณที่รวมองค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน อาทิเช่น ความถี่ของยานพาหนะเอง (Vehicle frequency) ความถี่ของสัญญาณรบกวน (Noise) รวมไปถึงความถี่ของสะพานที่ต้องการหา (Bridge frequency) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้ พบว่าหนึ่งปัญหาหลักของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ คือ ความถี่ของสะพานมักถูกความถี่ไม่พึงประสงค์บดบัง จึงทำให้ยากต่อการระบุ ซึ่งความถี่ไม่พึงประสงค์ประกอบไปด้วย ความถี่ของตัวยานพาหนะเองที่มักจะโดดเด่นกว่าความถี่สะพานที่ต้องการหา รวมไปถึงผลของสัญญาณรบกวนอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการที่จะช่วยในการวิเคราะห์เพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ 3 วิธีการ ดังนี้

1. วิธีการกรองสัญญาณ (Signal filtering)

วิธีการกรองสัญญาณเป็นวิธีที่นำเข้ามาช่วยในการกรองสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ออกจากสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัด โดยตัวกรองที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ วิธีการกรองสัญญาณแบบต่ำผ่าน (Low-Pass filtering) ซึ่งโดยส่วนใหญ่ความถี่โหมดแรกของโครงสร้างสะพานที่มีสัดส่วนของความถี่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น ๆ และยังอยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำ ดังนั้นจึงใช้วิธีการกรองสัญญาณแบบต่ำผ่านกรองเก็บเฉพาะสัญญาณที่มีช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 30 Hz เก็บไว้ และกรองออกความถี่ที่มีช่วงสูงกว่า 30 Hz ออก ซึ่งในส่วนนี้จะทำให้ผลของความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับหรือ

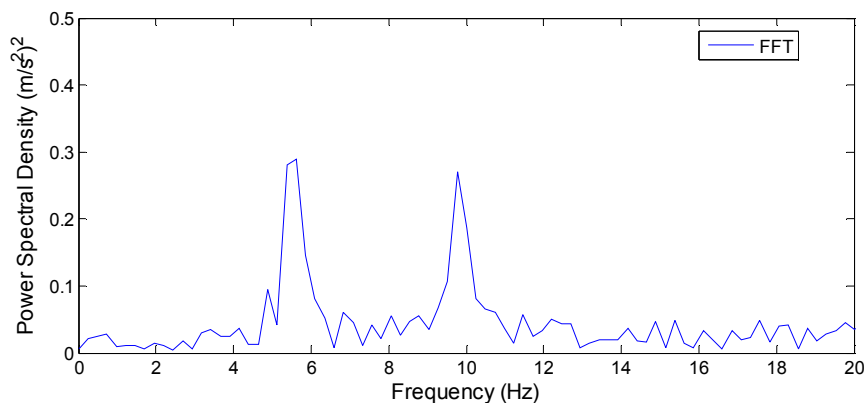
ความถี่ของไฟบ้าน ที่อยู่ในช่วง 50 Hz ถูกกรองออกไปด้วย โดยได้แสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณและที่ผ่านการกรองสัญญาณได้ดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-26 สัญญาณความเร่งที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณและสัญญาณความเร่งที่ผ่านการกรองสัญญาณ

2. วิธีการแปลงโดเมนของสัญญาณ (Signal domain transformation)

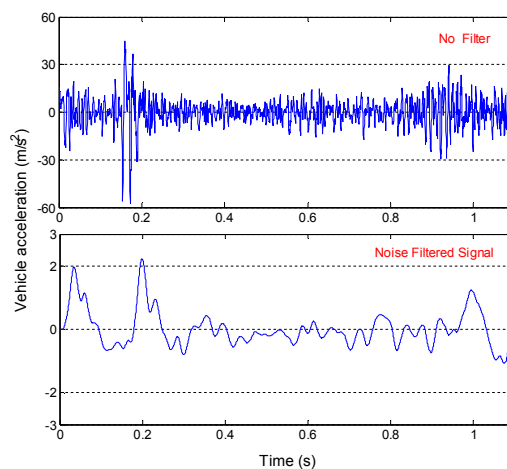
วิธีการแปลงโดเมนของสัญญาณหรือวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ คือ วิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast fourier transform, FFT) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์สัญญาณ โดยวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจะถูกใช้ในการแปลงสัญญาณที่ผ่านการกรองสัญญาณแต่ยังคงเป็นลักษณะโดเมนของเวลาอยู่ ให้เปลี่ยนเป็นแบบโดเมนความถี่ ที่จะแสดงเป็นองค์ประกอบความถี่ที่รวมเข้ามาในสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัด โดยแสดงตัวอย่างผลของการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้วจากภาพที่ 3-26 ด้วยการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ดังภาพที่ 3-27 โดยการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณจะทำการแสดงยอดของความถี่ที่ประกอบเข้ามากับสัญญาณตรวจวัด ซึ่งจากภาพที่ 3-27 เป็นภาพตัวอย่างที่ได้จากการใช้ยานพาหนะต่อพ่วงตรวจวัด ดังนั้นเมื่อทราบความถี่ของยานพาหนะและชุดต่อพ่วงแล้ว ก็จะทำให้สามารถระบุยอดความถี่ของสะพานได้ ซึ่งความแม่นยำและความถูกต้องก็จะขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ใช้ในการระบุความถี่ต่อไป



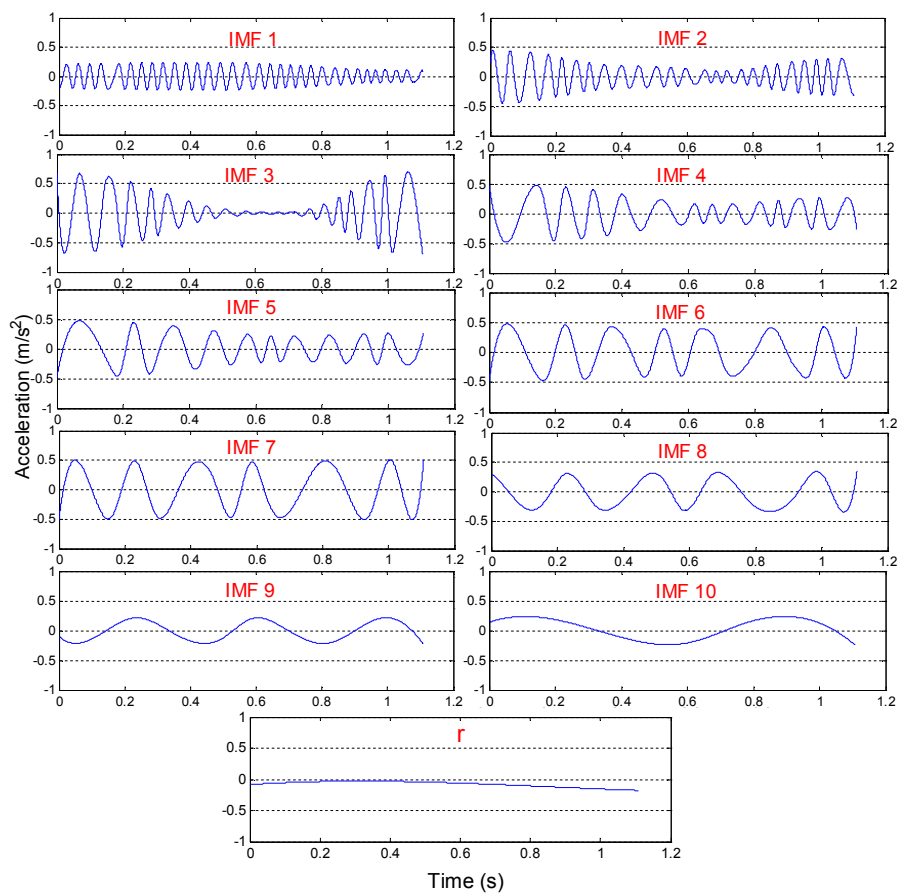
ภาพที่ 3-27 ตัวอย่างผลของการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

3. วิธีการแยกรูปแบบสัญญาณเชิงสังกต (The empirical mode decomposition)

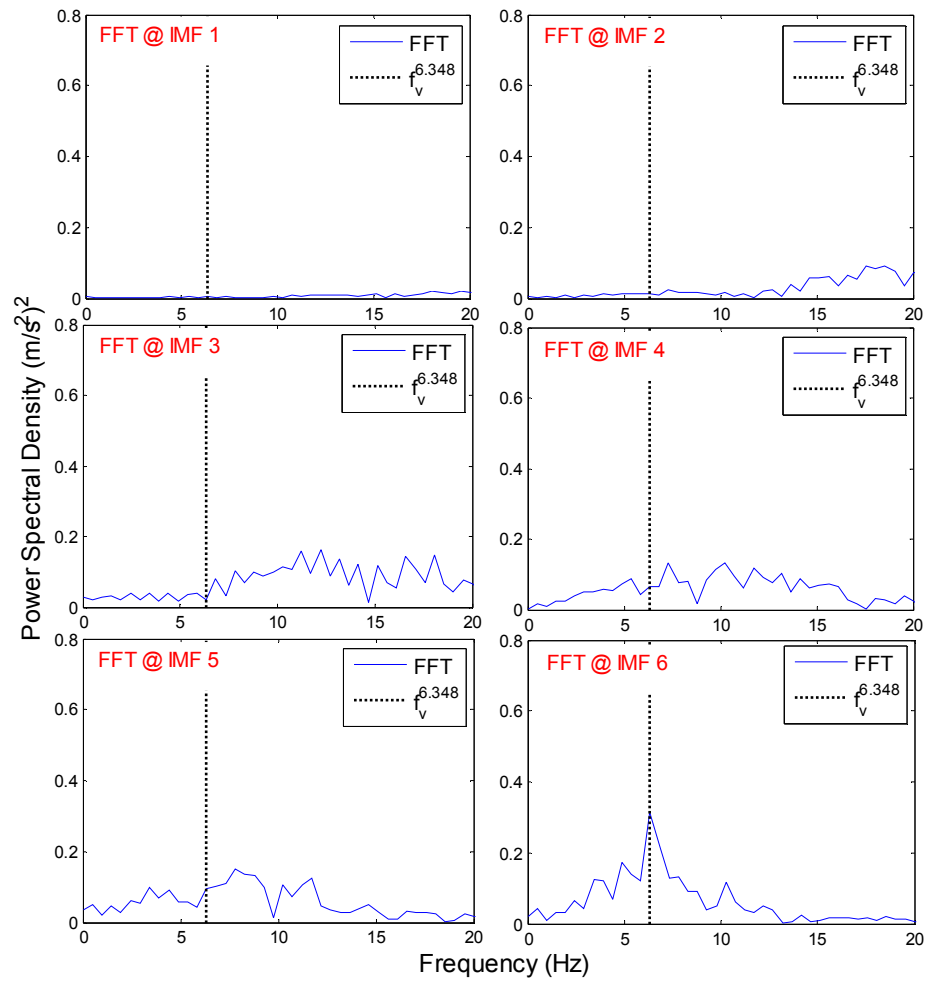
วิธีการแยกรูปแบบสัญญาณเชิงสังกตหรือวิธี EMD เป็นวิธีที่นำมาใช้ในการช่วยวิเคราะห์สัญญาณในการศึกษา โดยวิธี EMD จะทำการแยกองค์ประกอบของความถี่ออกเป็นความถี่ในส่วนย่อย ๆ ดังแสดงตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดดังภาพที่ 3-28 และสัญญาณที่ผ่านการแยกองค์ประกอบด้วยวิธี EMD ในภาพที่ 3-29 ซึ่งพบว่าสัญญาณตัวอย่างสามารถแยกสัญญาณย่อย ๆ ได้ทั้งหมด 11 โหมดการสั่น และเมื่อพิจารณาสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบโคไซน์ของความถี่ พบว่า IMF ที่ 6 เป็นสัญญาณที่คาดว่าจะจะเป็นสัญญาณการสั่นไหวของตัวยานพาหนะ เมื่อทราบช่วงความถี่ของยานพาหนะจากการทดสอบเบื้องต้นแล้ว โดยแสดงตัวอย่างสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบสเปกตรัมของสัญญาณดังภาพที่ 3-30 และภาพที่ 3-31



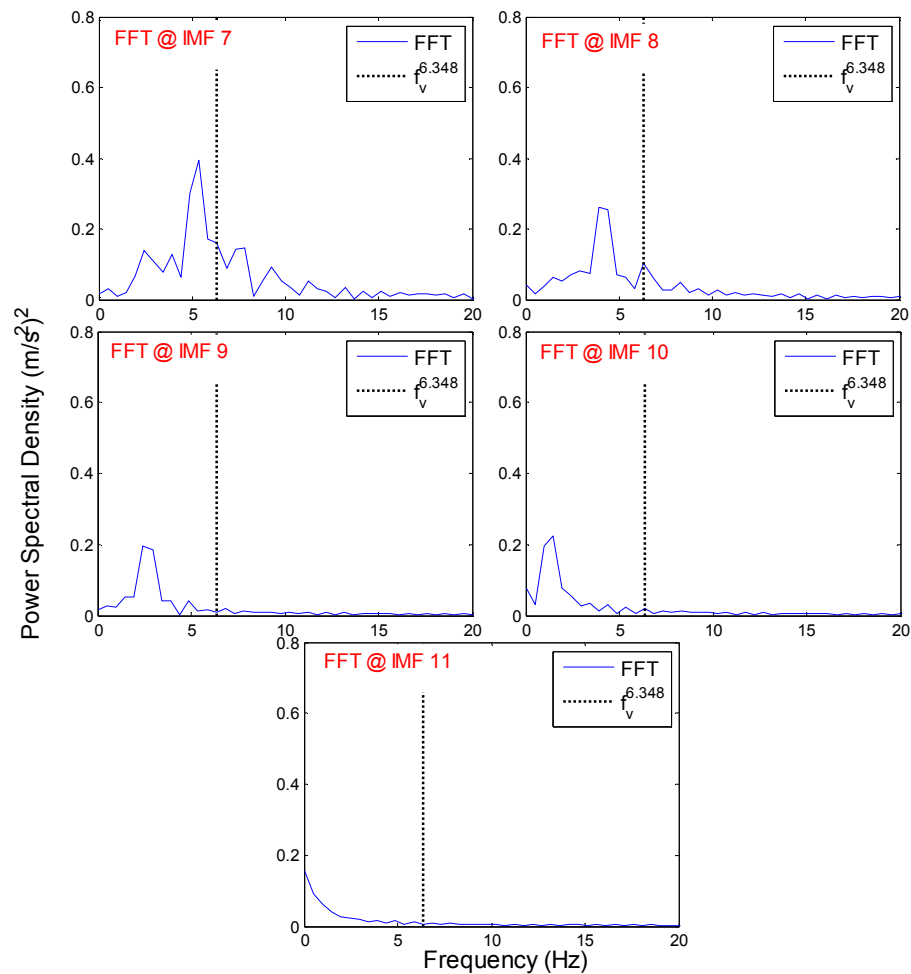
ภาพที่ 3-28 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดและสัญญาณที่ผ่านวิธี EMD



ภาพที่ 3-29 สัญญาณที่ผ่านการแยกองค์ประกอบด้วยวิธี EMD

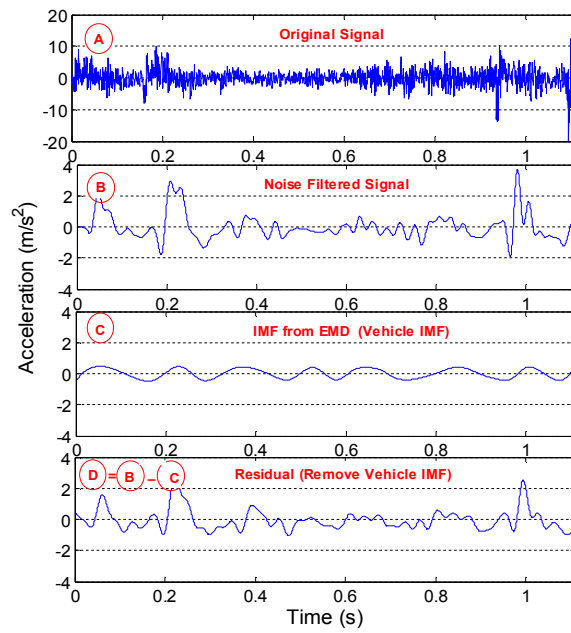


ภาพที่ 3-30 สเปกตรัมของสัญญาณ IMF 1 ถึง IMF 6

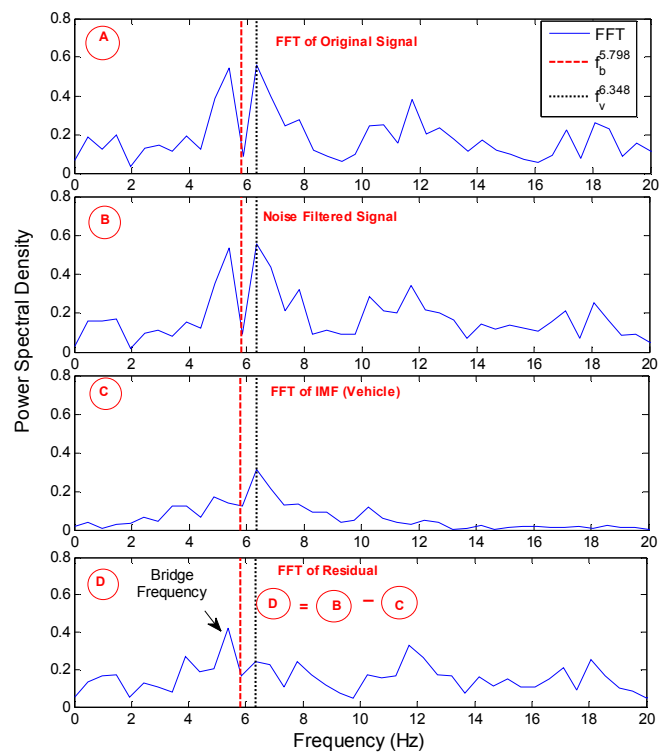


ภาพที่ 3-31 สเปกตรัมของสัญญาณ IMF 7 ถึง IMF 11

เมื่อพิจารณาแล้วว่า สัญญาณ IMF 6 เป็นสัญญาณการสั่นไหวของยานพาหนะ จึงทำการคัดแยกสัญญาณ IMF 6 ออกจากสัญญาณตั้งต้น ดังแสดงในภาพที่ 3-32 และภาพที่ 3-33 ซึ่งผลจากการแยกความถี่ของยานพาหนะออกจากสัญญาณดิบแล้วจะช่วยทำให้การระบุความถี่ของสะพานสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยความถูกต้องและความแม่นยำของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน จะถูกศึกษาในเชิงพฤติกรรมของสะพานและยานพาหนะต่อไป



ภาพที่ 3-32 ตัวอย่างการคัดแยกสัญญาณความเร่งของยานพาหนะออกจากสัญญาณตรวจวัด



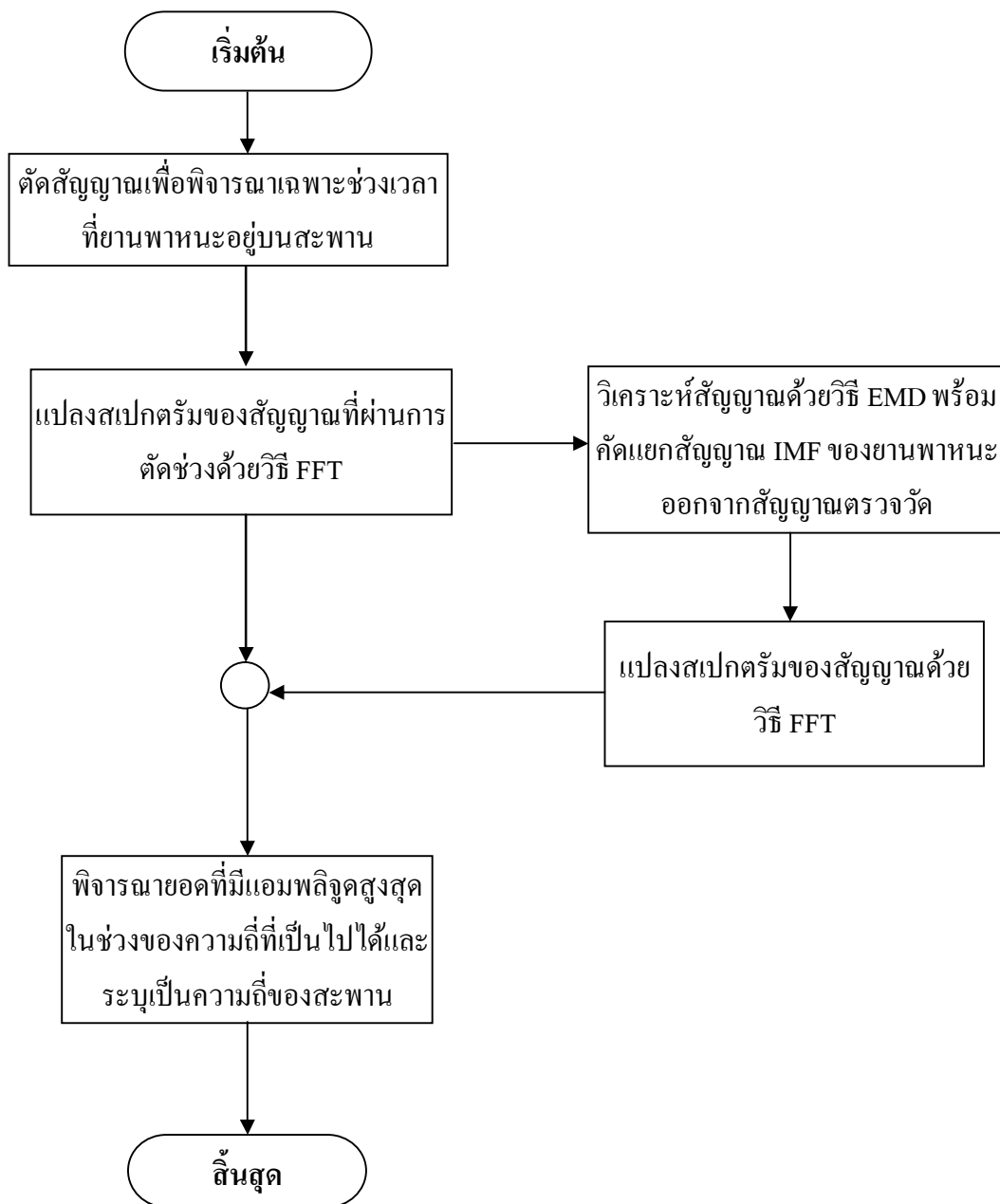
ภาพที่ 3-33 ตัวอย่างสเปกตรัมความเร่งของการแยกองค์ประกอบความถี่ของยานพาหนะออกจากสัญญาณตรวจวัด

ขั้นตอนการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของ

ยานพาหนะ

เนื่องจากวิธีการที่ทำการศึกษาคือการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม ที่อาศัยยานพาหนะเป็นตัวกลางในการทดสอบด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมการสั่นไหวที่ตัวของยานพาหนะแทนการติดตั้งที่โครงสร้างสะพานโดยตรง ซึ่งหนึ่งปัญหาที่พบบ่อยในงานวิจัยที่ผ่านมา คือ ปัญหาเนื่องจากผลของพฤติกรรมการสั่นไหวของตัวยานพาหนะเองรวมถึงผลของความถี่อื่น ๆ ที่ไม่เพียงประสงค์มักจะแอมพลิจูดของความถี่ที่โดดเด่นกว่าความถี่ของสะพานในกรณีที่สะพานเกิดการสั่นไหวในระดับที่ต่ำ จึงส่งผลให้การระบุความถี่ของสะพานทำได้ยากหรืออาจจะให้ผลการระบุที่ผิดพลาด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอรูปแบบการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้วิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณกับวิธี EMD และวิธีการวิเคราะห์เฉพาะช่วงของความถี่ที่เป็นไปได้ประกอบการพิจารณาเพื่อระบุความถี่ของสะพาน โดยมีขั้นตอนของการระบุตามภาพที่ 3-34

ขั้นตอนของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะเริ่มต้นด้วยการนำสัญญาณที่ผ่านกระบวนการตัดสัญญาณ เอาเฉพาะที่ยานพาหนะตรวจวัดอยู่บนสะพานและผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกแล้ว มาทำการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณด้วยวิธี FFT เพื่อดูองค์ประกอบของสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัดเบื้องต้น จากนั้นจึงนำสัญญาณความเร่งข้างต้นไปทำการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD เพื่อหาสัญญาณ IMF ที่เป็นลักษณะการสั่นไหวของยานพาหนะตรวจวัด แล้วจึงทำการแยกสัญญาณนั้นออกจากสัญญาณตรวจวัดที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว เมื่อทำการแยกสัญญาณ IMF ของยานพาหนะออกแล้วจึงนำกลับมาทำการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณอีกครั้ง โดยการระบุความถี่ของสะพานจะพิจารณาทั้งผลของสเปกตรัมความเร่งของสัญญาณตรวจวัดและผลของสเปกตรัมของสัญญาณที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี EMD แล้ว ประกอบการพิจารณา ซึ่งการพิจารณาจะพิจารณาเฉพาะช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาช่วงความถี่จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงของสะพานจากงานวิจัยของ Tilly (1986) ดังภาพที่ 3-1 เช่นการศึกษานี้จำลองให้สะพานมีความถี่ที่ใกล้เคียงกับสะพานจริงที่มีความยาวช่วง 20 เมตร ดังนั้นความถี่ที่พิจารณาจากภาพที่ 3-1 จะอยู่ในช่วงประมาณ 4.4 Hz ถึง 7.2 Hz โดยความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดที่ไม่ใช่ความถี่ของยานพาหนะ จะถูกระบุว่าเป็นความถี่ของสะพาน ซึ่งผลของการระบุจะนำไปเปรียบเทียบกับความถี่ของสัญญาณที่ได้จากหัววัดความเร่งอีกตัวที่ติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานของกรณีการตรวจวัดนั้น เพื่อพิจารณาความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอ



ภาพที่ 3-34 ขั้นตอนในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ

บทที่ 4

ผลการศึกษาคหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนองความเร่ง ของยานพาหนะต่อพ่วง

การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะต่อพ่วง

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาคหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะต่อพ่วง โดยยานพาหนะที่ใช้เป็นแบบยานพาหนะ 4 ล้อ ถูกใช้เป็นตัวกระตุ้นให้สะพานการสั่นไหว และใช้ส่วนต่อพ่วงที่ติดมาด้วยเป็นตัวดูดซับการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้น การทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนมวลของตัวยานพาหนะ ความเร็วในการสัญจร และรูปแบบของการสัญจรที่แตกต่างกันไป เพื่อเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม

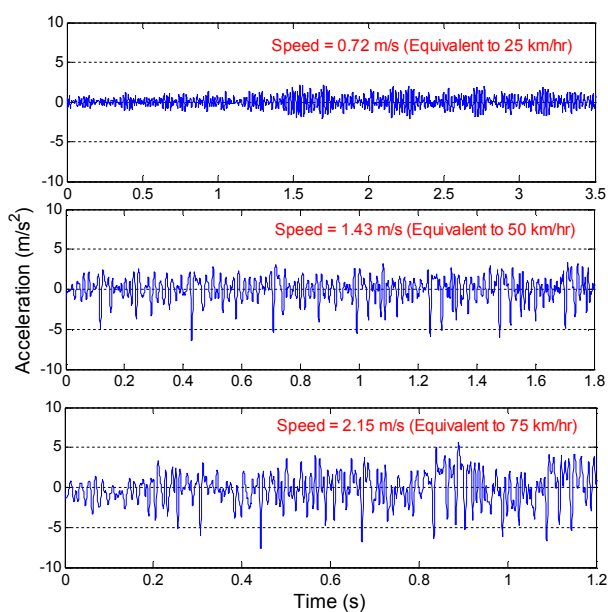
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการศึกษาคหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ ของกรณีที่ใช้ยานพาหนะต่อพ่วงในการตรวจวัด โดยการนำเสนอผลจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้ ส่วนแรกจะนำเสนอผลการศึกษาเชิงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะเคลื่อนที่ เพื่อให้เข้าใจในพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานและยานพาหนะที่มีต่อกันในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่าน และส่วนที่สองเป็นการนำเสนอผลการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมของกรณีใช้ยานพาหนะต่อพ่วงตรวจวัดรวมไปถึงข้อควรพิจารณาในการนำไปประยุกต์ใช้ อย่างมีประสิทธิภาพ

พฤติกรรมของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะขณะเคลื่อนที่

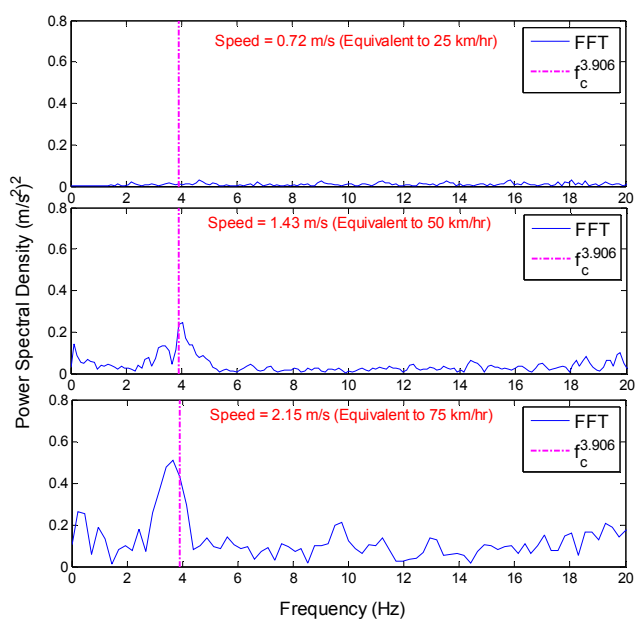
เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาวิธีการหาความถี่ของตัวโครงสร้างของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม แทนการติดอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่โครงสร้างสะพานโดยตรง ดังนั้นความเข้าใจในพฤติกรรมของสะพาน และยานพาหนะจึงเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการอภิปรายผลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ

1. พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ
ยานพาหนะต่อพ่วงได้ถูกนำมาทำการทดสอบด้วยการเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ ที่ความเร็วแตกต่างกันไป 3 ระดับ คือ 0.71, 1.46 และ 2.13 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบตรวจวัดความถี่ของสะพาน ที่เทียบเคียงกับพฤติกรรมจริงที่ยานพาหนะเคลื่อนที่

ข้ามสะพานด้วยความเร็วอยู่ในช่วงประมาณ 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน ซึ่งผลที่ได้ถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 4-1 และภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-1 สัญญาณความเร่งของยานพาหนะต่อฟังกเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ

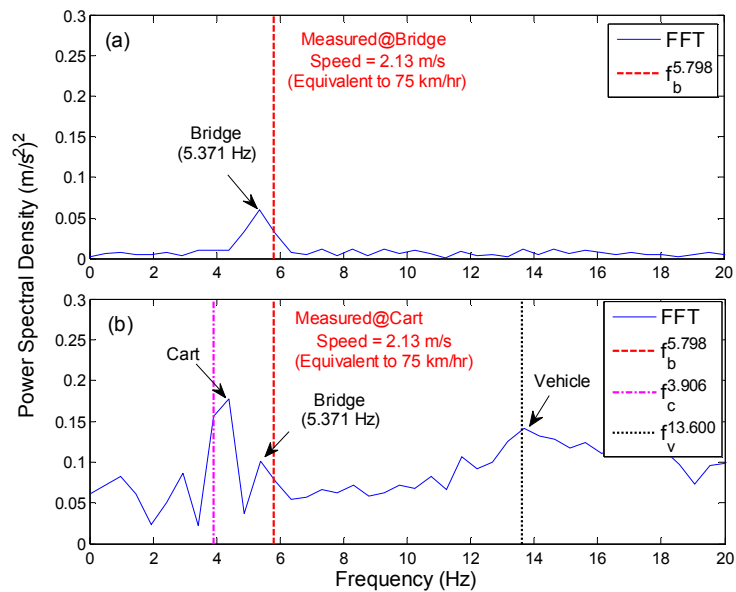


ภาพที่ 4-2 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของยานพาหนะต่อฟังกเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ

จากภาพที่ 4-1 เป็นสัญญาณความเร่งในแนวดิ่งของยานพาหนะต่อพวงที่เคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ โดยเป็นสัญญาณที่ได้จากหัววัดความเร่งที่ติดตั้งไว้ที่ตัวส่วนต่อพวง และภาพที่ 4-2 เป็นการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณให้อยู่ในโดเมนความถี่ จากการทดสอบพบว่าความเร็วเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการสั่นไหวของตัวส่วนต่อพวง ซึ่งสังเกตได้จากทั้งสัญญาณความเร่งในแนวดิ่ง ในภาพที่ 4-1 ที่เริ่มมีลักษณะของการสั่นที่รุนแรงมากขึ้นเมื่อใช้ความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลของการสั่นไหวของตัวส่วนต่อพวงเองโดยสังเกตได้จากกราฟโดเมนความถี่ในภาพที่ 4-2 ที่พบยอดความถี่ที่อยู่บริเวณรอบเส้นความถี่ของชุดต่อพวงที่ได้ทดสอบไว้ด้วยการสั่นไหวแบบอิสระ โดยยอดของความถี่นั้นมีแนวโน้มของแอมพลิจูดที่สูงขึ้นเมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากชุดต่อพวงถูกออกแบบให้ช่วงล่างเป็นระบบสปริงที่สามารถสั่นไหวได้อย่างอิสระในแนวดิ่ง อีกทั้งชุดต่อพวงในกรณีตัวอย่างได้ใช้สปริงที่มีสตีเฟนเนสที่ต่ำ เพื่อให้สามารถตอบสนองกับพฤติกรรมการสั่นไหวได้ง่าย จึงทำให้เกิดการสั่นไหวที่รุนแรงขึ้นเมื่อความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่สูงขึ้น

2. พฤติกรรมทางพลศาสตร์ระบบปฏิสัมพันธ์ของสะพานและยานพาหนะต่อพวงเคลื่อนที่

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม ดังนั้นการเข้าใจถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานและยานพาหนะต่อพวงที่มีต่อกันในขณะที่ทดสอบจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากต่อการศึกษา ซึ่งเป็นส่วนช่วยทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานเมื่อถูกยานพาหนะที่เป็นตัวกระทำให้เกิดการสั่นไหวเคลื่อนที่ผ่าน และช่วยให้เข้าใจในพฤติกรรมการสั่นไหวของยานพาหนะที่ใช้เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งความเข้าใจในพฤติกรรมของระบบปฏิสัมพันธ์ของสะพานกับยานพาหนะนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณา ในการนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้ ส่วนนี้เป็นการทดสอบให้ยานพาหนะที่ติดตั้งหัววัดความเร่งไว้ที่ตัวส่วนต่อพวงเคลื่อนที่ข้ามสะพานที่มีการติดตั้งหัววัดความเร่งไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน ซึ่งได้แสดงผลที่ได้จากการทดสอบดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของสะพานและยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็วเทียบเคียงพฤติกรรมจริงที่ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน (a) สเปกตรัมความเร่งจากการตรวจวัดที่สะพาน (b) สเปกตรัมความเร่งจากการตรวจวัดที่ส่วนต่อฟาง

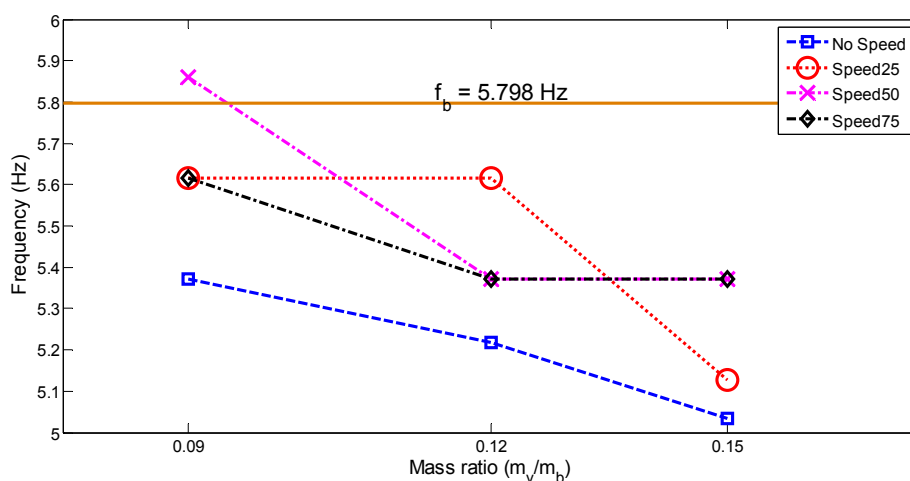
จากภาพที่ 4-3 กราฟบนเป็นสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งในแนวดิ่งที่ได้จากหัววัดความเร่งที่ติดตั้งที่กึ่งกลางของสะพาน และกราฟล่างเป็นสัญญาณที่ได้จากหัววัดความเร่งที่ติดตั้งที่จุดต่อฟาง เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่ได้จากสะพานพบว่า สะพานเกิดการสั่นไหวด้วยความถี่ 5.371 Hz และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของจุดต่อฟางก็พบว่าเจอยอดความถี่เดียวกันกับที่เจอในสเปกตรัมของสะพาน ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าพฤติกรรมของสะพานกับยานพาหนะที่เกิดขึ้นเป็นไปตามแนวคิดที่ตั้งไว้ คือ ยานพาหนะเป็นตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหว และการสั่นไหวนั้นก็ถูกดูดซับเข้ากับการสั่นไหวของจุดต่อฟาง แต่ค่าความถี่ที่พบนั้นพบว่าไม่ตรงกับความถี่จริงของสะพานที่ได้ทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระที่ 5.798 Hz

ด้วยเหตุที่ความถี่ในการสั่นไหวของสะพานไม่ตรงกับความถี่จริงที่ได้ทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อด้วยทดสอบโดยปรับเปลี่ยนมวลและความเร็วของยานพาหนะหลัก พร้อมเปรียบเทียบกับผลของกรณีที่ยอดยานพาหนะต่อฟางไว้บนกึ่งกลางสะพานแล้วทำการทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ ซึ่งได้สรุปผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ของสะพาน

มวลของ ยานพาหนะ	มวลของ ส่วนต่อ พ่วง	ความถี่			
		ทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ จอดยานพาหนะต่อพ่วงบน สะพาน	ทดสอบด้วยยานพาหนะเคลื่อนที่ 0.71 m/s (25 km/hr)	1.43 m/s (50 km/hr)	2.15 m/s (75 km/hr)
3.82 kg	3.20 kg	5.371 Hz	5.615 Hz	5.859 Hz	5.615 Hz
6.00 kg	3.20 kg	5.219 Hz	5.615 Hz	5.371 Hz	5.371 Hz
8.52 kg	3.20 kg	5.035 Hz	5.127 Hz	5.371 Hz	5.371 Hz

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4-1 ที่เป็นผลความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของความถี่สะพาน เมื่อถูกยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่าน กับกรณีที่จอดยานพาหนะต่อพ่วงไว้แบบอยู่นิ่งที่กึ่งกลางสะพาน ซึ่งพบว่าค่าความถี่ของสะพานที่ได้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมวลของยานพาหนะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในกรณีที่จอดยานพาหนะไว้ที่อยู่นิ่งบนสะพาน และกรณีที่ให้ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพาน เนื่องจากในช่วงเวลาที่ยานพาหนะอยู่บนสะพาน มวลของยานพาหนะถูกมองว่าเป็นมวลของระบบของสะพาน จึงทำให้ความถี่ของสะพานมีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนมวลของยานพาหนะที่มีต่อสะพาน (Mass ratio, m_v/m_b) ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสะพานกับสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวลของสะพาน ในภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสะพานกับสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวลของสะพาน

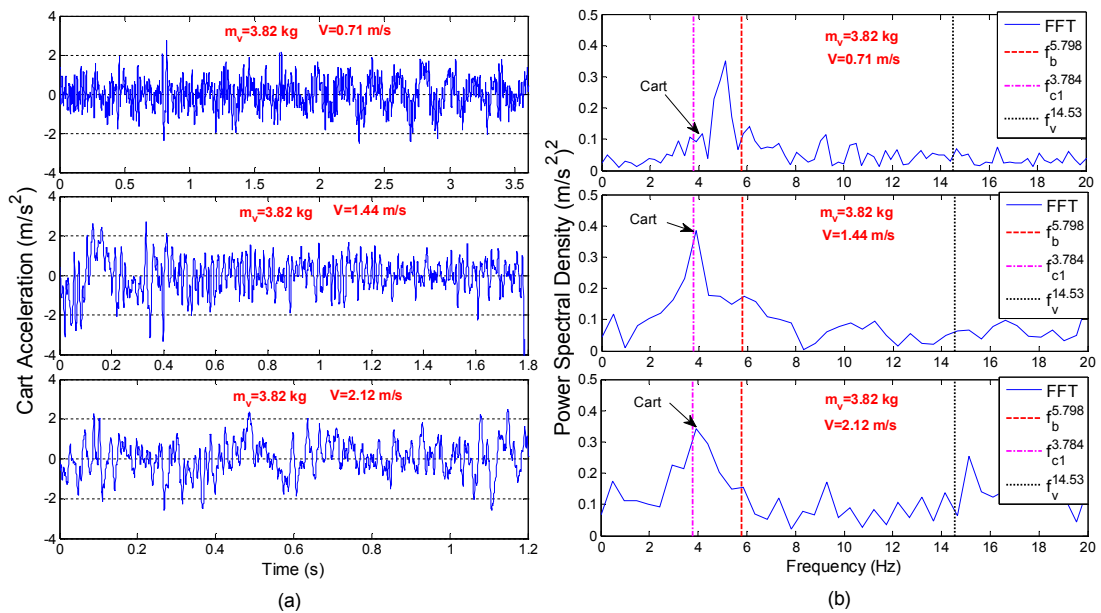
จากภาพที่ 4-4 พบว่าการใช้ยานพาหนะมีมวลหรือมีส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวลของสะพานเพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มที่จะทำให้ความถี่จากการสั่นไหวของสะพานเปลี่ยนแปลงไปในทางที่มีค่าน้อยกว่าค่าความถี่จริงมากขึ้น อีกทั้งยังพบว่าความเร็วของยานพาหนะนั้นก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแปรปรวนของค่าความถี่ของสะพาน ด้วยเหตุนี้อาจจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่อค่าความถี่ที่ระบุได้จากการทดสอบด้วยวิธีทางอ้อมเมื่อเทียบกับความถี่จริงของสะพาน ดังนั้นการศึกษาด้วยระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะอาจจะต้องพิจารณาถึงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานไม่มากนักด้วย

ผลของพารามิเตอร์และรูปแบบของการตรวจวัดที่มีผลต่อการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะต่อพวง

การศึกษาได้แบ่งรูปแบบของการทดสอบออกเป็น 3 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการทดสอบกรณีที่ยานพาหนะต่อพวงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน แบบที่ 2 เป็นกรณีที่ยานพาหนะต่อพวงเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวด้านริมของสะพานและแบบที่ 3 เป็นการทดสอบกรณีที่ยานพาหนะต่อพวงเคลื่อนที่ข้ามสะพานไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่นในแนวกึ่งกลางสะพาน โดยที่การทดสอบก็จะมีมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่สนใจ เช่น มวลของยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะและความถี่ของชุดต่อพวง เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มีต่อการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

1. ผลของความเร็วในการสัญจรตรวจวัด

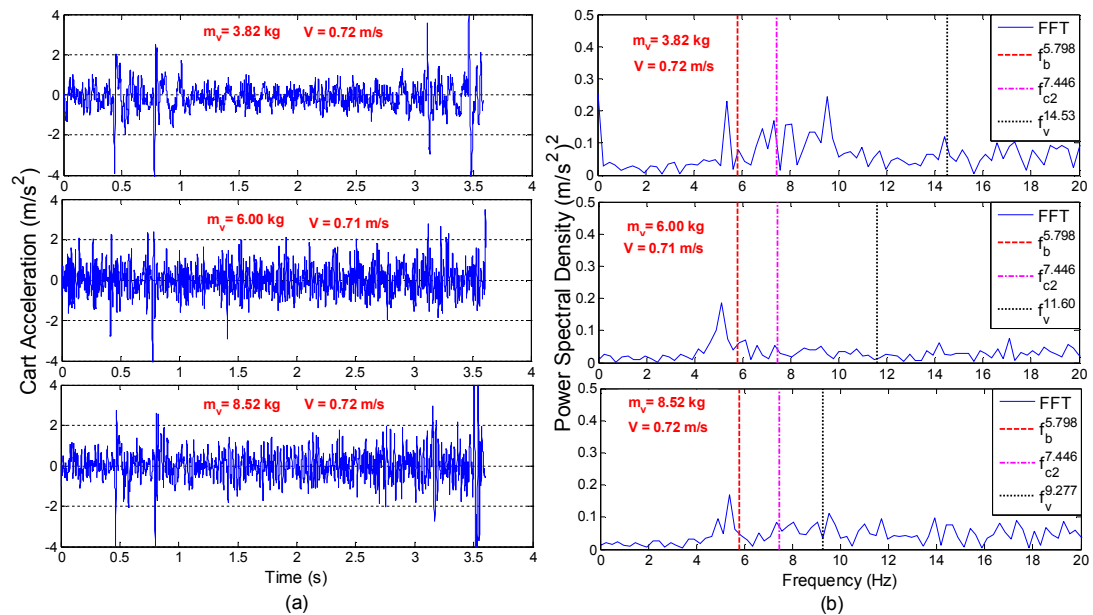
จากผลการทดสอบพบว่า ความเร็วในการสัญจรตรวจวัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม เนื่องจากการใช้ความเร็วในการสัญจรตรวจวัดที่สูงขึ้นมีส่วนในการช่วยกระตุ้นให้ชุดต่อพวงเองมีพฤติกรรมการสั่นไหวที่รุนแรงขึ้น จึงส่งผลให้ความถี่ของชุดต่อพวงมีพฤติกรรมไปคบค้ำความถี่ของสะพาน ทำให้การระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานทำได้ยากขึ้น ดังแสดงตัวอย่างของผลการทดสอบในภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ผลของความเร็วของการสั่นจตุรที่มีต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม (a) สัญญาณความเร่งจากการตรวจวัด (b) สเปกตรัมของสัญญาณจากการตรวจวัด

2. ผลของมวลของยานพาหนะ

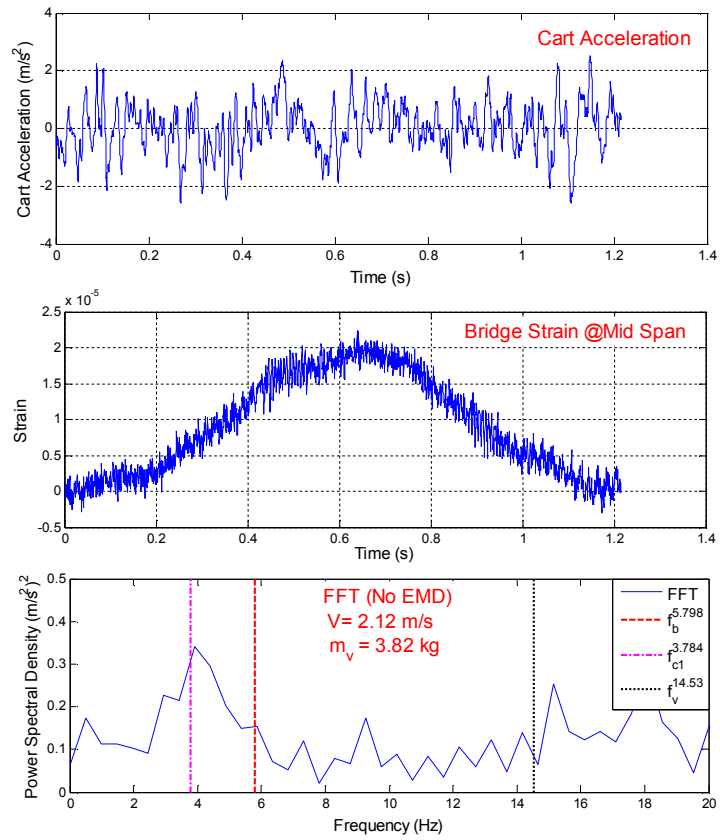
จากการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะ พบว่ามวลของยานพาหนะหลักที่เพิ่มสูงขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อความเด่นชัดของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของยานพาหนะอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงตัวอย่างของผลการทดสอบในภาพที่ 4-6 โดยผลของมวลนั้นจะไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานเนื่องจากผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่พบไม่ตรงกับค่าความถี่จริงของสะพาน



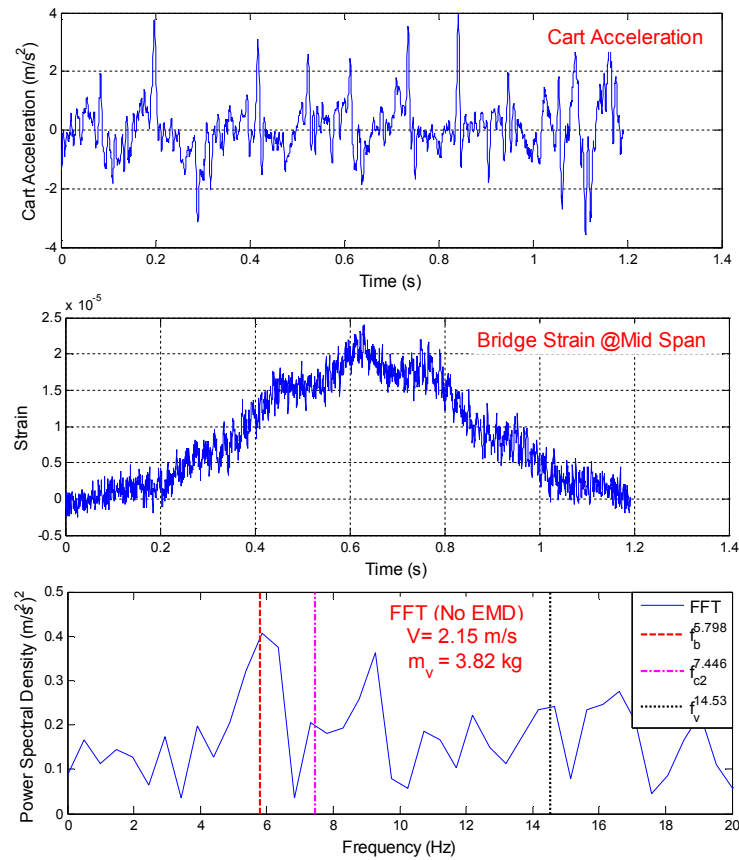
ภาพที่ 4-6 ผลของมวลของยานพาหนะที่มีต่อการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อม (a) สัญญาณความเร่งตรวจวัด (b) สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งตรวจวัด

3. ผลของความถี่ของยานพาหนะต่อพวง

จากการศึกษาพบว่า ยานพาหนะต่อพวงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานมีพฤติกรรมในการดูดซับการสั่นไหวของสะพานที่ดี จึงทำให้ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมมีความเด่นชัดกว่ากรณีที่ใช้ยานพาหนะที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพานตรวจวัด ดังแสดงตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพวงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพานในภาพที่ 4-7 และแสดงตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพวงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานในภาพที่ 4-8 อีกทั้งยังพบว่าการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพวงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานยังช่วยลดปัญหาการถูกบังคับของธรรมชาติของสะพานที่มักจะถูกความถี่ของยานพาหนะตรวจวัดที่เด่นชัดกว่าบังคับ เนื่องจากชุดต่อพวงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานนั้นมีพฤติกรรมการสั่นไหวของตัวเองในระดับที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชุดต่อพวงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพาน



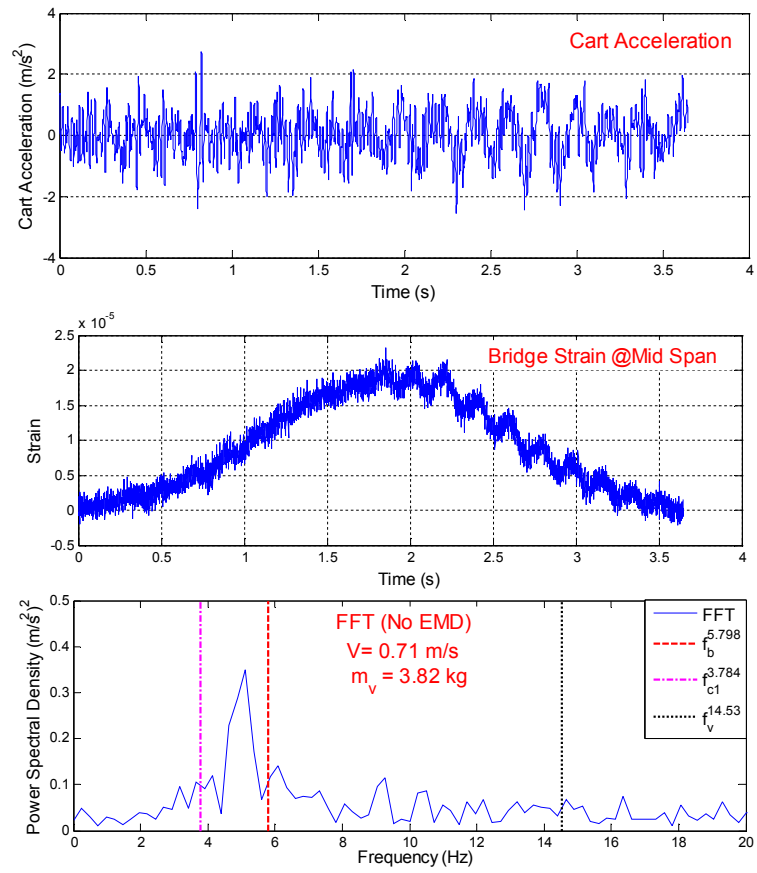
ภาพที่ 4-7 ตัวอย่างผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อฟ่งที่มี
ความถี่ต่ำกว่าสะพานเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน



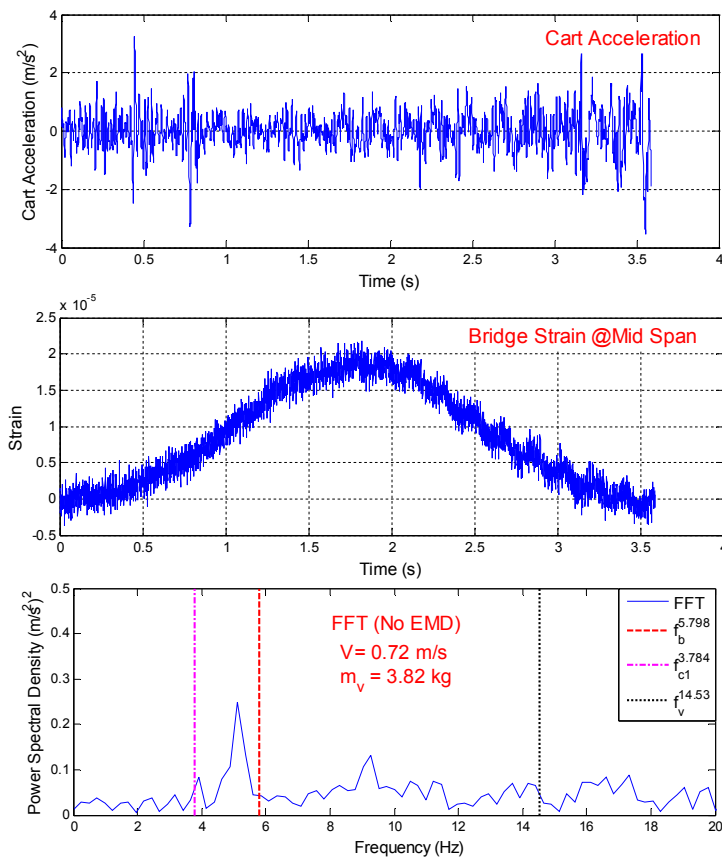
ภาพที่ 4-8 ตัวอย่างผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน

4. ผลของรูปแบบในการสำรวจตรวจวัดของยานพาหนะทดสอบ

จากการศึกษาผลของรูปแบบในการสำรวจตรวจวัดโดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสำรวจตรวจวัดในแนวกึ่งกลางของสะพานกับการสำรวจตรวจวัดในแนวด้านริมของสะพาน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า การสำรวจตรวจวัดในแนวกึ่งกลางของสะพานกับการสำรวจตรวจวัดในแนวด้านริมของสะพานไม่พบผลของการเชื่อมโยงกันตามแนวยาวที่ทำให้ผลของการทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพ่วงในแนวกึ่งกลางของสะพานในภาพที่ 4-9 และแสดงตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพ่วงในแนวด้านริมของสะพานในภาพที่ 4-10



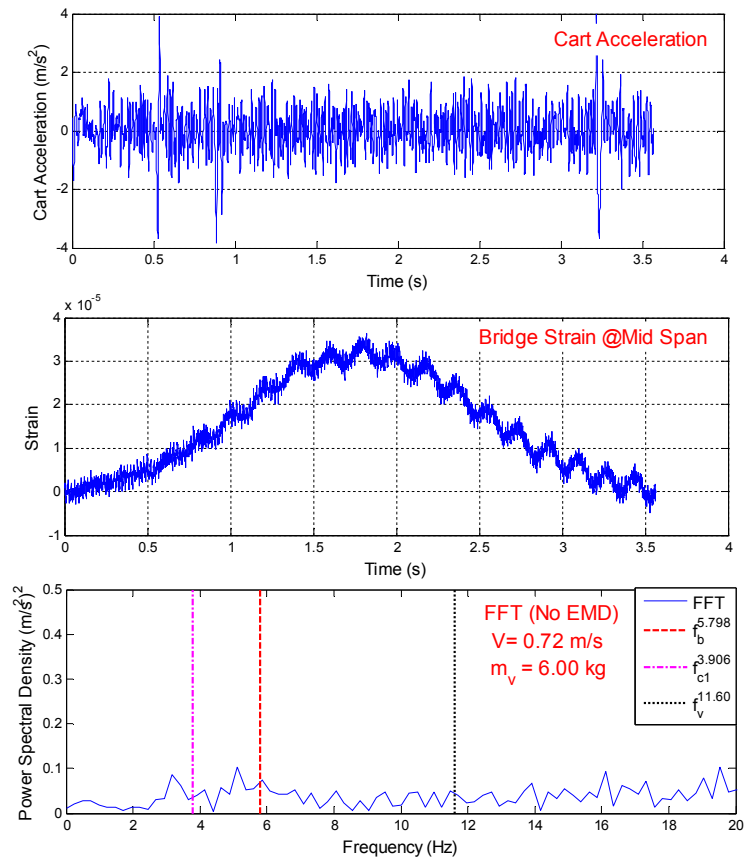
ภาพที่ 4-9 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อฟงในแนวกึ่งกลางสะพาน



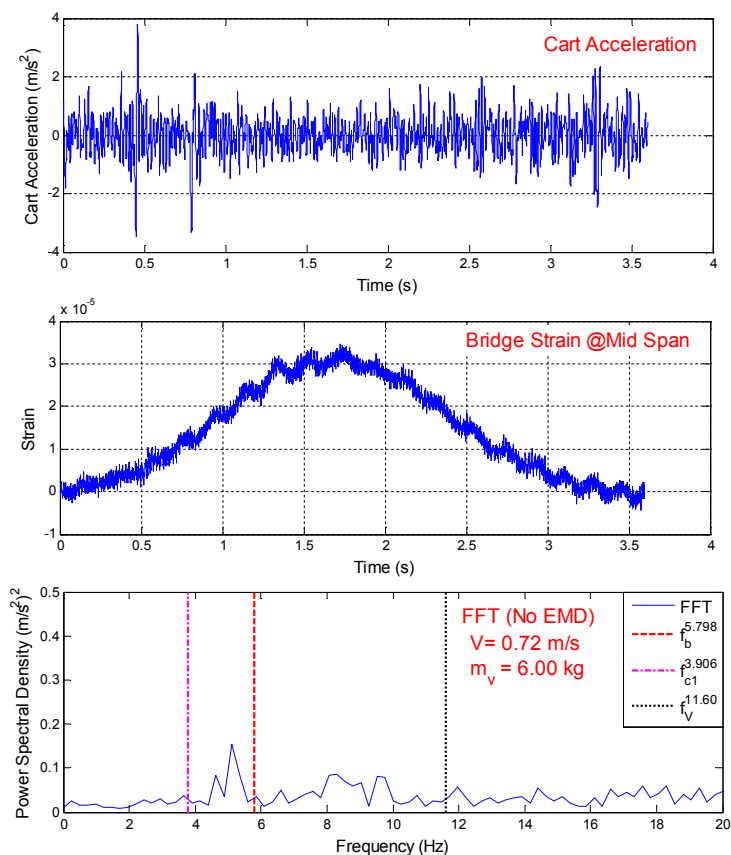
ภาพที่ 4-10 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดด้วยยานพาหนะต่อพ่วงในแนวด้านริมสะพาน

5. ผลของกรณีสัญจรตรวจวัดไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่น

จากการศึกษาการตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่น ซึ่งเป็นการจำลองให้มีพฤติกรรมเหมือนการสัญจรในสภาพจราจรปกติ โดยมีรูปแบบของการสัญจร 2 แบบ คือ กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานนำหน้ายานพาหนะคันอื่น และกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานตามหลังยานพาหนะคันอื่น ดังแสดงตัวอย่างผลจากการตรวจวัดของทั้ง 2 รูปแบบในภาพที่ 4-11 และ 4-12 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-11 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานนำหน้า
ยานพาหนะคันอื่น ในแนวกึ่งกลางของสะพาน



ภาพที่ 4-12 ตัวอย่างผลจากการตรวจวัดกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานตามหลังยานพาหนะคันอื่นในแนวกึ่งกลางของสะพาน

จากผลการตรวจวัดดังภาพที่ 4-11 และ 4-12 แสดงให้เห็นถึงวิธีการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพาน สามารถทำได้ในขณะที่สัญญาณไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่นในสภาพการจราจรปกติ โดยผลการทดสอบพบว่ากรณีที่เกิดเคลื่อนที่ข้ามสะพานตามหลังยานพาหนะคันอื่นมีแนวโน้มที่จะได้ของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่เด่นชัดกว่ากรณีเคลื่อนที่ข้ามสะพานนำหน้ายานพาหนะคันอื่นเล็กน้อย เนื่องจากผลของสะพานที่มีพฤติกรรมที่ถูกยานพาหนะที่เคลื่อนที่นำหน้ากระตุ้นให้เกิดการสั่นไหวไว้ก่อนที่ยานพาหนะตรวจวัดจะเคลื่อนที่เข้าสู่สะพาน จึงช่วยทำให้เห็นผลของสะพานที่เด่นชัดมากขึ้น

จากการสังเกตผลที่ได้จากการทดสอบตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วง พบว่าผลที่ได้สามารถจำแนกได้เป็น 3 แบบ คือ 1) แบบที่สามารถที่จะระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้เลยโดยพิจารณาจากผลของการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 2) แบบที่ความถี่ธรรมชาติของสะพานมักจะถูกบดบังด้วยความถี่ของส่วนต่อพ่วงที่เด่นชัด

กว่าบดบัง และ 3) แบบที่มีความถี่ที่ไม่พึงประสงค์นอกเหนือจากความถี่ของยานพาหนะมีความเด่นชัดมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งการใช้เพียงผลของการแปลงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณอาจทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงของสะพานจากงานวิจัยของ Tilly (1986) (โดยช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ของงานวิจัยนี้อยู่ที่ช่วงความถี่ 4.4 Hz ถึง 7.2 Hz) ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ดังแสดงขั้นตอนของการระบุไว้ดังภาพที่ 3-33 ของบทก่อนหน้า ซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุความถี่ให้น้อยลงได้ โดยได้แสดงตัวอย่างของผลที่ได้ทั้ง 3 แบบ และการใช้วิธี EMD กับการพิจารณาเฉพาะช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ เข้าช่วยในการพิจารณา ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ตัวอย่างรูปแบบผลจากการทดสอบและการใช้วิธีพิจารณาเพื่อช่วยในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

รูปแบบที่	รายละเอียด	ตัวอย่างผลจากการทดสอบ
1	-สามารถที่จะระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้โดยพิจารณาจากผลการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ	
2	-ความถี่ธรรมชาติของสะพานมักจะถูกบดบังด้วยความถี่ของส่วนต่อพ่วงที่เด่นชัดกว่า -แต่เมื่อใช้วิธี EMD กับการพิจารณาเฉพาะช่วงที่เป็นไปได้จะช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง	
3	-มีความถี่ที่ไม่พึงประสงค์นอกเหนือจากความถี่ของยานพาหนะมีความเด่นชัดมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน -แต่เมื่อใช้วิธี EMD กับการพิจารณาเฉพาะช่วงที่เป็นไปได้จะช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง	

ผลของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่

การทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะต่อพ่วงด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม ได้มีรูปแบบของการทดสอบออกเป็น 3 กรณี คือ 1) กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน 2) กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานเพียงคันเดียวในแนวด้านริมของสะพาน และ 3) กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานไปพร้อมกับยานพาหนะอื่นในแนวกึ่งกลางสะพาน โดยแต่ละกรณีจะมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่สนใจ เช่น มวลของยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะและความถี่ของชุดต่อพ่วง เป็นต้น โดยได้ใช้วิธีการพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ในการพิจารณาเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

โดยที่ m_v คือ มวลของยานพาหนะหลัก หน่วยเป็นกิโลกรัม

V คือ ความเร็วในการทดสอบ หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

f_{Iden} คือ ความถี่ที่ระบุว่าเป็นความถี่ของสะพาน หน่วยเป็น Hz

f_b คือ ความถี่จริงของสะพานมีค่าเท่ากับ 5.798 Hz

$\%Error_{Iden}$ คือ ความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้คำนวณได้จาก

$$\%Error_{Iden} = \frac{(f_{Iden} - f_b)}{f_b} \times 100 \quad (4-1)$$

1. ผลการทดสอบของกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวกึ่งกลางสะพาน

ในการทดสอบได้ทำการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะหลักแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3.82, 6.00 และ 8.52 กิโลกรัม โดยส่วนตัวพ่วงมีการปรับเปลี่ยนช่วงล่างให้ความถี่ที่ต่ำกว่าสะพาน ($f_{c1}^{3.784} = 3.784$ Hz) และที่มีความถี่สูงกว่าสะพาน ($f_{c2}^{7.446} = 7.446$ Hz) ความเร็วที่ในการสัญจรของยานพาหนะแบ่งออก 3 ระดับ อยู่ในช่วง 0.71 ถึง 2.15 เมตรต่อวินาที การทดสอบได้วัดหัววัดความเร่งไว้ที่ชุดต่อพ่วงเพียงตำแหน่งเดียว ดังนั้นความถี่ที่ได้จากการระบุว่าเป็นความถี่ของสะพาน (f_{Iden}) จะถูกนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องกับความถี่ธรรมชาติจริงของสะพานที่ได้จากการทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ ($f_b^{5.859} = 5.798$ Hz) โดยแสดงผลที่ได้จากการทดสอบไว้ดังตารางที่ 4-3 และตารางที่ 4-4 โดยได้อธิบายการแทนสัญลักษณ์ของผลทดสอบไว้ดังภาคผนวก ก

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพานของชุดต่อฟุ้งที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ

Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$
C1_mLvL_c	3.82 (7.02*)	0.71	5.127	-11.57
C1_mLvM_c	3.82 (7.02*)	1.44	5.859	1.05
C1_mLvH_c	3.82 (7.02*)	2.12	5.859	1.05
C1_mMvL_c	6.00 (9.20*)	0.71	5.127	-11.57
C1_mMvM_c	6.00 (9.20*)	1.42	5.371	-7.36
C1_mMvH_c	6.00 (9.20*)	2.15	5.859	1.05
C1_mHvL_c	8.52 (11.72*)	0.71	5.127	-11.57
C1_mHvM_c	8.52 (11.72*)	1.43	5.859	1.05
C1_mHvH_c	8.52 (11.72*)	2.15	5.859	1.05

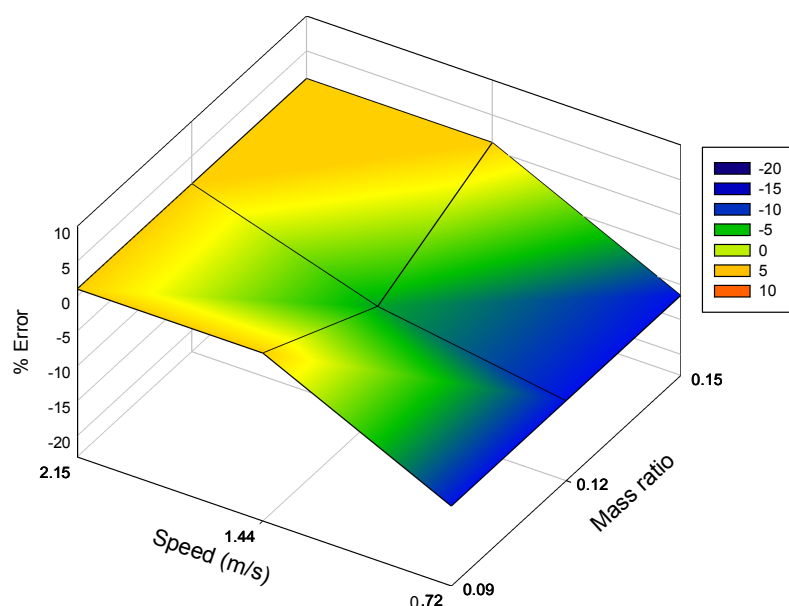
หมายเหตุ: *มวลรวมทั้งหมดยานพาหนะต่อฟุ้ง = มวลของยานพาหนะ+มวลของชุดต่อฟุ้ง

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพานของชุดต่อฟุ้งที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ

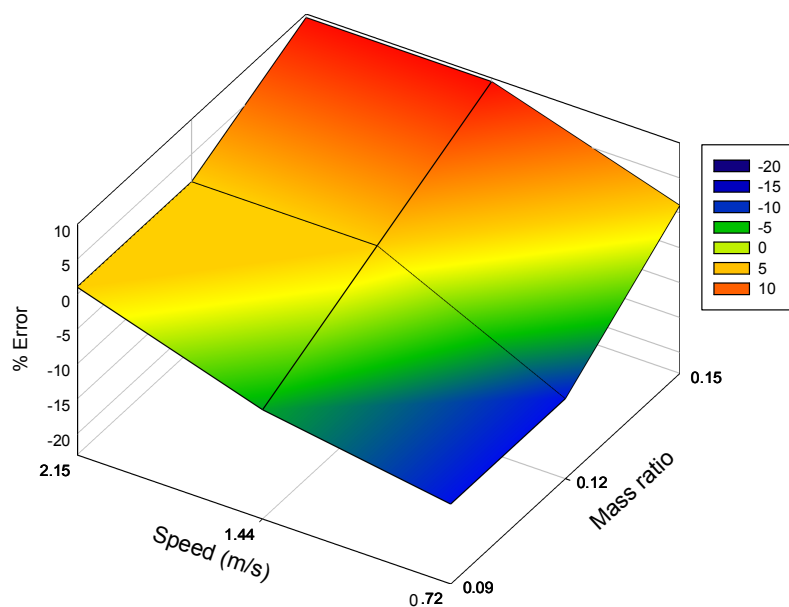
Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$
C2_mLvL_c	3.82 (7.02*)	0.71	5.127	-11.57
C2_mLvM_c	3.82 (7.02*)	1.42	5.371	-7.36
C2_mLvH_c	3.82 (7.02*)	2.15	5.859	1.05
C2_mMvL_c	6.00 (9.20*)	0.72	5.127	-11.57
C2_mMvM_c	6.00 (9.20*)	1.42	5.859	1.05
C2_mMvH_c	6.00 (9.20*)	2.10	5.859	1.05
C2_mHvL_c	8.52 (11.72*)	0.70	5.859	1.05
C2_mHvM_c	8.52 (11.72*)	1.44	6.348	9.49
C2_mHvH_c	8.52 (11.72*)	2.10	6.348	9.49

หมายเหตุ: *มวลรวมทั้งหมดยานพาหนะต่อฟุ้ง = มวลของยานพาหนะ+มวลของชุดต่อฟุ้ง

จากผลการทดสอบดังตารางตารางที่ 4-3 และตารางที่ 4-4 พบว่าผลที่ได้จากการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากทั้ง 2 กรณีไม่พบยอดของความถี่ที่ตรงกับยอดของความถี่จริงของสะพานที่ได้จากการทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ ซึ่งยอดของความถี่ที่พบว่ามีค่าใกล้เคียงความถี่ของสะพานที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.859 Hz คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.05% ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยยานพาหนะเคลื่อนที่มีรูปแบบของคาบการแกว่งที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับกรณีทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดพบมีค่าอยู่ที่ -11.57% โดยได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้น (Mass ratio) ของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพานไว้ดังภาพที่ 4-13 และกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานไว้ดังภาพที่ 4-14 โดยมวลรวมของยานพาหนะต่อพ่วงที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ระดับ คือ 7.02, 9.20 และ 11.72 กิโลกรัม คิดเป็นสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวลของสะพานอยู่ที่ 0.09, 0.12 และ 0.15 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพาน (ตรวจวัดในแนวตั้งกลางสะพาน)



ภาพที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพาน (ตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพาน)

จากผลการศึกษาและกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 4-13 และภาพที่ 4-14 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและมวลของยานพาหนะมีความสัมพันธ์ต่อค่าความคลาดของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็วต่าง ๆ ส่งผลทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความถี่จริงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cantero and Obrien (2013) โดยใช้ความเร็วต่ำในการตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานมีแนวโน้มที่ทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง และค่าความคลาดเคลื่อนนั้นจะมีค่าที่ต่ำลงเมื่อมีการใช้ความเร็วในการสัญจรตรวจวัดที่สูงขึ้น

2. ผลการทดสอบของกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวด้านริมสะพาน

การทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวด้านริมสะพานนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์โดยใช้รูปแบบเดียวกับกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวด้านกึ่งกลางสะพาน โดยแสดงผลที่ได้จากการทดสอบไว้ดังตารางที่ 4-5 และตารางที่ 4-6 โดยได้อธิบายการแทนสัญลักษณ์ของผลทดสอบไว้ดังภาคผนวก ก

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวด้านริมสะพานของชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ

Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$
C1_mLvL_s	3.82 (7.02*)	0.72	5.127	-11.57
C1_mLvM_s	3.82 (7.02*)	1.44	5.371	-7.36
C1_mLvH_s	3.82 (7.02*)	2.14	5.859	-7.36
C1_mMvL_s	6.00 (9.20*)	0.71	5.127	-11.57
C1_mMvM_s	6.00 (9.20*)	1.43	4.883	-15.75
C1_mMvH_s	6.00 (9.20*)	2.13	5.371	-7.36
C1_mHvL_s	8.52 (11.72*)	0.72	5.127	-11.57
C1_mHvM_s	8.52 (11.72*)	1.43	4.883	-15.75
C1_mHvH_s	8.52 (11.72*)	2.15	5.371	-7.36

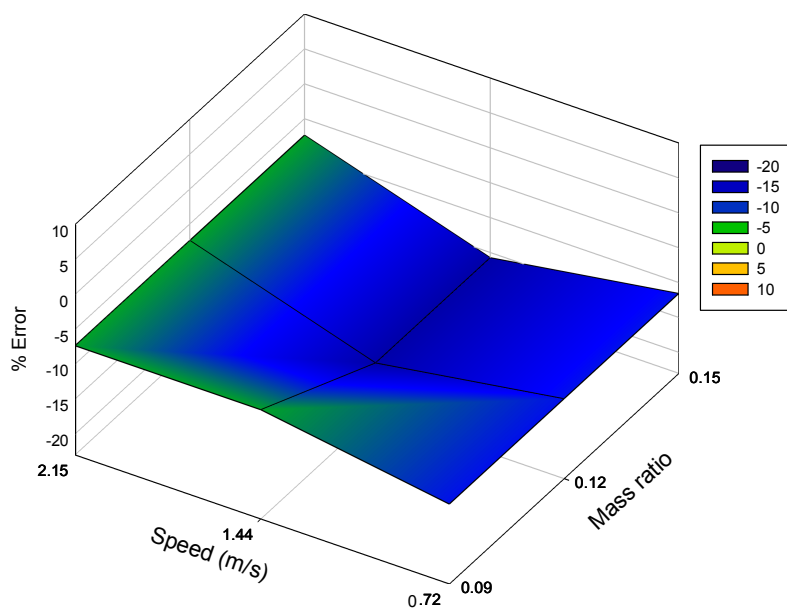
หมายเหตุ: *มวลรวมทั้งหมดของยานพาหนะต่อพ่วง = มวลของยานพาหนะ+มวลของชุดต่อพ่วง

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบของกรณีตรวจวัดในแนวด้านริมสะพานของชุดต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของสะพานทดสอบ

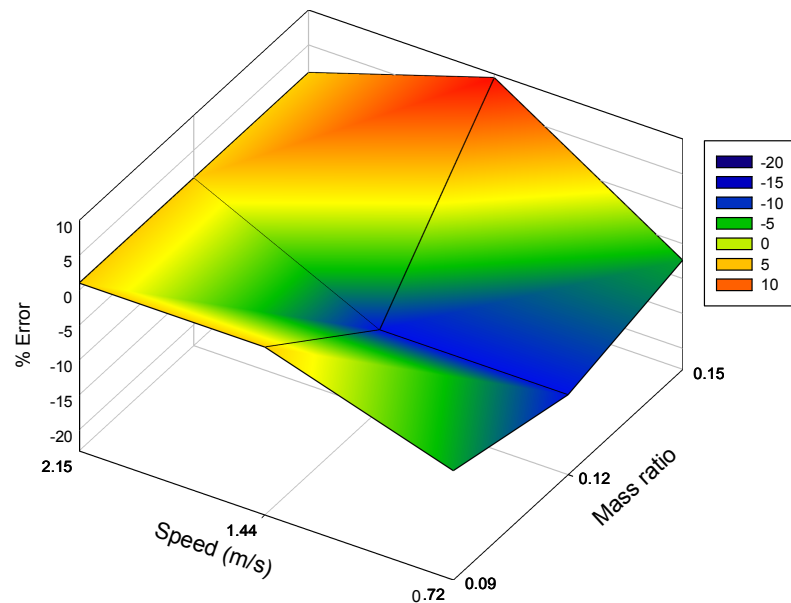
Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$
C2_mLvL_s	3.82 (7.02*)	0.72	5.371	-7.36
C2_mLvM_s	3.82 (7.02*)	1.42	5.859	1.05
C2_mLvH_s	3.82 (7.02*)	2.12	5.859	1.05
C2_mMvL_s	6.00 (9.20*)	0.71	5.127	-11.57
C2_mMvM_s	6.00 (9.20*)	1.42	5.127	-11.57
C2_mMvH_s	6.00 (9.20*)	2.15	5.859	1.05
C2_mHvL_s	8.52 (11.72*)	0.72	5.371	-7.36
C2_mHvM_s	8.52 (11.72*)	1.42	6.348	9.49
C2_mHvH_s	8.52 (11.72*)	2.15	5.859	1.05

หมายเหตุ: *มวลรวมทั้งหมดของยานพาหนะต่อพ่วง = มวลของยานพาหนะ+มวลของชุดต่อพ่วง

จากผลการทดสอบการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากกรณีตรวจวัดในแนวด้านริม สะพานดังตารางที่ 4-5 และตารางที่ 4-6 พบว่ายอดของความถี่ที่พบว่ามีค่าใกล้เคียงความถี่ของ สะพานที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.859 Hz คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.05% ซึ่งเป็นผลอัน เนื่องมาจากสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานที่เกิดจากการกระตุ้น ด้วยยานพาหนะเคลื่อนที่มีรูปแบบของคาบการแกว่งที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับกรณีทดสอบด้วย การสั่นไหวอิสระ และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดพบว่ามีค่าอยู่ที่ -15.57% โดยได้แสดงกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและสัดส่วนของมวลที่ เพิ่มขึ้น (Mass ratio) ของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพานไว้ดังภาพที่ 4-15 และกรณีชุดต่อ พ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานไว้ดังภาพที่ 4-16 โดยมวลรวมของยานพาหนะต่อพ่วงที่ใช้ในการ ทดสอบมี 3 ระดับ คือ 7.02, 9.20 และ 11.72 กิโลกรัม คิดเป็นสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวล ของสะพานอยู่ที่ 0.09, 0.12 และ 0.15 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและ สัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าสะพาน (ตรวจวัดใน แนวด้านริมสะพาน)



ภาพที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสำรวจและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณีชุดต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพาน (ตรวจวัดในแนวด้านริมสะพาน)

จากผลของการตรวจวัดในแนวด้านริมสะพานดังแสดงภาพที่ 4-15 และภาพที่ 4-16 พบว่าภาพรวมของผลการทดสอบมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่ตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็วต่าง ๆ ส่งผลทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความถี่จริง โดยเฉพาะการใช้ความเร็วต่ำในการตรวจวัดที่มีแนวโน้มที่มีค่าความถี่ที่ระบุได้น้อยกว่าค่าความถี่สะพานจริงและมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง โดยค่าความคลาดเคลื่อนนั้นจะมีค่าที่น้อยลงเมื่อมีการใช้ความเร็วในการสำรวจตรวจวัดที่สูงขึ้น

3. ผลการทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานไปพร้อมกับยานพาหนะอื่นในแนวกึ่งกลางสะพาน

เป็นผลการทดสอบของกรณีที่ให้ยานพาหนะต่อพ่วงในการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการสำรวจไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่น โดยมีรูปแบบของการทดสอบอยู่ 2 แบบ คือ กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงสำรวจนำหน้ายานพาหนะคันอื่น และกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงสำรวจตามหลังยานพาหนะคันอื่น ซึ่งการทดสอบได้ใช้ความเร็วในการสำรวจและมวลของยานพาหนะที่เท่ากัน โดยใช้ยานพาหนะต่อพ่วงที่มีมวลรวม 7.02 กิโลกรัม สำรวจตรวจวัดด้วยความเร็ว 0.72 เมตรต่อวินาที ไปพร้อมกับยานพาหนะคันอื่นที่มีมวล 6.00 กิโลกรัม โดยแสดงผลที่ได้ไว้ดังตารางที่ 4-7

ซึ่งจากผลการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานของการทดสอบพบทั้ง 2 รูปแบบพบว่าได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าเท่ากันอยู่ที่ -11.57%

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ข้ามสะพานไปพร้อมกับยานพาหนะอื่นในแนวกึ่งกลางสะพาน

Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$
F_C1_mMvL_c*	6.00 (13.02 ^{***})	0.72	5.127	-11.57
B_C1_mMvL_c**	6.00 (13.02 ^{***})	0.72	5.127	-11.57

หมายเหตุ: *กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่นำหน้ายานพาหนะคันอื่น

**กรณีที่ยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ตามหลังยานพาหนะคันอื่น

***มวลรวมทั้งหมด = มวลของยานพาหนะต่อพ่วง+มวลของยานพาหนะคันอื่น

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะต่อพ่วง พบว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถระบุได้ด้วยการทดสอบแบบทางอ้อม ซึ่งการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ จะช่วยให้สามารถระบุความถี่ได้โดยง่ายและมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าวิธีที่นำเสนอในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานข้างต้นมีระดับความเชื่อมั่นที่ 94.44% ที่จะได้ผลการระบุที่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 11.57\%$ หากพิจารณาความถูกต้องด้วยความถี่จริงของสะพาน อีกทั้งการใช้ความเร็วที่ไม่ต่ำกว่า 1.42 เมตรต่อวินาที หรือเทียบเคียงกับความเร็วในสภาพโครงสร้างจริงที่ประมาณ 51 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กับยานพาหนะต่อพ่วงที่มีความถี่สูงกว่าสะพานในการตรวจวัดจะช่วยทำให้ผลของความถี่ธรรมชาติของสะพานมีความเด่นชัดและถูกต้องมากขึ้น โดยสามารถสัญญาณตรวจวัดได้ทั้งในแนวกึ่งกลางและในแนวด้านริมของสะพาน ซึ่งพบว่าการสัญญาณในแนวกึ่งกลางของสะพานนั้นจะได้ผลของการตรวจวัดที่ดีกว่าการสัญญาณตรวจวัดในแนวด้านริมของสะพาน ซึ่งการตรวจวัดนั้นสามารถทำได้ทั้งการสัญญาณเพียงคันเดียวหรือสัญญาณไปพร้อมกับการจราจรปกติก็สามารถที่จะทำได้

บทที่ 5

ผลการศึกษาคหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนองความเร่ง ของยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อพ่วง

การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่ ปราศจากส่วนต่อพ่วง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาคหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะหลักโดยปราศจากส่วนต่อพ่วง ซึ่งยานพาหนะหลักที่ใช้ตรวจวัดนั้นเป็นยานพาหนะคันเดียวกับที่ใช้ในกรณีของยานพาหนะต่อพ่วง แต่มีการปรับเปลี่ยนสปริงของช่วงล่างให้มีสติเฟนสที่ต่ำลง โดยการตรวจวัดจะใช้ยานพาหนะหลักเป็นตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวพร้อมทั้งตรวจวัดผลตอบสนองการสั่นไหวมาในขณะเดียวกัน ซึ่งแนวคิดนี้จะช่วยลดความยุ่งยากในการติดตั้งชุดต่อพ่วงและสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริง การทดสอบในกรณีนี้ได้ทำการติดตั้งตำแหน่งของหัววัดความเร่งไว้ 2 ตำแหน่ง คือ ที่จุดศูนย์กลางรวมมวลของยานพาหนะหลักและที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานทดสอบ เพื่อคุณภาพการวัดของทั้งสะพานและยานพาหนะควบคู่กันไปในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนมวลของตัวยานพาหนะ ความเร็วในการสัญจรและรูปแบบของการสัญจรที่แตกต่างกันออกไป เพื่อเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม

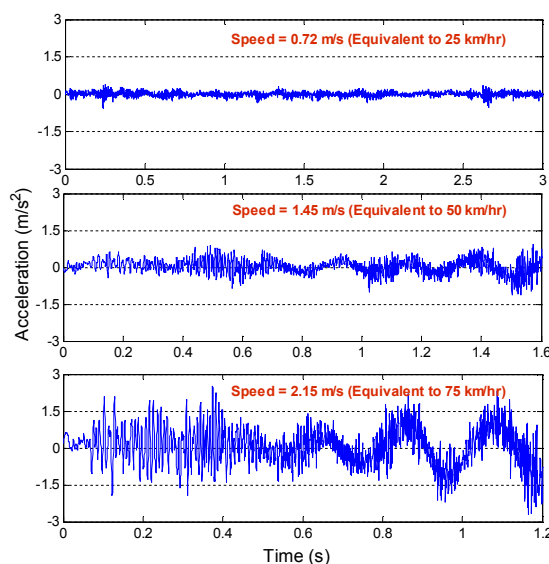
การนำเสนอผลจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้ ส่วนแรกจะนำเสนอผลการศึกษาเชิงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะเคลื่อนที่รวมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม และส่วนที่สองเป็นการนำเสนอผลของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมของกรณีที่ใช้ยานพาหนะหลักตรวจวัด รวมไปถึงข้อควรพิจารณาในการนำไปประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาพฤติกรรมของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะเคลื่อนที่และ ผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

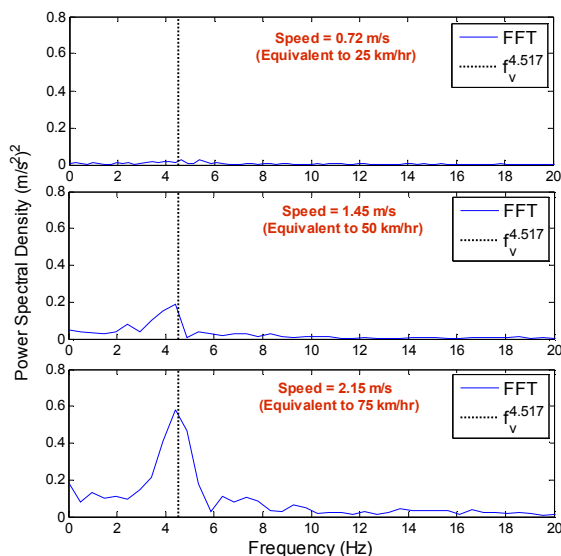
เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาวิธีการหาความถี่ของตัวโครงสร้างของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม แทนการติดอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่โครงสร้างสะพานโดยตรง ดังนั้น

ความเข้าใจในพฤติกรรมของสะพานและยานพาหนะ จึงเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการอภิปรายผลจากทดสอบที่เกิดขึ้น

1. พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของยานพาหนะหลักเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ
 ยานพาหนะได้ถูกนำมาทำการทดสอบด้วยการเคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ ที่ความเร็วแตกต่างกันไป 3 ระดับ คือ 0.72, 1.45 และ 2.15 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วในช่วงเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบตรวจวัดความถี่ของสะพาน ที่เทียบเคียงกับพฤติกรรมจริงที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็วอยู่ในช่วงประมาณ 25, 50 และ 75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 5-1 และภาพที่ 5-2



ภาพที่ 5-1 สัญญาณความเร่งของยานพาหนะหลักที่เคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ



ภาพที่ 5-2 สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ

จากภาพที่ 5-1 เป็นสัญญาณจากหัววัดความเร่งที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของยานพาหนะ ขณะที่เคลื่อนที่บนพื้นแข็งผิวเรียบ จากการสังเกตที่แอมพลิจูดของสัญญาณความเร่งพบว่ายานพาหนะมีพฤติกรรมการสั่นไหวที่น้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงความเร็วที่ต่ำ และจะเริ่มสั่นไหวรุนแรงขึ้นเมื่อมีการใช้ความเร็วที่สูงขึ้น เช่นเดียวกันกับกราฟที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งในภาพที่ 5-2 ที่พบว่ายอดของความถี่ของยานพาหนะจะเริ่มมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

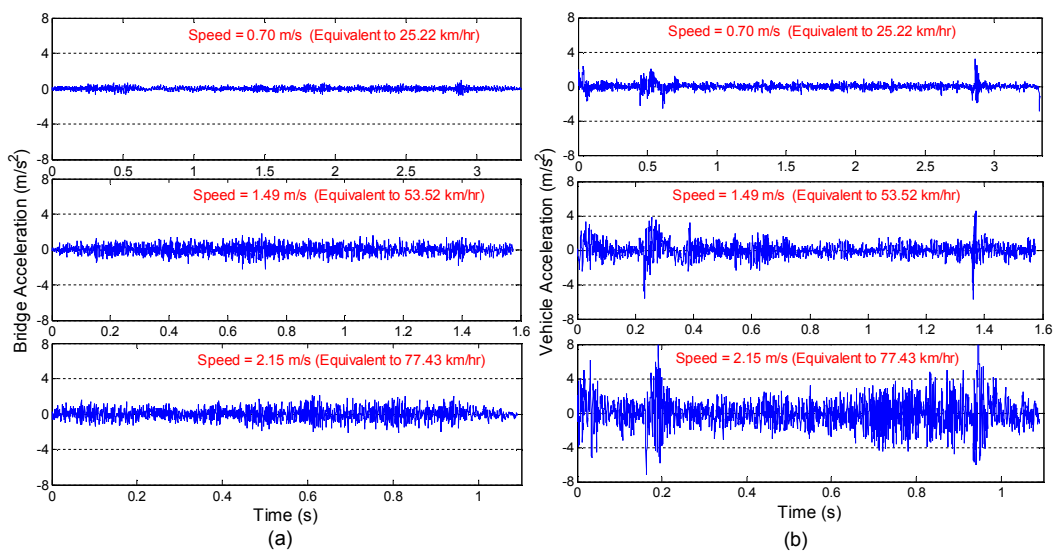
2. พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ของสะพานและยานพาหนะเคลื่อนที่และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะหลักเพียงคันเดียว ด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม ได้มีรูปแบบของการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแรกเป็นทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะสัญญาณตรวจวัดในแนวกึ่งกลางของสะพานและแบบที่สองเป็นกรณีที่ยานพาหนะสัญญาณตรวจวัดในแนวด้านริมของสะพาน โดยการทดสอบก็จะมีการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะหลักที่แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3.82, 6.10 และ 8.52 กิโลกรัม ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการสัญญาณตรวจวัดของยานพาหนะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ อยู่ในช่วงประมาณ 0.71 ถึง 2.15 เมตรต่อวินาที โดยการทดสอบได้มีการติดตั้งหัววัดสัญญาณความเร่งไว้ใน 2 ตำแหน่ง คือ ที่จุดศูนย์กลางรวมมวลของยานพาหนะทดสอบและที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

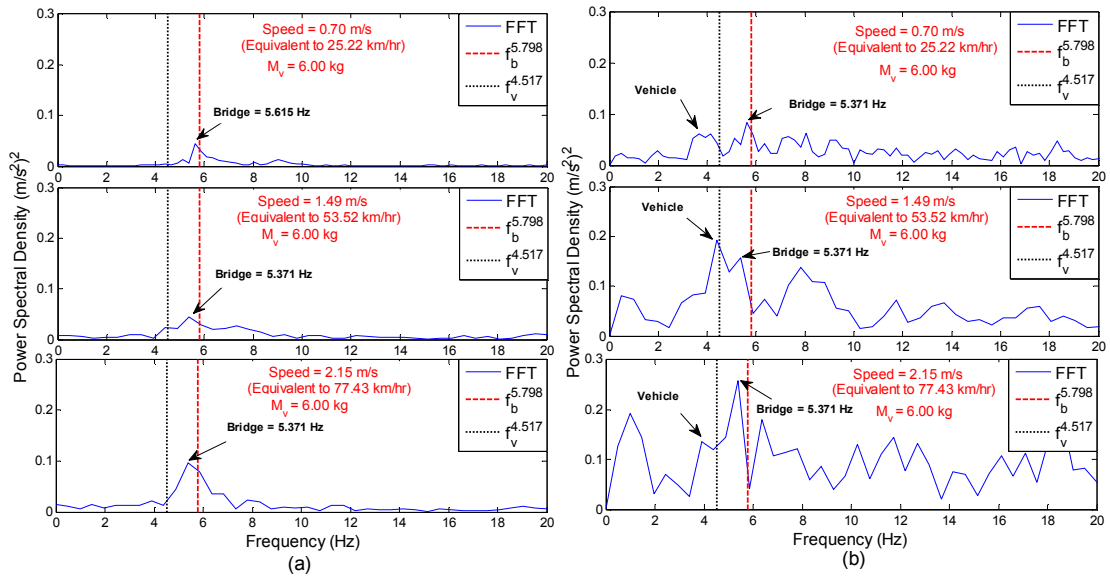
เพื่อเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ของสะพานและยานพาหนะควบคู่กันไป

2.1 ผลของความเร็วในการสัญจรตรวจวัด

ตัวอย่างของผลจากการทดสอบ โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วของการสัญจรตรวจวัดได้แสดงไว้ดังภาพที่ 5-3 ซึ่งเป็นสัญญาณความเร่งของสะพานและยานพาหนะที่ได้จากการทดสอบ ส่วนภาพที่ 5-4 เป็นกราฟแสดงผลของการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของสะพานและสัญญาณความเร่งของยานพาหนะ



ภาพที่ 5-3 สัญญาณความเร่งของสะพานและยานพาหนะที่ได้จากการทดสอบ (a) สัญญาณความเร่งของสะพานและ (b) สัญญาณความเร่งของยานพาหนะ ที่ความเร็วในการสัญจร 0.70, 1.49 และ 2.15 เมตรต่อวินาที ของกรณีสัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน

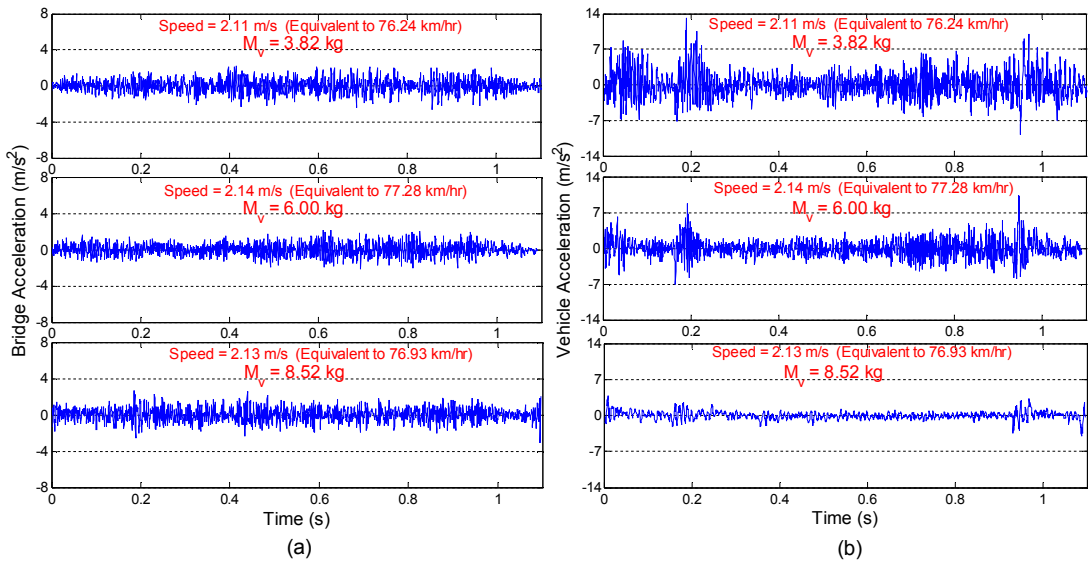


ภาพที่ 5-4 ผลของการแปลงสเปกตรัมความถี่ของสะพานและยานพาหนะ ที่ความเร็วในการสัญจร 0.70, 1.49 และ 2.15 เมตรต่อวินาที ของกรณีสัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน
(a) สเปกตรัมความถี่ของสะพาน (b) สเปกตรัมความถี่ของยานพาหนะ

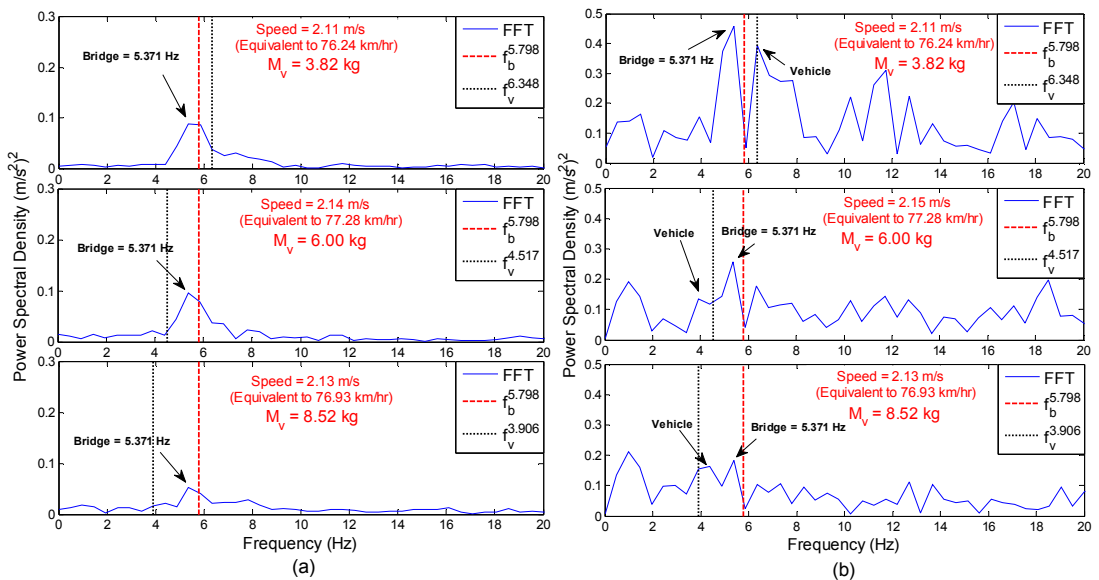
จากภาพที่ 5-3 และภาพที่ 5-4 พบว่าการใช้ความเร็วในการสัญจรตรวจวัดที่สูงขึ้น ส่วนช่วยในการกระตุ้นสะพานเกิดการสั่นไหวที่มากขึ้น โดยสังเกตได้จากแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่และแอมพลิจูดของยอดความถี่ของสะพานในกราฟที่ได้จากการแปลงสเปกตรัม จะเริ่มสูงขึ้นตามลำดับความเร็วที่สูงขึ้น โดยพฤติกรรมนี้อาจจะส่งผลดีต่อการทดสอบในเชิงของการกระตุ้นสะพานให้เกิดการสั่นไหวที่มาก แต่อาจจะส่งผลเสียต่อสัญญาณตรวจวัดที่ได้จากยานพาหนะ ซึ่งการใช้ความเร็วในการสัญจรที่สูงก็จะเป็นส่วนช่วยให้ตัวของยานพาหนะเองเกิดการสั่นไหวที่รุนแรงขึ้นและทำให้ยอดความถี่ของยานพาหนะที่เด่นชัดกว่าคั้งยอดความถี่ของสะพานถึงทำให้การระบุค่าความถี่ของสะพานทำได้ยากขึ้น

2.2 ผลของมวลของยานพาหนะ

การทดสอบได้มีการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะ ด้วยการเพิ่มมวลรวมของตัวยานพาหนะ 3 ระดับ คือ 3.82, 6.00 และ 8.52 ตามลำดับ โดยยกตัวอย่างจากผลการทดสอบของกรณีที่ใช้ความเร็วในการสัญจรตรวจวัดที่สูง เพื่อที่จะสามารถเห็นผลของการสั่นไหวของยานพาหนะที่ค่อนข้างชัดเจน โดยผลที่ได้จากการทดสอบถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 5-5 และภาพที่ 5-6



ภาพที่ 5-5 สัญญาณความเร่งของผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะ ของกรณี
 สัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน (a) สัญญาณความเร่งของสะพาน (b) สัญญาณความเร่ง
 ของยานพาหนะ



ภาพที่ 5-6 สเปกตรัมความเร่งของผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะ ของกรณี
 สัญจรในแนวกึ่งกลางสะพาน (a) สเปกตรัมความเร่งของสะพาน (b) สเปกตรัม
 ความเร่งของยานพาหนะ

จากผลทดสอบในภาพที่ 5-5 และภาพที่ 5-6 พบว่ายานพาหนะที่มีมวลน้อยมีพฤติกรรมในการกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวได้ดีกว่ายานพาหนะที่มีมวลมากเมื่อเปรียบเทียบในระดับความเร็วที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลของยานพาหนะที่มีมวลน้อยที่เป็นตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวมีความถี่ของตัวยานพาหนะเองที่ใกล้เคียงกับความถี่ของสะพาน ซึ่งเป็นผลทำให้การสั่นไหวของสะพานและยานพาหนะมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์การสั่นพ้อง (Resonance) จึงทำให้ผลจากการแปลงสเปกตรัมความถี่ของสะพานและจากการแปลงสเปกตรัมความถี่ของยานพาหนะพบยอดความถี่ของสะพานในแอมพลิจูดที่สูง

จากผลที่ได้จากการทดสอบสามารถจำแนกรูปแบบของผลการทดสอบที่พบออกได้เป็น 3 แบบหลัก ๆ คือ 1) แบบที่สามารถที่จะระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้เลยโดยพิจารณาจากผลของการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 2) แบบที่ความถี่ธรรมชาติของสะพานมักจะถูกบดบังด้วยความถี่ของยานพาหนะที่เด่นชัดกว่าบดบัง และ 3) แบบที่มีความถี่ที่ไม่พึงประสงค์นอกเหนือจากความถี่ของยานพาหนะมีลักษณะที่เด่นชัดมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งการใช้เพียงผลของการแปลงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณอาจทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงของสะพานจากงานวิจัยของ Tilly (1986) (โดยช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ของงานวิจัยนี้อยู่ที่ช่วงความถี่ 4.4 Hz ถึง 7.2 Hz) ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ตามขั้นตอนของการระบุที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 3-33 จะช่วยทำให้สามารถระบุความถี่ได้โดยง่ายและลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุความถี่ให้น้อยลงได้ โดยได้แสดงตัวอย่างของผลที่ได้ทั้ง 3 แบบ และผลจากการใช้วิธีการพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ เข้าช่วยในการพิจารณา ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ตัวอย่างรูปแบบผลจากการทดสอบและการใช้วิธีพิจารณาเพื่อช่วยในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน

รูปแบบที่	รายละเอียด	ตัวอย่างผลจากการทดสอบ
1	<p>-สามารถที่จะระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้เลยโดยพิจารณาจากผลการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ</p> <p>-เมื่อเทียบกับความถี่ที่ได้จากสเปกตรัมการผลการตรวจวัดที่สะพานพบว่าเป็นความถี่เดียวกัน</p>	
2	<p>-ความถี่ธรรมชาติของสะพานมีความถี่ที่ใกล้กับความถี่ของยานพาหนะ ซึ่งอาจทำให้ถูกพิจารณาว่ากลุ่มความถี่เดียวกันกับความถี่ของยานพาหนะ</p> <p>-แต่เมื่อใช้วิธี EMD กับการพิจารณาเฉพาะช่วงที่เป็นไปได้เข้าช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ผลจากการระบุมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น</p> <p>-เมื่อเทียบกับความถี่ที่ได้จากสเปกตรัมการผลการตรวจวัดที่สะพานพบว่าเป็นความถี่เดียวกัน</p>	

ตารางที่ 5-1 (ต่อ)

รูปแบบที่	รายละเอียด	ตัวอย่างผลจากการทดสอบ
3	<p>-มีความถี่ที่ไม่พึงประสงค์นอกเหนือจากความถี่ของยานพาหนะมีความเด่นชัดมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน</p> <p>-แต่เมื่อใช้วิธี EMD กับการพิจารณาเฉพาะช่วงที่เป็นไปได้จะช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ผลจากการระบุมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น</p> <p>-เมื่อเทียบกับความถี่ที่ได้จากสเปกตรัมการผลการตรวจวัดที่สะพานพบว่าเป็นความถี่เดียวกัน</p>	

ผลของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมด้วยยานพาหนะเคลื่อนที่

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ยานพาหนะหลักเป็นทั้งตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวและเป็นตัวซึมซับการสั่นไหวของสะพาน การทดสอบได้แบ่งรูปแบบการตรวจวัดเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ตรวจวัดทั้งในแนวกึ่งกลางของสะพานและกรณีที่ตรวจวัดในแนวด้านริมของสะพาน การทดสอบได้มีการปรับเปลี่ยนความเร็วที่ใช้ในการสัญจรและมวลของยานพาหนะหลักที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหว เพื่อที่จะศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำเสนอถึงรูปแบบและวิธีการตรวจวัดที่เหมาะสม โดยได้ใช้วิธีการพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ในการพิจารณาเพื่อระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งผลที่ได้จากการระบุได้แบ่งตามรูปแบบของการตรวจวัดดังแสดงในหัวข้อต่อไป

โดยที่ m_v คือ มวลของยานพาหนะหลัก หน่วยเป็นกิโลกรัม

V คือ ความเร็วในการทดสอบ หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

f_{Iden} คือ ความถี่ที่ได้จากการระบุด้วยวิธีทดสอบแบบทางอ้อม (Hz)

f_{amb} คือ ความถี่ที่ได้จากสัญญาณที่ตรวจวัดที่สะพาน โดยตรง (Hz)

f_b คือ ความถี่จริงของสะพานมีค่าเท่ากับ 5.798 Hz

$\%Error_{Iden}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุโดยเทียบกับค่าความถี่จริงของสะพาน ได้คำนวณได้จาก สมการที่ 5-1

$\%Error_{amb}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุโดยเทียบกับความถี่ที่ได้จากสัญญาณที่ตรวจวัดที่สะพาน โดยตรง

$$\%Error_{Iden} = \frac{(f_{Iden} - f_{amb})}{f_{amb}} \times 100 \quad (5-1)$$

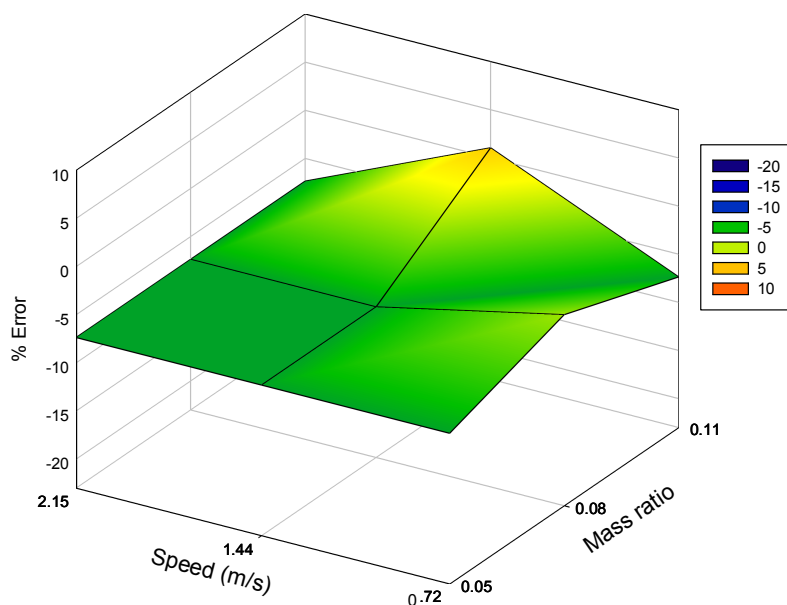
1. ผลการทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนว กึ่งกลางสะพาน

ในการทดสอบได้ทำการปรับเปลี่ยนมวลของยานพาหนะหลักแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3.82, 6.00 และ 8.52 กิโลกรัม ความเร็วที่ในการสัญจรของยานพาหนะแบ่งออก 3 ระดับ อยู่ในช่วง 0.71 ถึง 2.15 เมตรต่อวินาที การทดสอบในกรณีนี้ได้ทำการติดตั้งหัววัดความเร่งไว้ 2 ตำแหน่ง คือ ที่จุดศูนย์รวมมวลของยานพาหนะหลักและที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานทดสอบ ดังนั้นความถี่ที่ได้จากการระบุ (f_{Iden}) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติจริงของสะพานที่ได้จากการทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ ($f_b^{5.859} = 5.798$ Hz) และเปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้จากสัญญาณที่ตรวจวัดที่สะพานโดยตรง (f_{amb}) โดยแสดงผลที่ได้จากการทดสอบของไว้ดังตารางที่ 5-2 โดยได้อธิบายการแทนสัญลักษณ์ของผลทดสอบไว้ดังภาคผนวก ก

ตารางที่ 5-2 ผลการทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวกึ่งกลางสะพาน

Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_b (Hz)	f_{amb} (Hz)	f_{iden} (Hz)	$\%Error_{iden}$	$\%Error_{amb}$
V_mLvL_c	3.82	0.70	5.798	5.615	5.371	-7.36	-4.35
V_mLvM_c	3.82	1.48	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mLvH_c	3.82	2.11	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mMvL_c	6.00	0.70	5.798	5.615	5.615	-3.16	0.00
V_mMvM_c	6.00	1.49	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mMvH_c	6.00	2.15	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mHvL_c	8.52	0.73	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mHvM_c	8.52	1.46	5.798	5.371	5.859	1.05	9.09
V_mHvH_c	8.52	2.13	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 5-2 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความถี่ที่ได้จากการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะหลัก กับความถี่จริงของสะพานที่ได้จากการทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ พบว่าไม่มียอดของความถี่ที่ตรงกับยอดของความถี่จริงของสะพานที่ความถี่ 5.798 Hz โดยยอดของความถี่ที่พบว่ามีค่าใกล้เคียงความถี่ของสะพานที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.859 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 1.05% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดพบจากการระบุมีค่าอยู่ที่ -7.36% โดยได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้น (Mass ratio) ของผลที่ได้ดังภาพที่ 5-7 โดยมวลของยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบคิดเป็นสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวลของสะพานอยู่ที่ 0.05, 0.08 และ 0.11 ตามลำดับ



ภาพที่ 5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัจจรและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณียานพาหนะหลักตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพาน

จากกราฟความสัมพันธ์ของผลการทดสอบดังภาพที่ 5-7 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานเมื่อเทียบกับความถี่จริงของกรณีตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพานไม่พบแนวโน้มที่มีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นเพราะผลของสัดส่วนมวลของยานพาหนะเมื่อเทียบกับมวลของสะพานมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงทำให้เห็นผลของความแปรปรวนของค่าความถี่ของสะพานเนื่องจากผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะผลที่ได้จากกรณีที่มีมวลของยานพาหนะมีค่าต่ำสุด

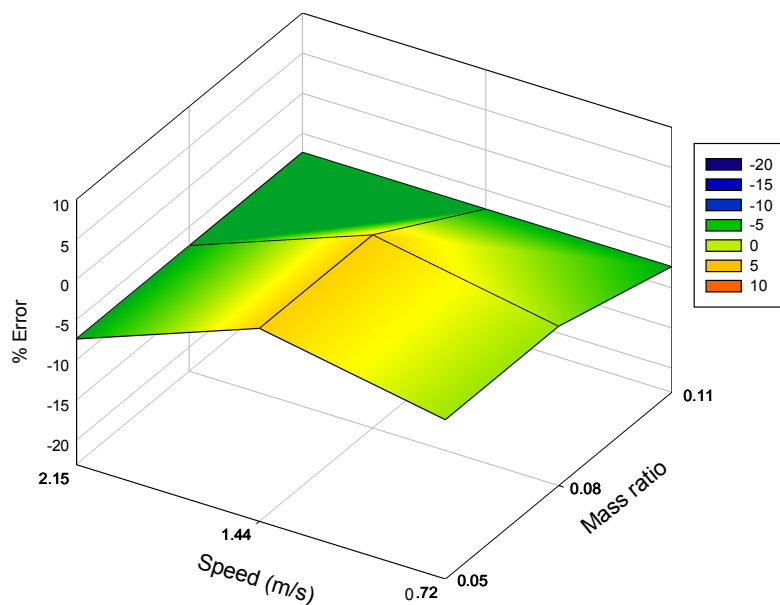
2. ผลการทดสอบในกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานคันเดียวในแนวด้านริมสะพาน

การทดสอบในกรณีเคลื่อนที่ในแนวด้านริมสะพานได้ใช้พารามิเตอร์แบบเดียวกับกรณีเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางสะพาน โดยความถี่ที่ได้จากการระบุ (f_{iden}) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับความถูกต้องกับความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน ($f_b^{5.859} = 5.798$ Hz) และเปรียบเทียบกับความถี่ที่ได้จากสัญญาณที่ตรวจวัดที่สะพานโดยตรง (f_{amb}) โดยแสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 5-3 โดยได้อธิบายการแทนสัญลักษณ์ของผลทดสอบไว้ดังภาคผนวก ก

ตารางที่ 5-3 ผลการทดสอบกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวด้านริมสะพาน

Case	m_v (kg)	V (m/s)	f_b (Hz)	f_{amb} (Hz)	f_{iden} (Hz)	$\%Error_{iden}$	$\%Error_{amb}$
V_mLvL_s	3.82	0.71	5.798	5.615	5.615	-3.16	0.00
V_mLvM_s	3.82	1.48	5.798	5.859	5.859	1.05	0.00
V_mLvH_s	3.82	2.14	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mMvL_s	6.00	0.70	5.798	6.104	5.615	-3.16	-8.01
V_mMvM_s	6.00	1.45	5.798	5.859	5.859	1.05	0.00
V_mMvH_s	6.00	2.13	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mHvL_s	8.52	0.72	5.798	5.859	5.371	-7.36	-8.33
V_mHvM_s	8.52	1.47	5.798	5.371	5.371	-7.36	0.00
V_mHvH_s	8.52	2.14	5.798	6.348	5.371	-7.36	-15.39

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 5-3 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความถี่ที่ได้จากการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะหลัก กับความถี่จริงของสะพานที่ได้จากการทดสอบด้วยการสั่นไหวอิสระ พบว่าไม่มียอดของความถี่ที่ตรงกับยอดของความถี่จริงของสะพานที่ความถี่ 5.798 Hz โดยยอดของความถี่ที่พบว่ามีค่าใกล้เคียงความถี่ของสะพานที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.859 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 1.05% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดพบจากการระบุมีค่าอยู่ที่ -7.36% โดยได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสัญจรและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้น (Mass ratio) ของผลที่ได้ดังภาพที่ 5-8 โดยมวลของยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบคิดเป็นสัดส่วนมวลของยานพาหนะต่อมวลของสะพานอยู่ที่ 0.09, 0.12 และ 0.15 ตามลำดับ



ภาพที่ 5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับความเร็วของการสำรวจและสัดส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นของกรณียานพาหนะหลักตรวจวัดในแนวด้านริมสะพาน

จากกราฟความสัมพันธ์ของผลการทดสอบดังภาพที่ 5-8 พบว่าผลที่ได้จากกรณีทดสอบตรวจวัดในแนวด้านริมของสะพานด้วยความเร็วและมวลของยานพาหนะที่มีค่าต่ำ มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุความถี่ของสะพานที่ต่ำ

จากการพิจารณาผลที่ได้จากการทดสอบ ทั้งกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพานและในแนวด้านริมสะพาน พบว่าความถี่ที่ได้จากการระบุจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะหลักกับความถี่ของสะพานที่ได้จากอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ที่สะพานโดยตรงส่วนใหญ่มักมีค่าที่เท่ากัน ซึ่งผลที่ได้นั้นสามารถยืนยันได้ถึงความเป็นไปได้ของสมมติฐานหลักของงานวิจัยที่ต้องการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม โดยใช้ยานพาหนะเป็นตัวกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหว และสามารถดูดซับการสั่นไหวนั้นว่าพร้อมกันในขณะเคลื่อนที่ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความถี่ของสะพานที่ได้จากระบุนั้นไม่ใช่ความถี่ที่เป็นความถี่จริงของสะพาน แต่เป็นความถี่ที่เกิดจากการสั่นไหวของสะพาน ณ เหตุการณ์ที่ทำการทดสอบนั้นอีกทั้งยังพบว่าความถี่จากการสั่นไหวของสะพานภายใต้แรงกระทำเคลื่อนที่ของยานพาหนะนั้น ยังมีผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยานพาหนะอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Catero and O'Brien (2013)

ความคลาดเคลื่อนจากการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานและแนวทางในการปรับแก้

จากผลการศึกษาข้างต้น แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของสมมติฐานเบื้องต้นที่ ต้องการให้หาความถี่ของสะพานด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม แทนการทดสอบดั้งเดิมที่ต้องติด อุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่สะพาน โดยตรง ซึ่งผลการศึกษายังบ่งชี้ว่าความถี่ที่ได้จากการแปลงสเปกตรัม สัญญาณความเร่งของยานพาหนะนั้น เป็นความถี่เดียวกับที่ตรวจวัดที่สะพาน โดยตรง ซึ่งก็คือ ความถี่เนื่องจากการสั่นไหวของสะพานในเหตุการณ์นั้น ไม่ใช่ความถี่ธรรมชาติที่เป็นค่าความถี่ เฉพาะของสะพาน ดังนั้นการพิจารณาเพื่อนำความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยหลักการนี้ไปใช้อาจจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในส่วนนี้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการ ปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ความถี่ที่เป็นค่าตอบสุดท้ายใกล้เคียงกับความถี่ของ สะพานจริงมากที่สุด

จากการพิจารณาทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง พบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก การระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ สามารถเกิดได้ จาก 2 สาเหตุหลัก คือ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของยานพาหนะและ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของความถี่ขับเคลื่อน

1. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของยานพาหนะ

โดย Catero and O'Brien (2013) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ ของสะพานภายใต้แรงกระทำเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าความถี่ พื้นฐานของสะพานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อยานพาหนะมีการเปลี่ยนตำแหน่งไป และจะมีผลมากที่สุดเมื่อยานพาหนะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน จากการศึกษานี้ Catero and O'Brien (2013) ได้นำเสนอกราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพาน กับสัดส่วนของความถี่ของยานพาหนะต่อความถี่ของสะพาน (Vehicle frequency/ Bridge frequency, FR) และสัดส่วนของมวลยานพาหนะต่อมวลของสะพาน (Vehicle mass/ Bridge mass, MR) โดยแสดงไว้ดังภาพที่ 1-5

ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้ลองปรับแก้ผลที่เกิดจากการ เปลี่ยนตำแหน่งของยานพาหนะ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของ สะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะเคลื่อนที่ จากกราฟในภาพที่ 1-5 (โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์ ของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสะพานด้วยสัญลักษณ์ α_{corr}) แล้วจึงทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อ หาค่าความถี่ใหม่ (f_{corr}) ที่เกิดจากการปรับแก้ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานภายใต้แรง กระทำจากยานพาหนะเคลื่อนที่ แล้วจึงนำความถี่ที่ถูกปรับแก้ขึ้นไปเปรียบเทียบกับความถี่ของ ค่าความถี่ของสะพานจริง โดยผลที่ได้จากการปรับแก้ความถี่และเปรียบเทียบความถี่ของกรณี

ยานพาหนะเคลื่อนที่ในแนวตั้งกลางสะพานได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5-4 และแสดงผลของกรณี
ยานพาหนะเคลื่อนที่ในแนวด้านริมสะพานไว้ดังตารางที่ 5-5 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าความถี่ของสะพานที่ระบุได้จากผลตอบสนองความเร่ง
ยานพาหนะ ส่วนใหญ่ เป็นความถี่เดียวกับที่ได้จากการตรวจวัดที่สะพาน โดยตรง อีกทั้งยังพบว่า
ความถี่ที่ตรวจวัดที่สะพาน โดยตรงนั้นก็ไม่ใช่ความถี่เดียวกับความถี่ของสะพานจริง เนื่องจากผล
ของความแปรปรวนของค่าความถี่ของสะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะเคลื่อน สามารถ
เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$f_{Iden} = f_{amb} = f_b \times (1 \pm \alpha_{corr}) \quad (5-2)$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความถี่ใหม่ (\hat{f}_{Iden}) ที่เกิดจากการปรับแก้ผล
ของเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะเคลื่อนที่

$$f_{corr} = \frac{f_{Iden}}{(1 \pm \alpha_{corr})} \quad , \quad FR < 1 \Rightarrow +\alpha_{corr} \quad \text{และ} \quad FR > 1 \Rightarrow -\alpha_{corr} \quad (5-3)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสะพาน α_{corr} สามารถที่จะหา
ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานภายใต้แรงกระทำจาก
ยานพาหนะเคลื่อนที่ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 1-5 โดยที่ α_{corr} มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับ FR
ซึ่งความถี่ที่ถูกปรับแก้แล้วนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับความถี่ของสะพานจริง เพื่อดูค่า
ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งคำนวณได้จาก สมการที่ 5-4

$$\%Error_{corr} = \frac{(f_{corr} - f_b)}{f_b} \times 100 \quad (5-4)$$

ตารางที่ 5-4 ผลการปรับแก้ของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวกึ่งกลางสะพาน

Case	f_v (Hz)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$	FR	MR	α_{corr}	f_{corr} (Hz)	$\%Error_{corr}$
V_mLvL_c	6.348	5.371	-7.36	1.09	0.05	-0.14	6.245	7.72
V_mLvM_c	6.348	5.371	-7.36	1.09	0.05	-0.14	6.245	7.72
V_mLvH_c	6.348	5.371	-7.36	1.09	0.05	-0.14	6.245	7.72
V_mMvL_c	4.517	5.615	-3.16	0.78	0.08	+0.12	5.013	-13.53
V_mMvM_c	4.517	5.371	-7.36	0.78	0.08	+0.12	4.796	-17.29
V_mMvH_c	4.517	5.371	-7.36	0.78	0.08	+0.12	4.796	-17.29
V_mHvL_c	3.906	5.371	-7.36	0.67	0.11	+0.07	5.020	-13.42
V_mHvM_c	3.906	5.859	1.05	0.67	0.11	+0.07	5.476	-5.56
V_mHvH_c	3.906	5.371	-7.36	0.67	0.11	+0.07	5.020	-13.42

ตารางที่ 5-5 ผลการปรับแก้ของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพานในแนวด้านริมสะพาน

Case	f_v (Hz)	f_{Iden} (Hz)	$\%Error_{Iden}$ (Hz)	FR	MR	α_{corr}	f_{corr} (Hz)	$\%Error_{corr}$
V_mLvL_s	6.348	5.615	-3.16	1.09	0.05	-0.14	6.529	12.61
V_mLvM_s	6.348	5.859	1.05	1.09	0.05	-0.14	6.813	17.50
V_mLvH_s	6.348	5.371	-7.36	1.09	0.05	-0.14	6.245	7.72
V_mMvL_s	4.517	5.615	-3.16	0.78	0.08	+0.12	5.013	-13.53
V_mMvM_s	4.517	5.859	1.05	0.78	0.08	+0.12	5.231	-9.77
V_mMvH_s	4.517	5.371	-7.36	0.78	0.08	+0.12	4.796	-17.29
V_mHvL_s	3.906	5.371	-7.36	0.67	0.11	+0.07	5.020	-13.42
V_mHvM_s	3.906	5.371	-7.36	0.67	0.11	+0.07	5.020	-13.42
V_mHvH_s	3.906	5.371	-7.36	0.67	0.11	+0.07	5.020	-13.42

จากผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความถี่ของสะพาน ที่ผ่านทำการปรับแก้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะเคลื่อนที่ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุ โดยเทียบกับค่าความถี่จริงของสะพาน ($\%Error_{Iden}$) กับค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ใหม่ที่ ($\%Error_{corr}$) ที่ระบุโดยเทียบ

กับค่าความถี่จริง พบว่าค่าความถี่ที่ได้จากการปรับแก้ใหม่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับความถี่จริงของสะพานที่สูงกว่าความถี่เดิม เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบส่วนใหญ่มีค่าความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่จริงของสะพาน จึงทำค่าความถี่ที่ได้จากการปรับแก้ของกรณีที่มี $FR < 1$ ยังมีค่าที่ต่ำไปมากกว่าค่าเดิม จึงส่งผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ใหม่เมื่อเทียบกับค่าความถี่จริงของสะพานมีค่าที่สูงขึ้น

2. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของความถี่ขยับเคลื่อน

จากการวิเคราะห์สมการผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ หรือ สมการที่ 19 พบว่าความถี่ขยับเคลื่อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลทำให้ยอดความถี่ธรรมชาติของสะพานเกิดการขยับด้วยระดับของความถี่ขยับเคลื่อน ($\eta = n\pi V / L$) ทั้งขยับไปด้านซ้าย ($\omega_{bl,n} = \omega_b - \eta$) และขยับไปทางด้านขวา ($\omega_{br,n} = \omega_b + \eta$) หรืออาจจะพบเป็นยอดความถี่ของสะพานที่ใกล้เคียงกันสองยอด ดังนั้นจึงได้ทำการปรับแก้ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยความถี่ขยับเคลื่อนโดยวิธีการบวกเพิ่มและหักออก ซึ่งผลจากการปรับแก้ของกรณีที่ตรวจวัดในแนวกึ่งกลางและด้านริมสะพาน ได้แสดงตารางที่ 5-6 และตารางที่ 5-7 ตามลำดับ

โดยที่ η คือ ค่าความถี่ขยับเคลื่อน

$f_{Iden} + \eta$ คือ ค่าที่ได้จากการปรับแก้ด้วยการบวกด้วยค่าความถี่ขยับเคลื่อน (Hz)

$f_{Iden} - \eta$ คือ ค่าที่ได้จากการปรับแก้ด้วยการลบด้วยค่าความถี่ขยับเคลื่อน (Hz)

$\%Error_{corr}^{f-\eta}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกรณีปรับแก้ด้วยการลบด้วยค่าความถี่ขยับเคลื่อน คำนวณได้จากสมการที่ 5-5

$\%Error_{corr}^{f+\eta}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกรณีปรับแก้ด้วยการบวกด้วยค่าความถี่ขยับเคลื่อน คำนวณได้จากสมการที่ 5-6

$$\%Error_{corr}^{f-\eta} = \frac{[(f_{Iden} - \eta) - f_{amb}]}{f_{amb}} \times 100 \quad (5-5)$$

$$\%Error_{corr}^{f+\eta} = \frac{[(f_{Iden} + \eta) - f_{amb}]}{f_{amb}} \times 100 \quad (5-6)$$

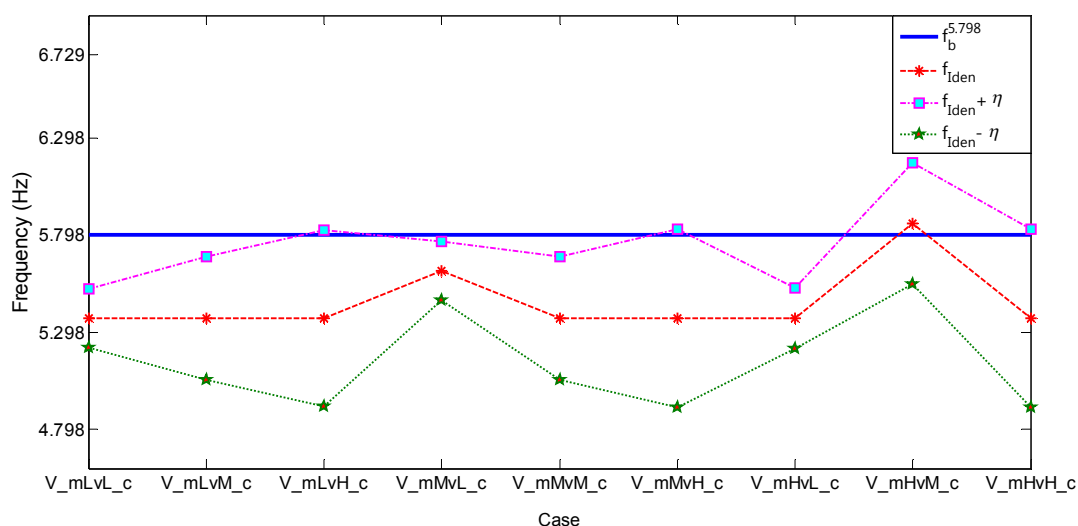
ตารางที่ 5-6 ผลการปรับแก้ด้วยความถี่ขั้วเคลื่อนของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพาน
ในแนวกึ่งกลางสะพาน

Case	η (Hz)	f_b (Hz)	f_{Iden} (Hz)	$f_{Iden} - \eta$ (Hz)	$\%Error_{corr}^{f-\eta}$	$f_{Iden} + \eta$ (Hz)	$\%Error_{corr}^{f+\eta}$
V_mLvL_c	0.150	5.798	5.371	5.221	-9.95	5.521	-4.78
V_mLvM_c	0.317	5.798	5.371	5.054	-12.83	5.688	-1.90
V_mLvH_c	0.453	5.798	5.371	4.918	-15.18	5.824	0.45
V_mMvL_c	0.150	5.798	5.615	5.465	-5.74	5.765	-0.57
V_mMvM_c	0.318	5.798	5.371	5.053	-12.85	5.689	-1.88
V_mMvH_c	0.460	5.798	5.371	4.911	-15.30	5.831	0.57
V_mHvL_c	0.154	5.798	5.371	5.217	-10.02	5.525	-4.71
V_mHvM_c	0.313	5.798	5.859	5.546	-4.35	6.172	6.45
V_mHvH_c	0.457	5.798	5.371	4.914	-15.25	5.828	0.52

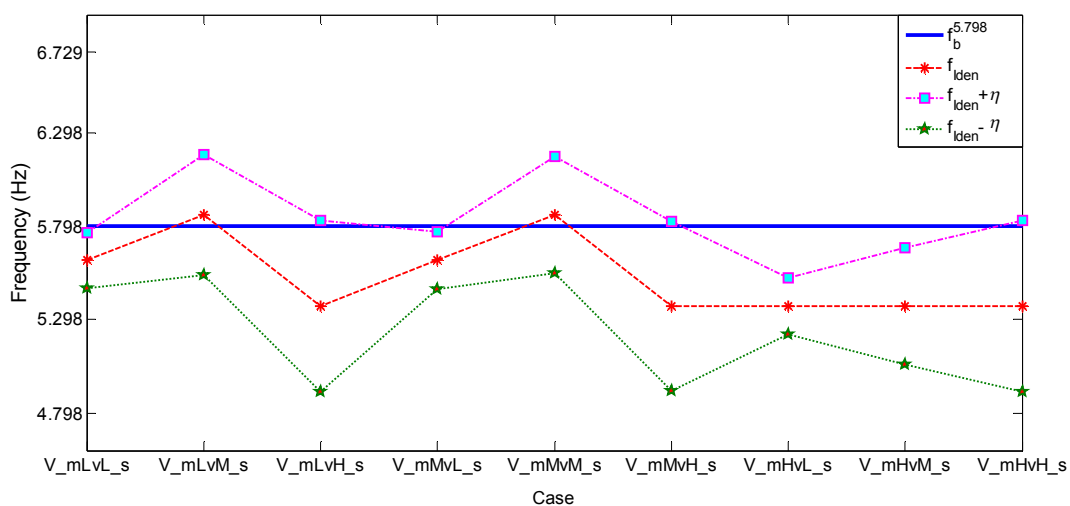
ตารางที่ 5-7 ผลการปรับแก้ด้วยความถี่ขั้วเคลื่อนของกรณีที่ยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ข้ามสะพาน
ในแนวด้านริมสะพาน

Case	η (Hz)	f_b (Hz)	f_{Iden} (Hz)	$f_{Iden} - \eta$ (Hz)	$\%Error_{corr}^{f-\eta}$	$f_{Iden} + \eta$ (Hz)	$\%Error_{corr}^{f+\eta}$
V_mLvL_s	0.151	5.798	5.615	5.464	-5.76	5.766	-0.55
V_mLvM_s	0.324	5.798	5.859	5.535	-4.54	6.183	6.64
V_mLvH_s	0.457	5.798	5.371	4.914	-15.25	5.828	0.52
V_mMvL_s	0.152	5.798	5.615	5.463	-5.78	5.767	-0.53
V_mMvM_s	0.313	5.798	5.859	5.546	-4.35	6.172	6.45
V_mMvH_s	0.454	5.798	5.371	4.917	-15.19	5.825	0.47
V_mHvL_s	0.151	5.798	5.371	5.220	-9.97	5.522	-4.76
V_mHvM_s	0.313	5.798	5.371	5.058	-12.76	5.684	-1.97
V_mHvH_s	0.456	5.798	5.371	4.915	-15.23	5.827	0.50

โดยได้แสดงผลจากการปรับแก้ของตารางที่ 5-6 และตารางที่ 5-7 ให้อยู่ในรูปของกราฟ แสดงผลของการปรับแก้ความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีตรวจวัดในแนว กึ่งกลางและด้านริมของสะพานไว้ดังภาพที่ 5-9 และภาพที่ 5-10 ตามลำดับ



ภาพที่ 5-9 ผลการปรับแก้ความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีตรวจวัดในแนว กึ่งกลางสะพาน



ภาพที่ 5-10 ผลการปรับแก้ความถี่ที่ได้จากการทดสอบด้วยความถี่ขับเคลื่อนของกรณีตรวจวัดในแนว ด้านริมสะพาน

จากการพิจารณาการปรับแก้ผลจากการทดสอบด้วยความถี่ขับเคลื่อนพบว่า การปรับแก้ด้วยการบวกด้วยความถี่ขับเคลื่อนมีแนวโน้มที่จะให้ผลการปรับแก้ที่ดีกว่าการนำความถี่ขับเคลื่อนไปหักออก เนื่องจากความถี่ที่ระบุได้จากการทดสอบส่วนใหญ่เป็นความถี่ที่น้อยกว่าความถี่จริง หรืออีกนัยหนึ่ง ก็คือ ความถี่ที่ระบุได้จากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะส่วนใหญ่เป็นความถี่ที่เกิดการขยับทางด้านซ้ายจากความถี่ของสะพานจริง ($\omega_{bl,n} = \omega_b - \eta$) จึงทำให้การปรับแก้ด้วยการบวกเพิ่มได้ผลที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าการปรับแก้ด้วยการบวกด้วยความถี่ขับเคลื่อนจะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานมีแนวโน้มที่ต่ำลง แต่ก็ยังพบว่าในบางกรณีเมื่อปรับแก้แล้วได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากความถี่ของสะพานที่เกิดจากพฤติกรรมการสั่นไหวภายใต้แรงกระทำเคลื่อนที่นั้น มีลักษณะที่ไม่เป็นระบบจึงไม่สามารถจำแนกได้ว่าความคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากการขยับเนื่องจากผลของความถี่ขับเคลื่อนในทิศทางใด

จากการพิจารณาผลที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการปรับแก้เพื่อให้ได้ความถี่ที่เป็นคำตอบสุดท้ายใกล้เคียงกับความถี่ของสะพานจริง ซึ่งหลักการในการปรับแก้ได้นำมาพิจารณาจากปัญหาการขยับของความถี่ของสะพานด้วย 2 สาเหตุ คือ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของยานพาหนะและผลของความถี่ขับเคลื่อน ซึ่งจากผลของการปรับแก้พบว่ามิตั้งกรณีที่ปรับแก้แล้วได้ผลที่ดีขึ้นและกรณีที่ปรับแก้แล้วได้ผลที่แย่ลง ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถที่จะสรุปได้อย่างชัดเจนค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดมาจากสาเหตุใด อีกทั้งหลักการที่ใช้ในการปรับแก้ทั้ง 2 สาเหตุนี้เป็นหลักการที่เกิดจากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยแบบจำลองอย่างง่าย ที่ยานพาหนะเป็นแบบ 1 องศาอิสระกระทำด้วยแรงแบบจุดกับสะพานที่มีลักษณะเป็นคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย ซึ่งอาจจะทำให้ยังไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงเท่าที่ควร

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะหลัก พบว่ายานพาหนะหลักสามารถที่จะใช้ในการตรวจวัดความถี่ของสะพานได้ เช่นเดียวกับกรณีของยานพาหนะต่อพ่วง ซึ่งในการระบุความถี่โดยใช้วิธีการพิจารณาช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ จะช่วยให้สามารถระบุความถี่ได้โดยง่ายและมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าวิธีที่นำเสนอในการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานข้างต้นมีระดับความเชื่อมั่นที่ 94.44% ที่จะได้ผลการระบุที่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 7.36\%$ หากพิจารณาความถูกต้องด้วยความถี่จริงของสะพาน และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 9.09\%$ หากพิจารณาความถูกต้องด้วยความถี่ของสะพานที่ได้จากการตรวจวัดแบบทางตรง โดยการใช้ความเร็วสูงในการสำรวจตรวจวัดช่วยทำให้ผลของความถี่ธรรมชาติของสะพานมีลักษณะที่ความเด่นชัดและง่ายต่อการระบุ ซึ่งการสำรวจ

ตรวจวัดสามารถทำได้ทั้งในแนวกึ่งกลางและในแนวด้านริมของสะพาน โดยการพิจารณาเพื่อนำวิธีการหาค่าความถี่ของสะพานที่ได้จากการตรวจวัดทั้งทางตรงและทางอ้อมไปใช้งานหรือทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของโครงสร้าง อาจจะต้องเข้าใจถึงข้อจำกัดของค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบ เนื่องจากความถี่ที่ได้นั้นเป็นความถี่ที่เกิดจากพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ณ เหตุการณ์ที่ทำการทดสอบนั้น ไม่ใช่ความถี่ที่เป็นความถี่จริงที่เกิดจากการสั่นไหวอิสระของสะพาน ซึ่งการพิจารณาเพื่อใช้ความถี่ที่ได้จากระบบปฏิสัมพันธ์ของสะพานกับยานพาหนะในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของตัวโครงสร้างสะพาน อาจจะต้องคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ของสะพาน แต่ก็สามารถที่จะใช้ในการพิจารณาเพื่อประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานเบื้องต้นได้ ด้วยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ที่มีค่ามากอย่างมีนัยสำคัญ ก็สามารถที่จะบ่งบอกได้ถึง การเสื่อมสภาพของตัวโครงสร้างสะพานได้เช่นเดียวกัน

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความถี่จากสัญญาณความถี่ซึ่งตรวจวัดที่ยานพาหนะ แทนการตรวจวัดสัญญาณความถี่ที่ติดตั้งโดยตรงที่โครงสร้างสะพาน วิธีดังกล่าวนี้เรียกว่าเป็นการทดสอบแบบทางอ้อม โดยที่ใช้ยานพาหนะหลักทำหน้าที่ในการกระตุ้นสะพานให้เกิดการสั่นไหว พร้อมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวรับการสั่นไหวของสะพาน ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและรูปแบบของการสัจจรที่แตกต่างกัน เพื่อนำเสนอถึงคุณลักษณะของยานพาหนะและรูปแบบการสัจจรที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ โดยได้สรุปผลการศึกษาแบ่งเป็นผลจากการศึกษาด้วยยานพาหนะต่อพ่วงและผลจากการศึกษาด้วยยานพาหนะหลักได้ดังนี้

1. สรุปผลการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะต่อพ่วง

1.1 ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถระบุได้จากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะต่อพ่วง ซึ่งการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ จะช่วยให้สามารถระบุความถี่ได้โดยง่ายและมีความถูกต้องมากขึ้น ด้วยระดับความเชื่อมั่น 94.44% ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 11.57\%$ เมื่อพิจารณาความถูกต้องด้วยความถี่จริงของสะพาน

1.2 ความเร็วของการสัจจรเป็นพารามิเตอร์หลักที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการตรวจวัด โดยความเร็วที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดเป็นช่วงความเร็วที่ไม่ต่ำกว่า 1.42 เมตรต่อวินาที ซึ่งเทียบเคียงกับความเร็วในสภาพโครงสร้างจริงที่ประมาณ 51 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งการใช้ความเร็วในการตรวจวัดที่ต่ำเกินไป มีแนวโน้มที่จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานที่สูงขึ้น

1.3 การใช้ส่วนต่อพ่วงที่ช่วงล่างมีสติเฟเนสที่สูงซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีความถี่สูงกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน จะให้ผลการตรวจวัดที่ดีและเด่นชัดกว่าการใช้ส่วนต่อพ่วงที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

1.4 มวลหรือน้ำหนักยานพาหนะหลักที่เพิ่มมากขึ้นไม่ได้ทำให้ความเด่นชัดของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการช่วยกระตุ้นทำให้สะพานเกิดการสั่นไหวที่เพียงพอต่อการตรวจวัด

1.5 สามารถนำวิธีที่นำเสนอตรวจวัดและวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ โดยที่ยานพาหนะสามารถสัญจรได้ในแนวด้านใดของสะพานก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นสัญจรในแนวกึ่งกลางหรือช่องจราจรด้านริมของสะพาน โดยที่การสัญจรในแนวกึ่งกลางของสะพานจะได้ผลตอบสนองของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่เด่นชัดกว่าการสัญจรในช่องจราจรด้านริมของสะพาน

1.6 จากวิธีการที่นำเสนอสามารถที่จะสัญจรยานพาหนะต่อฟ่วงไปพร้อมกับ การจราจรปกติในขณะที่ทำการตรวจวัดได้ โดยกรณีที่สัญจรตรวจวัดตามหลังยานพาหนะคันอื่นมีแนวโน้มที่จะได้ผลตอบสนองความถี่ของสะพานที่เด่นชัดกว่ากรณีที่สัญจรตรวจวัดนำหน้า

2. สรุปผลการศึกษาคหาคความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อฟ่วง

2.1 ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถระบุได้จากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะหลัก ซึ่งการระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยพิจารณาจากช่วงความถี่ที่เป็นไปได้ ประกอบกับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี EMD และวิธีการแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ จะช่วยทำให้สามารถระบุความถี่ได้โดยง่ายและมีความถูกต้องมากขึ้น ด้วยระดับความเชื่อมั่น 94.44% ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 7.36\%$ เมื่อพิจารณาความถูกต้องด้วยความถี่จริงของสะพานและที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 9.09\%$ เมื่อพิจารณาความถูกต้องด้วยความถี่ของสะพานที่ได้จากการตรวจวัดแบบทางตรง

2.2 ความถี่ของสะพานที่ระบุได้จากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ เป็นความถี่ที่เกิดจากพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ณ เหตุการณ์ที่ทำการทดสอบนั้น ไม่ใช่ความถี่ที่เป็นความถี่จริงที่เกิดจากการสั่นไหวอิสระของสะพาน

2.3 ความเร็วของการสัญจรเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการตรวจวัด โดยความเร็วที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดอยู่ที่ความเร็วประมาณ 1.46 เมตรต่อวินาที ซึ่งเทียบเคียงกับความเร็วในสภาพโครงสร้างจริงที่ประมาณ 52 กิโลเมตรต่อ ชั่วโมง ซึ่งจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการระบุที่ต่ำ

2.4 ยานพาหนะที่มีมวลมากกว่าไม่ได้ทำให้ความเด่นชัดของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการแปลงสเปกตรัมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ต้องมีมวลมากพอที่สามารถกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวด้วยแอมพลิจูดที่มากพอที่จะนำไปแยกความถี่ด้วยสเปกตรัมได้

ทั้งนี้โดยรวมแล้วจากผลการทดสอบทั้งสองกรณีที่กำลังดำเนินการใช้ยานพาหนะต่อพ่วงในการตรวจวัดมีแนวโน้มที่จะพบยอดความถี่สะพานจากสเปกตรัมของสัญญาณตรวจวัดที่เด่นชัดกว่ากรณีที่ไม่ปราศจากส่วนต่อพ่วง แต่หากพิจารณาถึงความถูกต้องและความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานพบว่า กรณีที่ใช้ยานพาหนะปราศจากส่วนต่อพ่วงให้ผลการตรวจวัดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ระดับความเชื่อมั่นเดียวกันต่ำกว่ากรณีที่ใช้ยานพาหนะต่อพ่วง อีกทั้งยังสะดวกต่อการตรวจวัดเพราะไม่จำเป็นต้องประดิษฐ์และแบกส่วนต่อพ่วงในขณะทำการตรวจวัด

ข้อเสนอแนะ

ข้อสรุปข้างต้นได้จากการศึกษาด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการพัฒนาความถูกต้องหรือการเพิ่มความเชื่อมั่นของวิธีการที่นำเสนอ ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมจากการทดสอบภาคสนาม เพื่อที่จะได้ผลที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากยิ่งขึ้น โดยคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องและรูปแบบของการสัญญาณ เช่น ผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน และการตรวจวัดขณะสัญญาณสวนทางกับยานพาหนะคันอื่น เป็นต้น รวมไปถึงทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสะพานเนื่องจากผลการเปลี่ยนตำแหน่งของยานพาหนะ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับแก้ค่าความถี่ของสะพานที่ได้จากการทดสอบให้มีความถูกต้องมากขึ้น

บรรณานุกรม

- อานนท์ นิยมสุข และพัชรพงษ์ อาสนจินดา. (2558). การหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20*, (หน้า 1-8). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Cantero, D., & O'Brien, E.J. (2013). Tracing the Evolution of Bridge Natural Frequencies as a Vehicle Traverses the Bridge. In *11th International Conference on Vibration Problems*, (pp. 1-9). Portugal.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C., & Liu, H.H. (1998). The Empirical Mode Decomposition and The Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society London*, 454, 903-995.
- Lin, C.W., & Yang, Y.B. (2005). Use of a Passing Vehicle to Scan the Fundamental Bridge Frequencies: An Experimental Verification. *Engineering of Structures*, 27, 1865–1878.
- Magalhães, F., Caetano, E., Chunha, A., Flamand, O., & Grillaud, G. (2012). Ambient and Free Vibration Tests of the Millau Viaduct: Evaluation of Alternative Processing Strategies. *Engineering Structures*, 45, 372-384.
- Malekjafarian, A., McGetrick, P.J., & O'Brien, E.J. (2015). A Review of Indirect Bridge Monitoring Using Passing Vehicles. *Shock and Vibration*, 2015, 1-16.
- McGetrick, P.J., Gonzalez, A., & O'Brien, E.J. (2009). Theoretical Investigation of the Use Of A Moving Vehicle to Identify Bridge Dynamic Parameters. *Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring*, 51(8), 433-438.
- McGetrick, P.J., Chul-Woo, K., & O'Brien, E.J. (2010). Experimental Investigation of the Detection of Bridge Dynamic Parameters Using a Moving Vehicle. In *The Twenty-Third KKCNN Symposium on Civil Engineering 2010*, (pp. 1-5). Ireland: University College Dublin Library.
- Omenzetter, P., Beskhyroun, S., Shabbir, F., Chen, G.W., Chen, X., Wang, S., & Zha, A. (2013). Forced and Ambient Vibration Testing of Full Scale Bridges. *A report submitted to Earthquake Commission Research Foundation*, (Project No. UNI/578), 127-181.

- Siringoringo, D.M., & Fujino, Y. (2010). Estimating Bridge Fundamental Frequency from Vibration Response of Instrumented Passing Vehicle: Analytical and Experimental Study. *Advances in Structural Engineering*, 15(3), 443-459.
- Tilly, G.P. (1986). Dynamic Behavior of Concrete Structures Report of the Rilem 65-MDB Committee. *Materials and Structures*, 19(6), 460-460.
- Wiberg, J. (2006). *Bridge Monitoring to Allow for Reliable Dynamic FE Modelling: A Case Study of the New Arsta Railway Bridge*. Licentiate Thesis, Division of Structural Design and Bridges, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology.
- Yang, Y.B., Lin, C.W., & Yau, J.D. (2004). Extracting the Bridge Frequencies from The Dynamic Response of a Passing Vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 272, 471–493.
- Yang, Y.B., & Chang, K.C. (2009). Extraction of Bridge Frequencies from the Dynamic Response of A Passing Vehicle Enhanced By The EMD Technique. *Journal of Sound and Vibration*, 322, 718–739.
- Yang, Y.B., Chang, K.C., & Li, Y.C. (2013). Filtering Techniques for Extracting Bridge Frequencies from a Test Vehicle Moving Over the Bridge. *Engineering Structure*, 48, 353–362.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการทดสอบแบบทางอ้อม
ของกรณีใช้ยานพาหนะต่อพ่วงเป็นตัวสัญญาณจราจรวัด

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนผลที่ได้จากการทดสอบ

สัญลักษณ์	ประเภท	ความหมาย
A	C1	ยานพาหนะต่อพ่วงที่มีความถี่ของส่วนต่อพ่วงต่ำกว่าความถี่สะพาน
	C2	ยานพาหนะต่อพ่วงที่มีความถี่ของส่วนต่อพ่วงสูงกว่าความถี่สะพาน
	V	ยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อพ่วง
B	mL	ยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบมีมวลอยู่ในระดับที่ต่ำ
	mM	ยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบมีมวลอยู่ในระดับปานกลาง
	mH	ยานพาหนะที่ใช้ในการทดสอบมีมวลอยู่ในระดับที่สูง
C	vL	ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในระดับที่ต่ำ
	vM	ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในระดับปานกลาง
	vH	ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในระดับที่สูง
D	c	สัญญาณตรวจวัดในแนวกึ่งกลางสะพาน
	s	สัญญาณตรวจวัดในแนวด้านริมสะพาน

การเขียนสัญลักษณ์แทนผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกเขียนอยู่ในรูป

A_BC_D

โดยที่ A = แทนประเภทของยานพาหนะตรวจวัด

B = แทนระดับของมวลยานพาหนะที่ใช้ทดสอบ

C = แทนระดับของความเร็วที่ใช้ทดสอบ

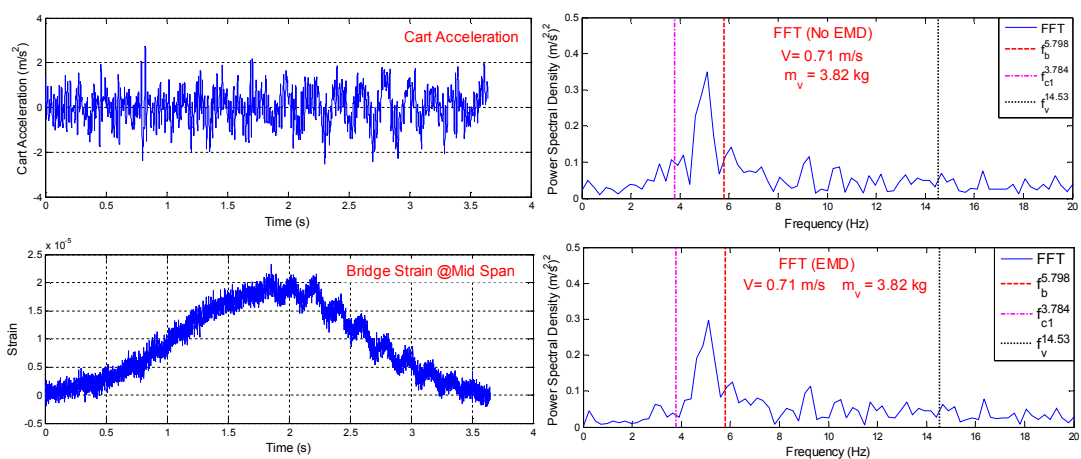
D = แทนตำแหน่งของช่องจราจรที่ใช้ทดสอบ

ยกตัวอย่างเช่นการเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์

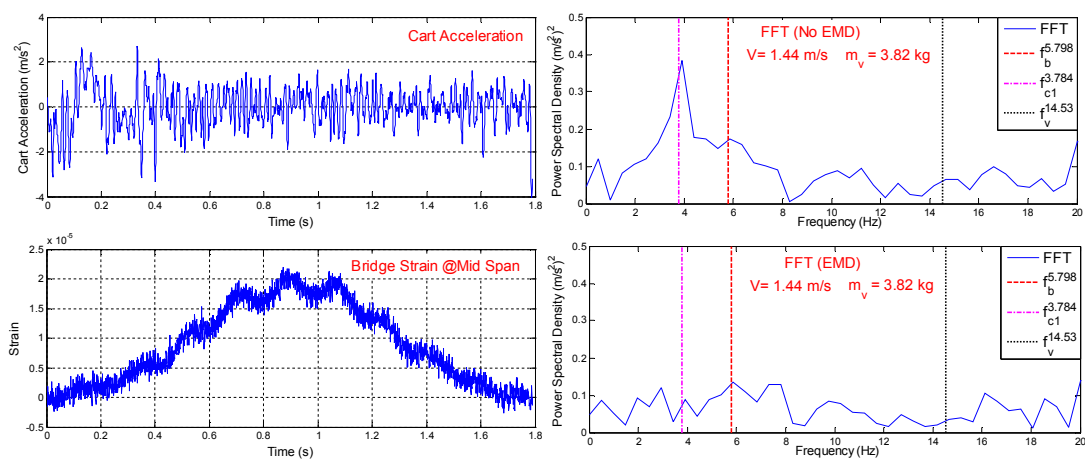
C1_mLvL_c

มีความหมายว่ากรณีนี้เป็นกรณีทดสอบด้วยยานพาหนะต่อพ่วงที่มีความถี่ของชุดต่อพ่วงต่ำกว่าสะพานในการตรวจวัด โดยที่มวลของยานพาหนะที่ใช้ทดสอบอยู่ในระดับที่ต่ำและใช้ความเร็วในการสัญญาณตรวจวัดในระดับที่ต่ำ ซึ่งกรณีนี้เป็นการสัญญาณตรวจวัดในกึ่งกลางสะพาน

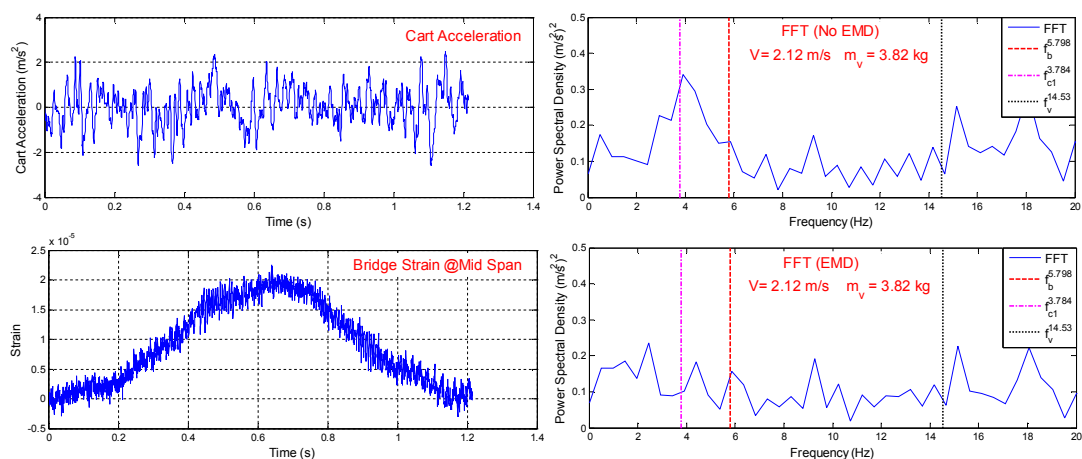
โดยในส่วนของกรรณิที่ยานพาหนะต่อฟ่งเคลื่อนที่ข้ามสะพานไปพร้อมกับ
ยานพาหนะอื่น จะมีการเติมสัญลักษณ์นำหน้าสัญลักษณ์ที่กล่าวไว้ข้างต้นด้วย F แทนกรรณิที่
ยานพาหนะต่อฟ่งเคลื่อนที่นำหน้ายานพาหนะคันอื่นและ B แทนกรรณิที่ยานพาหนะต่อฟ่ง
เคลื่อนที่ตามหลังยานพาหนะคันอื่น



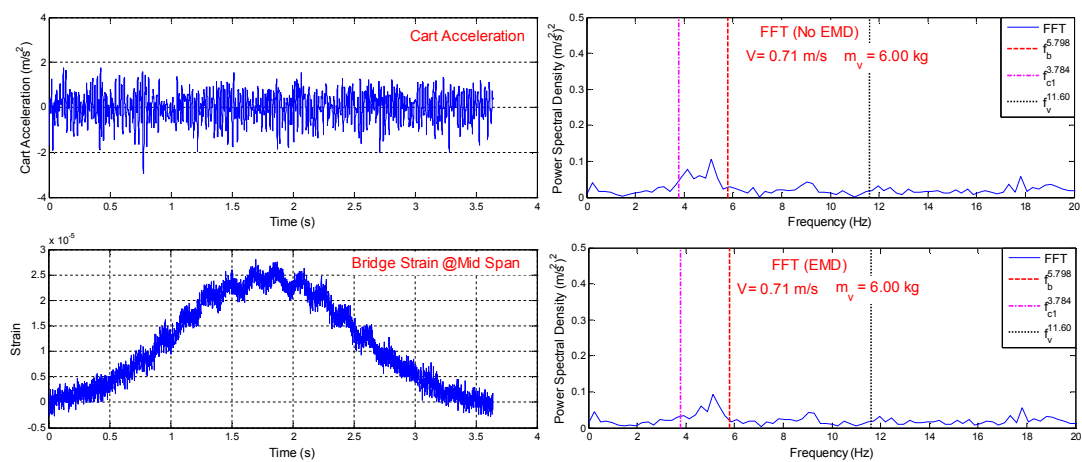
ภาพภาคผนวกที่ ก-1 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วง
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mLvL_c)



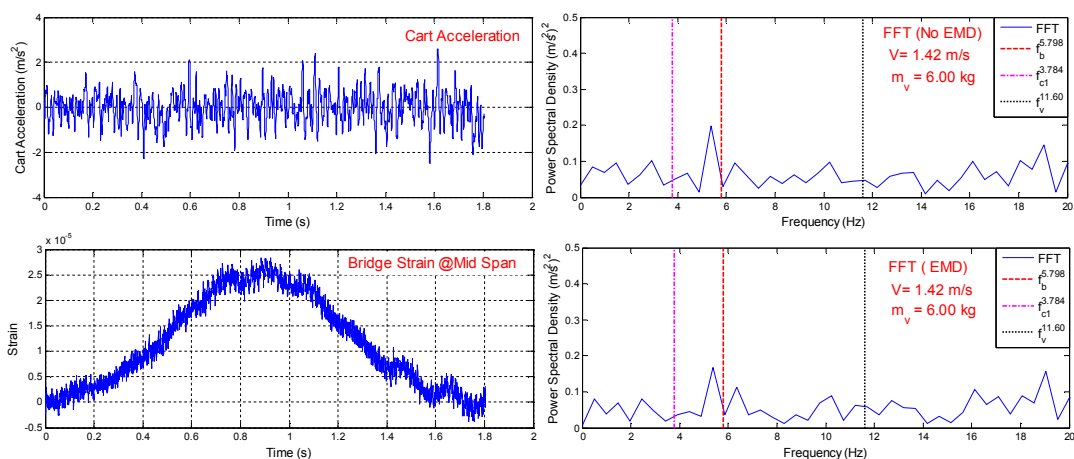
ภาพภาคผนวกที่ ก-2 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วง
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mLvM_c)



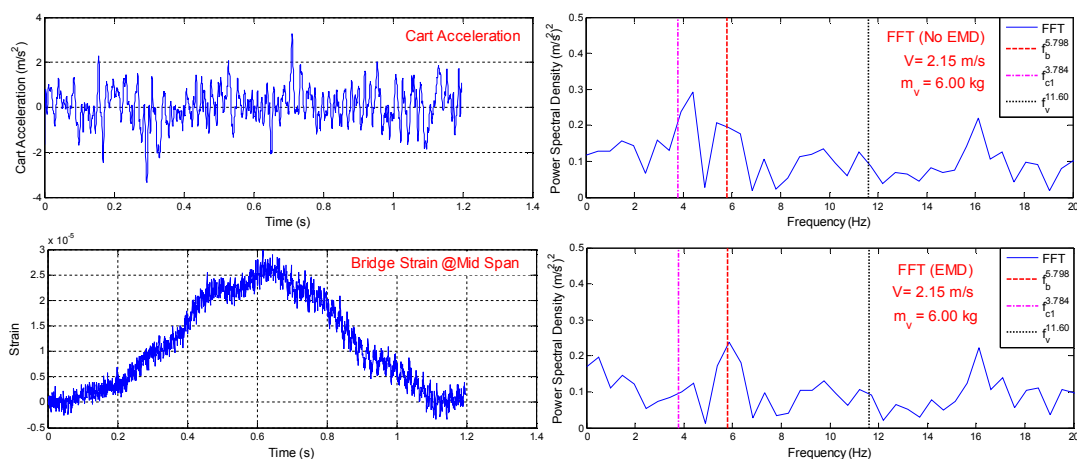
ภาพภาคผนวกที่ ก-3 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mLvH_c)



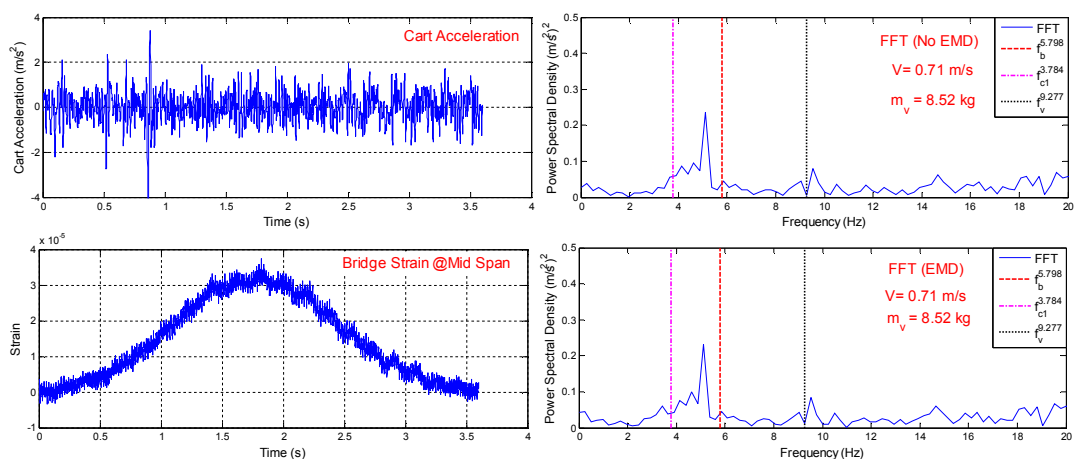
ภาพภาคผนวกที่ ก-4 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mMvL_c)



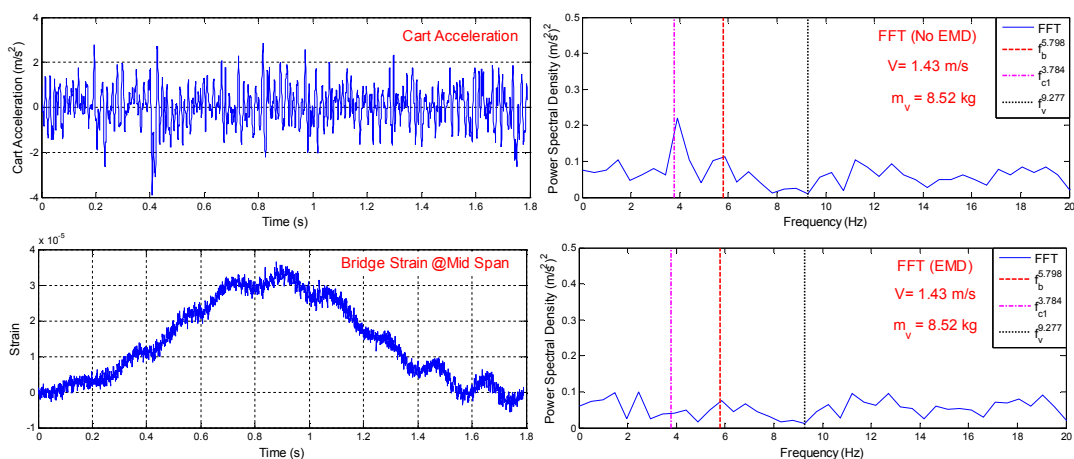
ภาพภาคผนวกที่ ก-5 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mMvM_c)



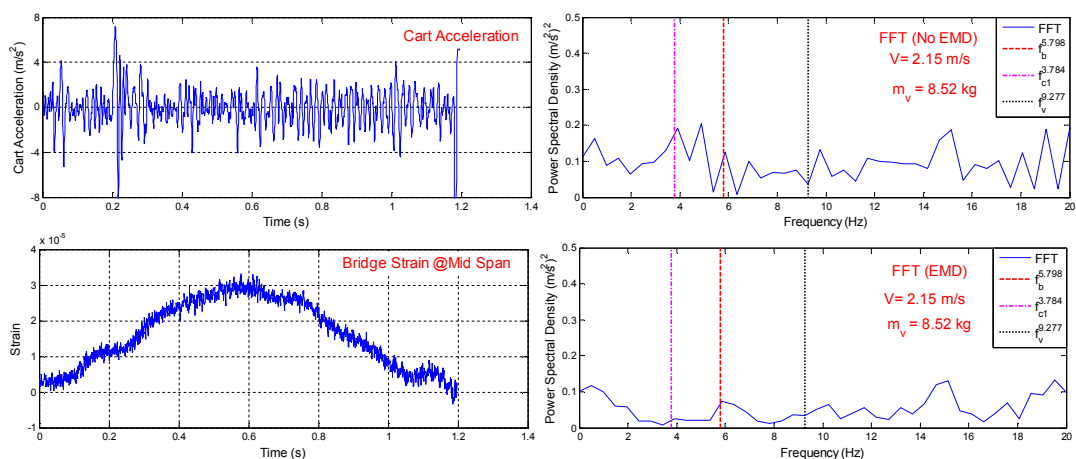
ภาพภาคผนวกที่ ก-6 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mMvH_c)



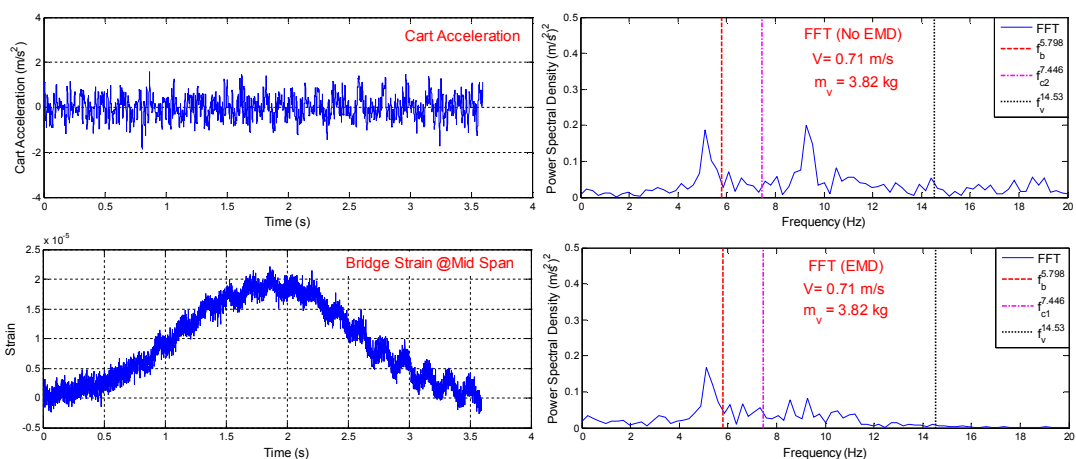
ภาพภาคผนวกที่ ก-7 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mHvL_c)



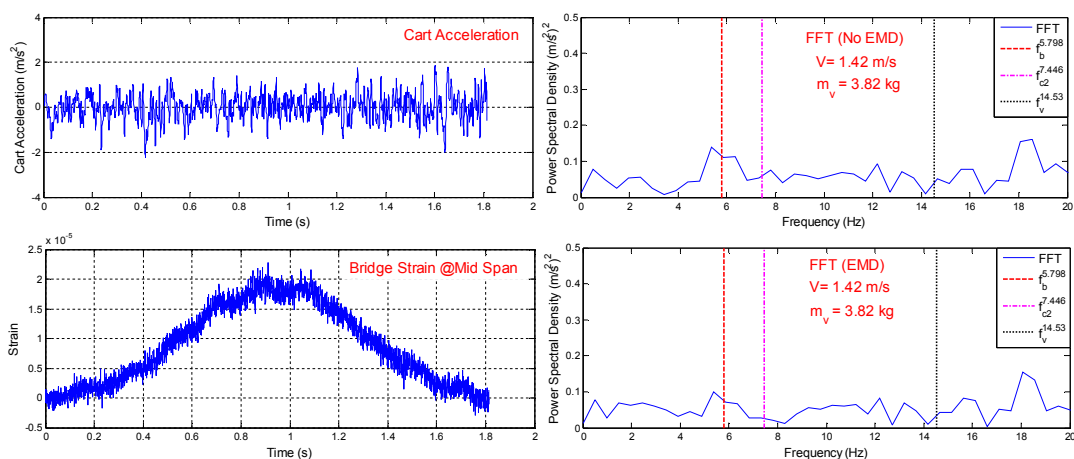
ภาพภาคผนวกที่ ก-8 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mHvM_c)



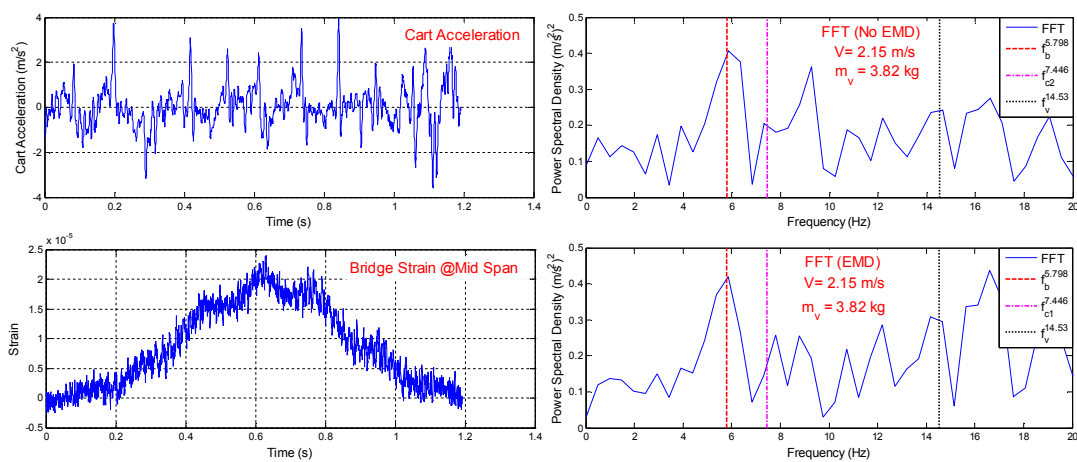
ภาพภาคผนวกที่ ก-9 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C1_mHvH_c)



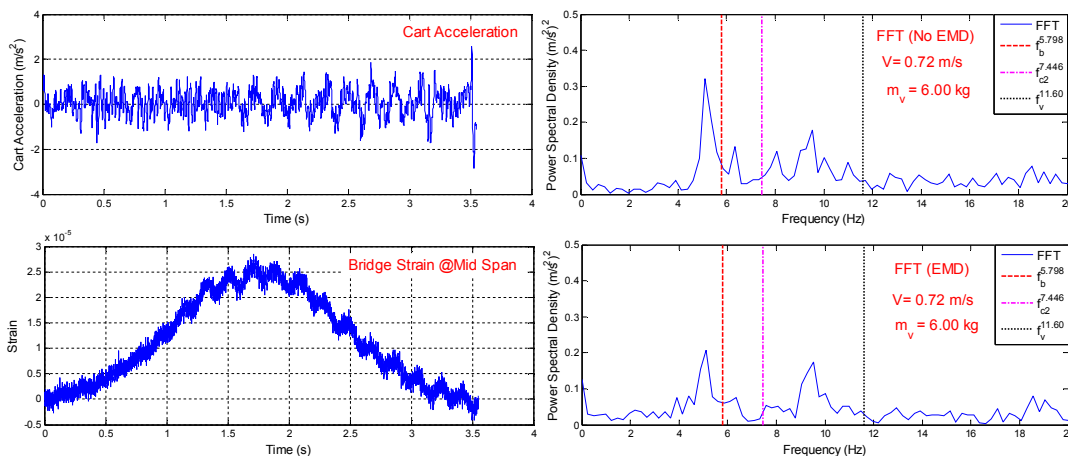
ภาพภาคผนวกที่ ก-10 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mLvL_c)



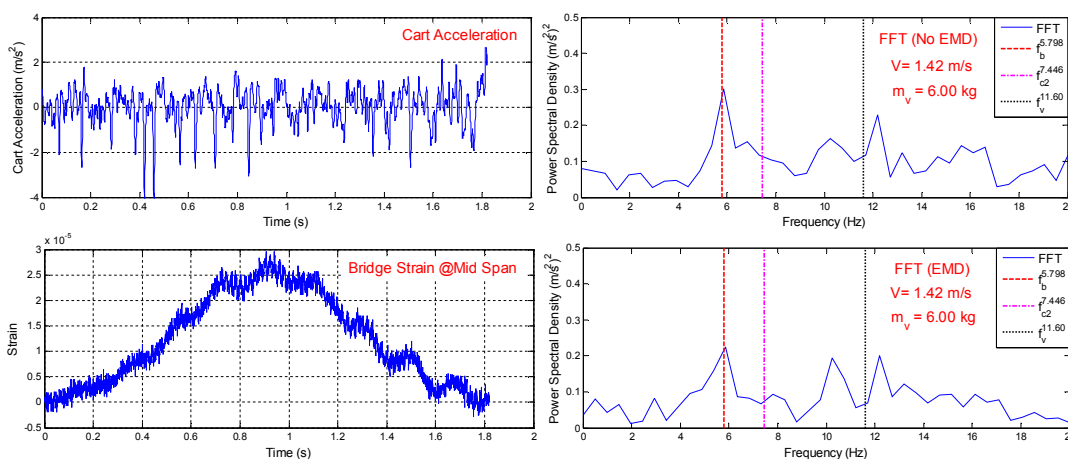
ภาพภาคผนวกที่ ก-11 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mLvM_c)



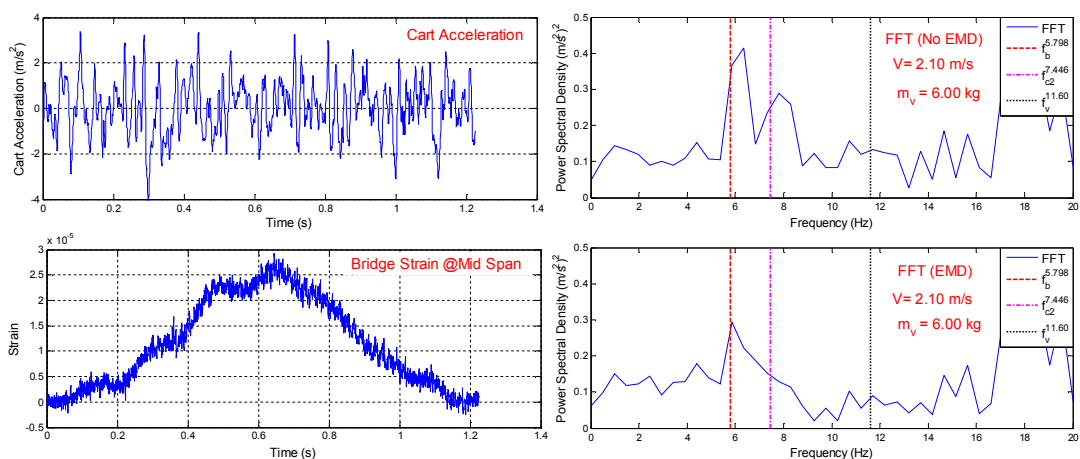
ภาพภาคผนวกที่ ก-12 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mLvH_c)



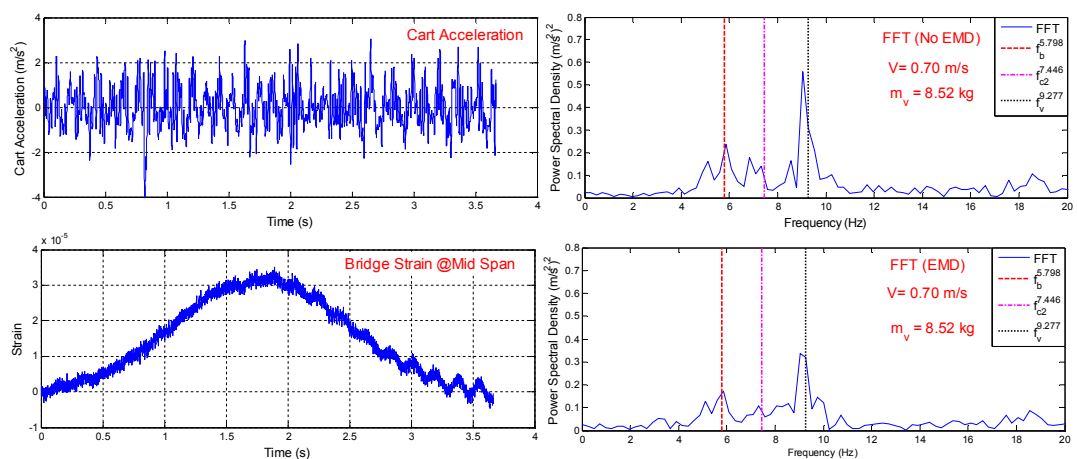
ภาพภาคผนวกที่ ก-13 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mMvL_c)



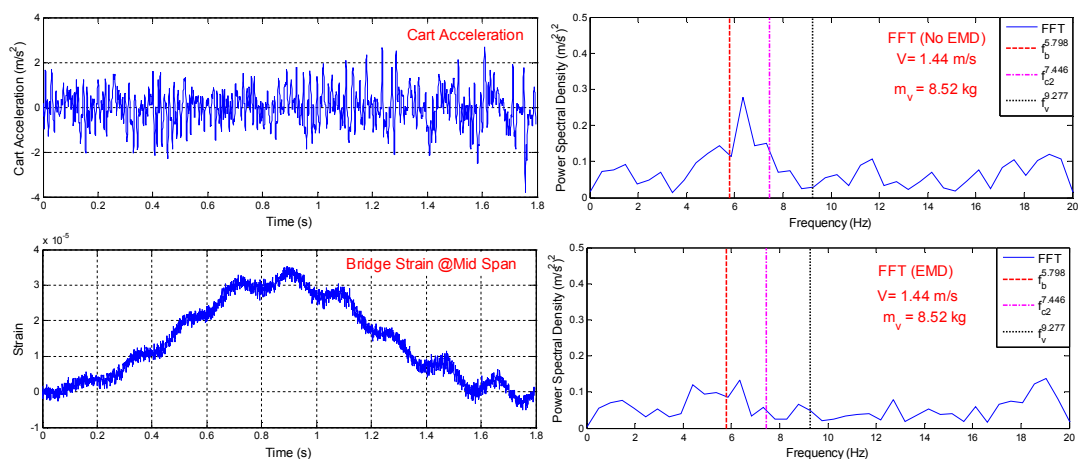
ภาพภาคผนวกที่ ก-14 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mMvM_c)



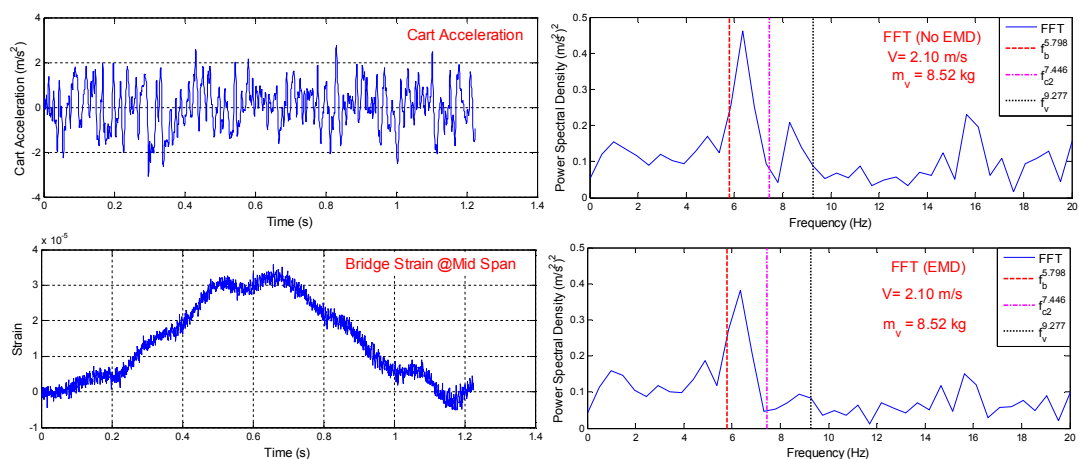
ภาพภาคผนวกที่ ก-15 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mMvH_c)



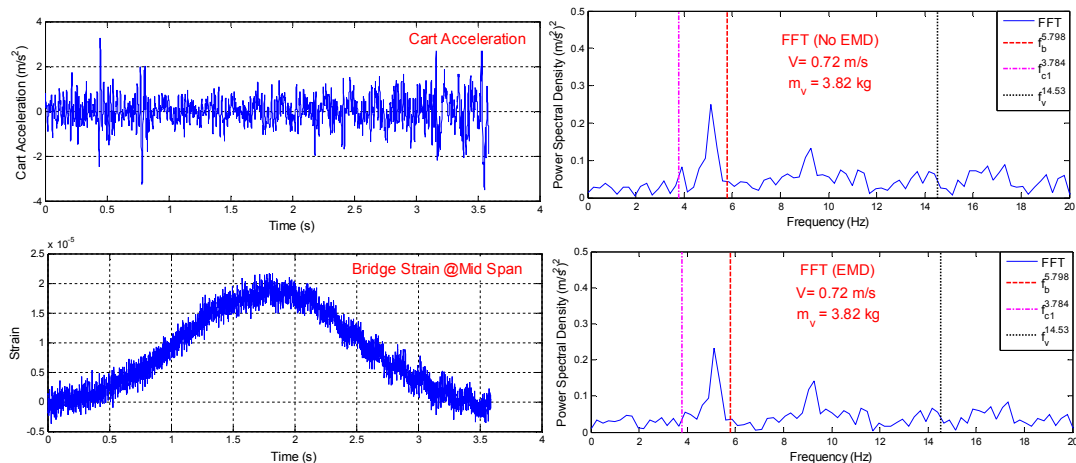
ภาพภาคผนวกที่ ก-16 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mHvL_c)



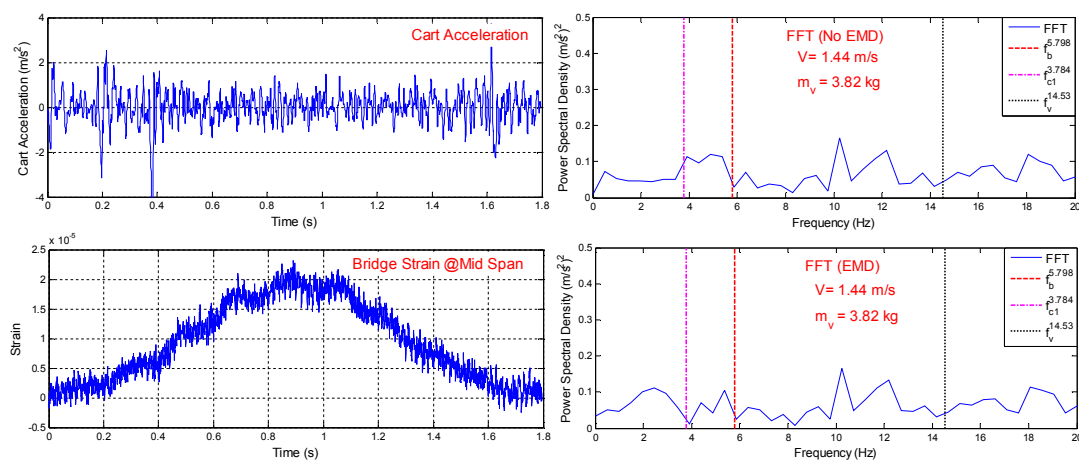
ภาพภาคผนวกที่ ก-17 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mHvM_c)



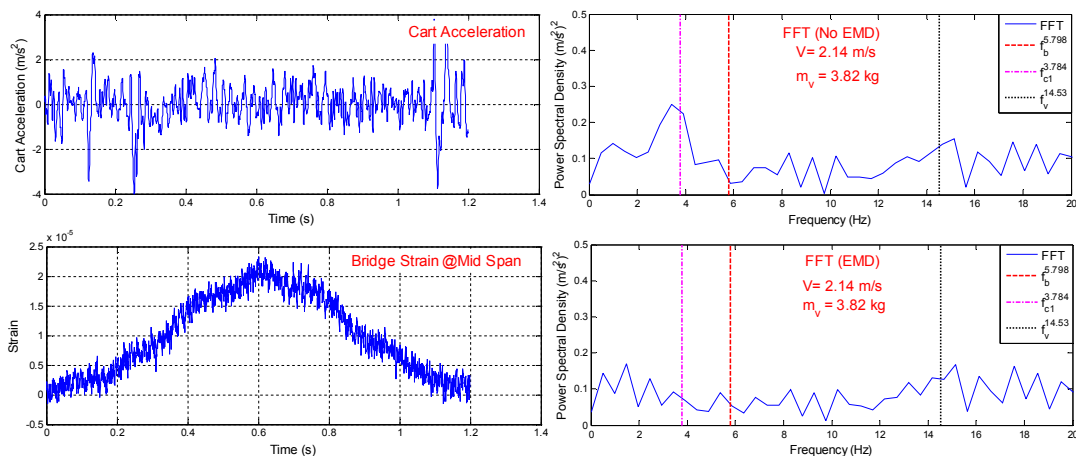
ภาพภาคผนวกที่ ก-18 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (C2_mHvH_c)



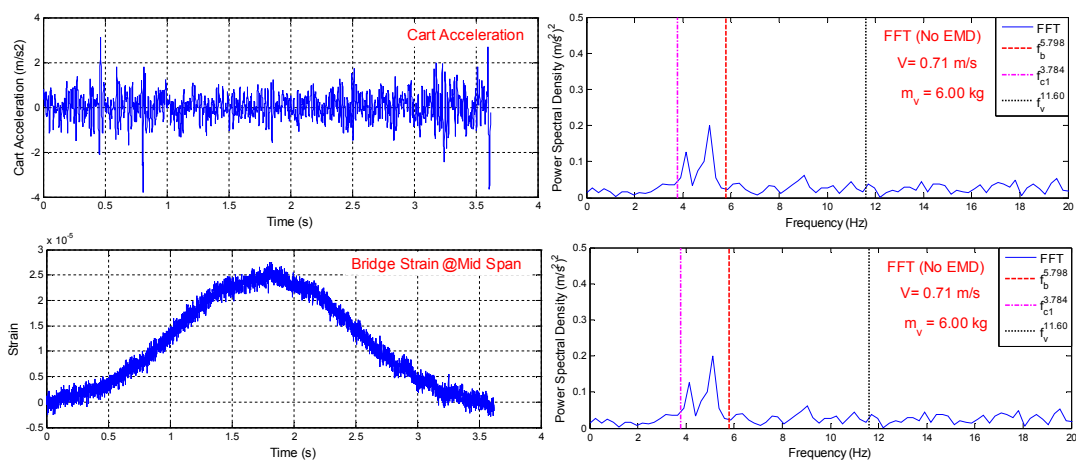
ภาพภาคผนวกที่ ก-19 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mLvL_s)



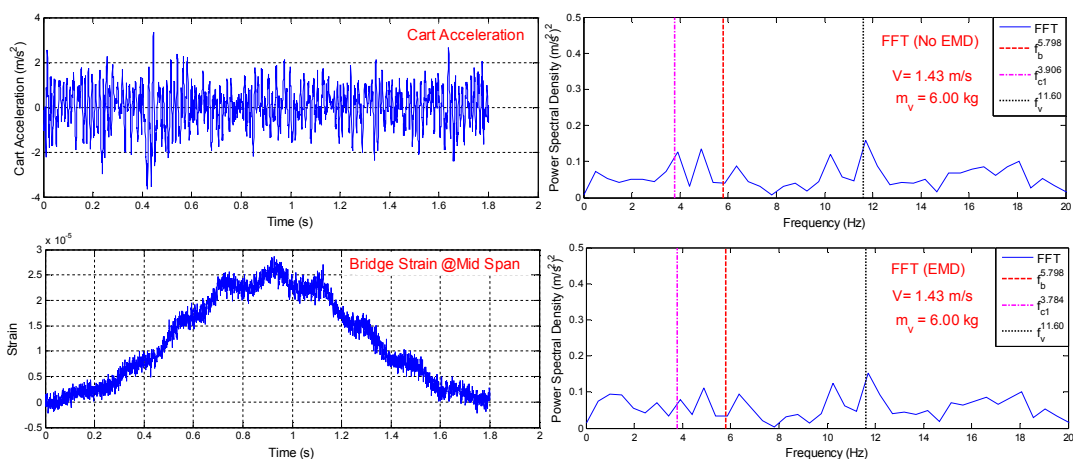
ภาพภาคผนวกที่ ก-20 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mLvM_s)



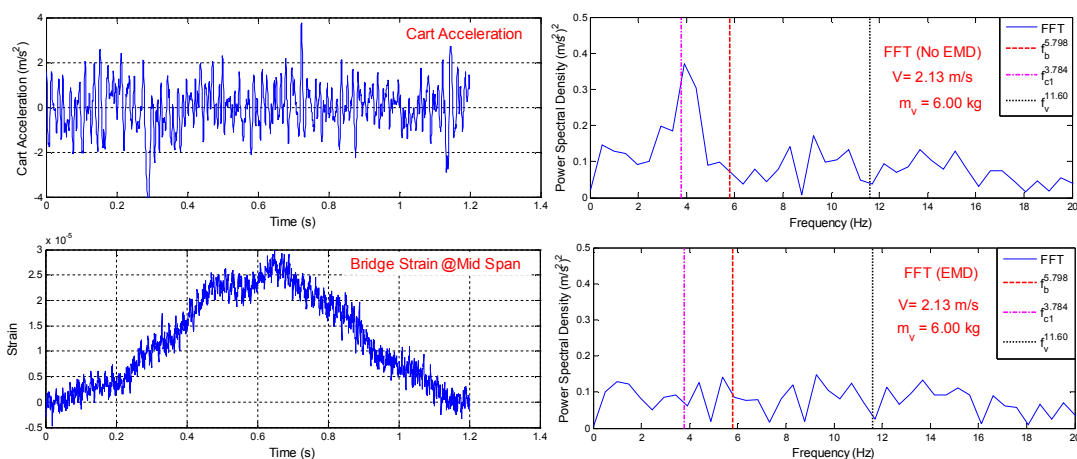
ภาพภาคผนวกที่ ข-21 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mLvH_s)



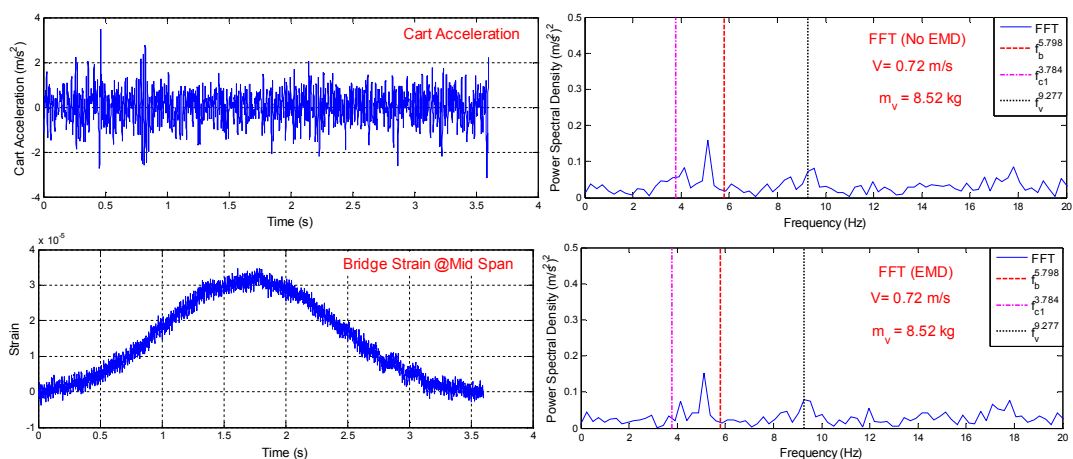
ภาพภาคผนวกที่ ก-22 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mMvL_s)



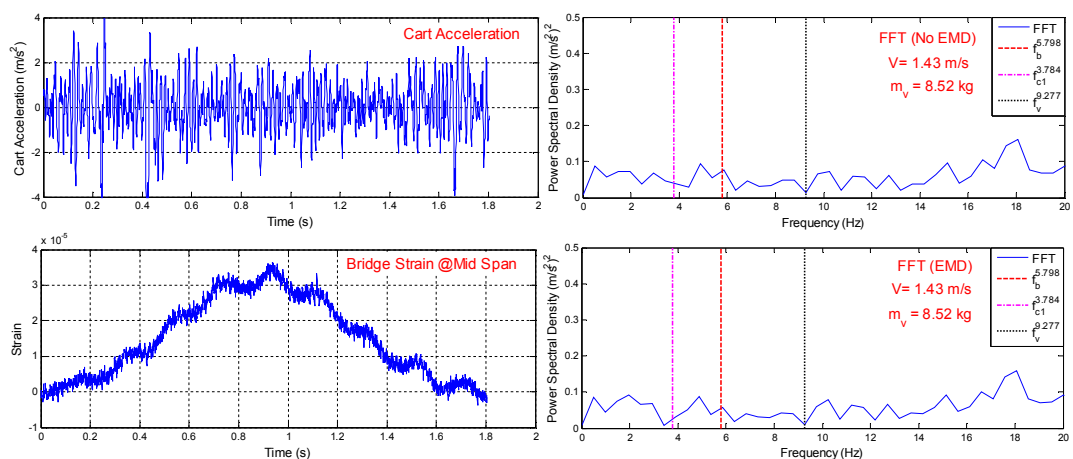
ภาพภาคผนวกที่ ข-23 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mMvM_s)



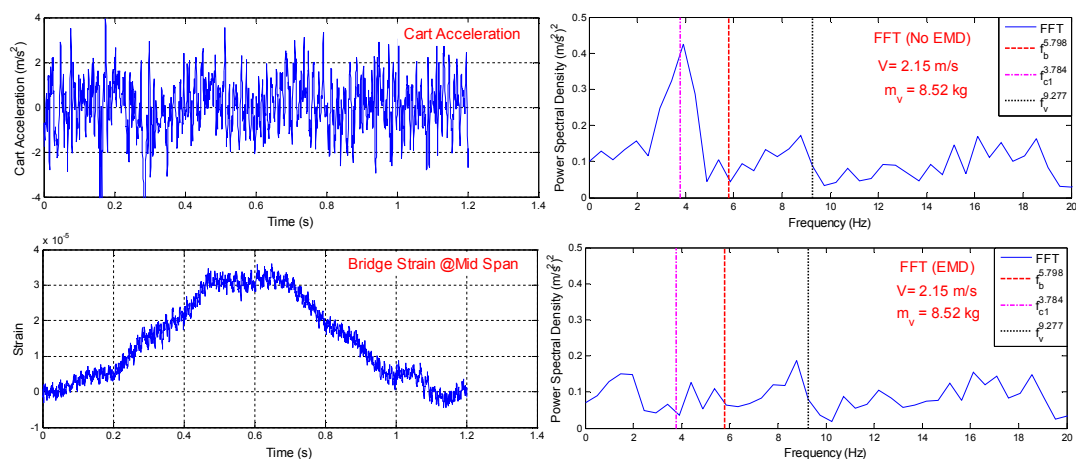
ภาพภาคผนวกที่ ก-24 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mMvH_s)



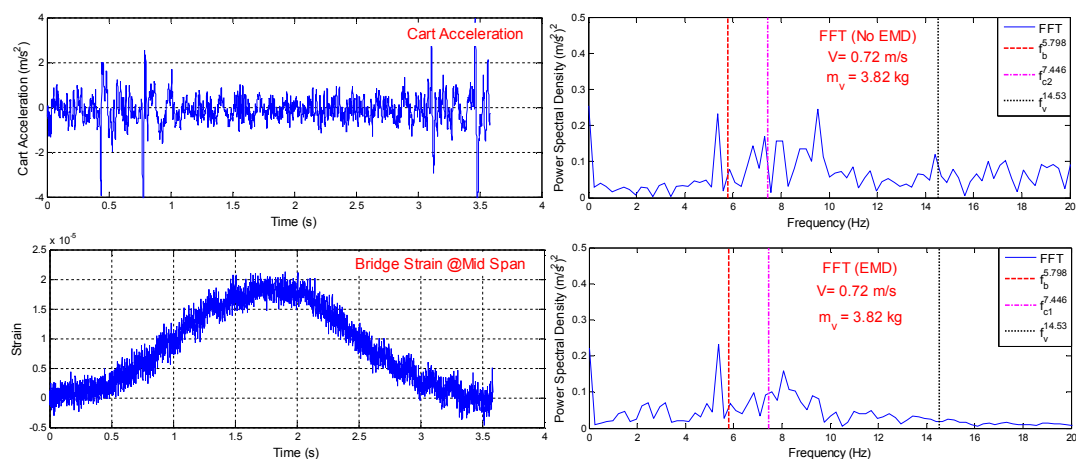
ภาพภาคผนวกที่ ก-25 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mHvL_s)



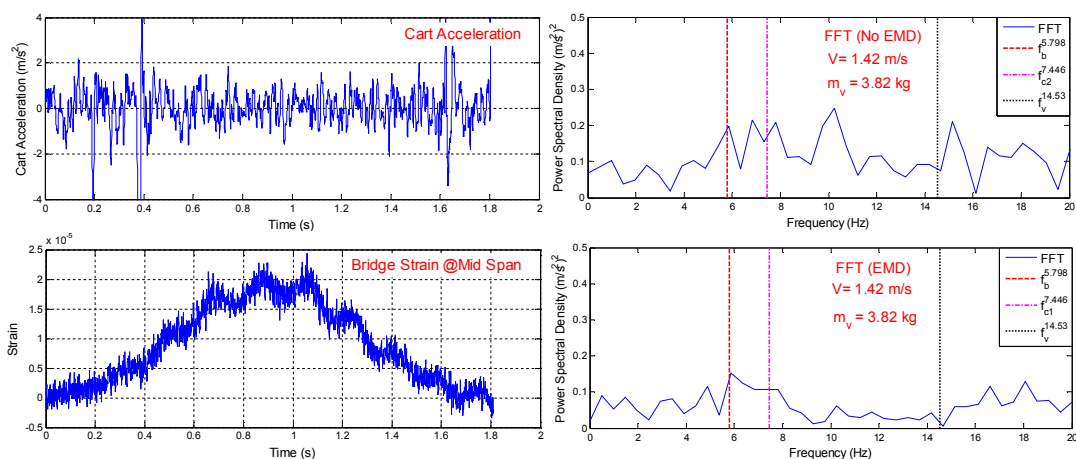
ภาพภาคผนวกที่ ก-26 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mHvM_s)



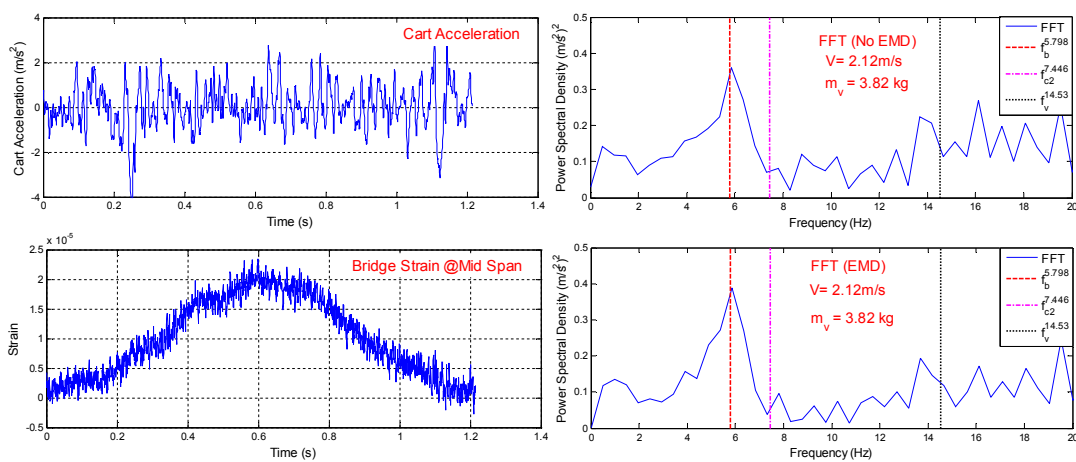
ภาพภาคผนวกที่ ก-27 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C1_mHvH_s)



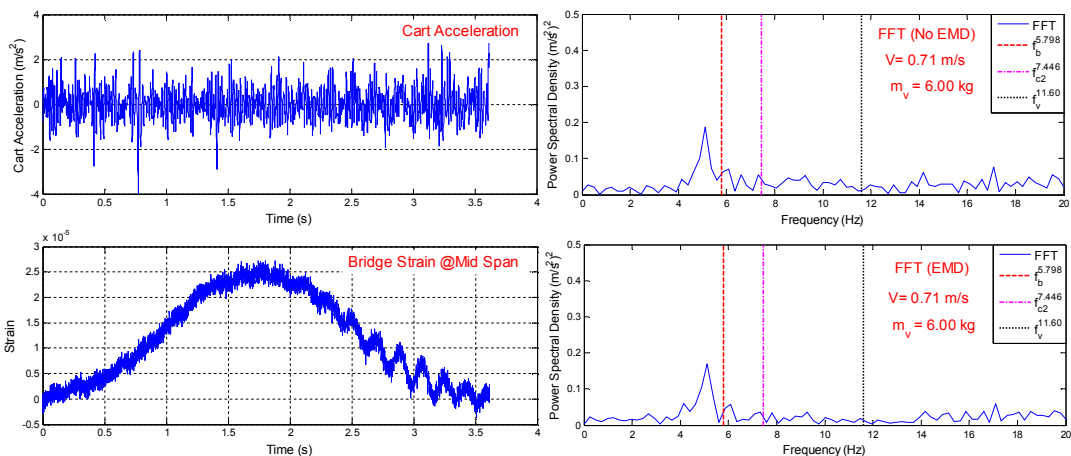
ภาพภาคผนวกที่ ก-28 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mLvL_s)



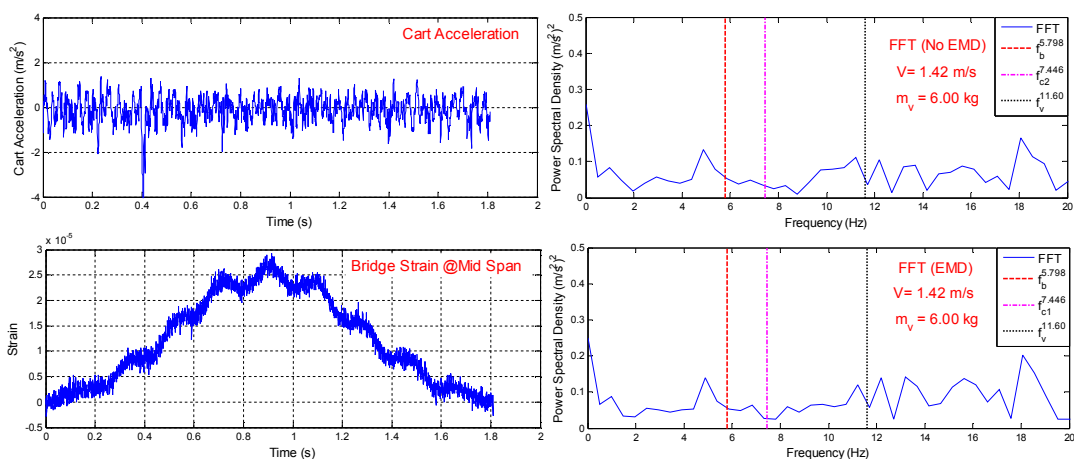
ภาพภาคผนวกที่ ก-29 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mLvM_s)



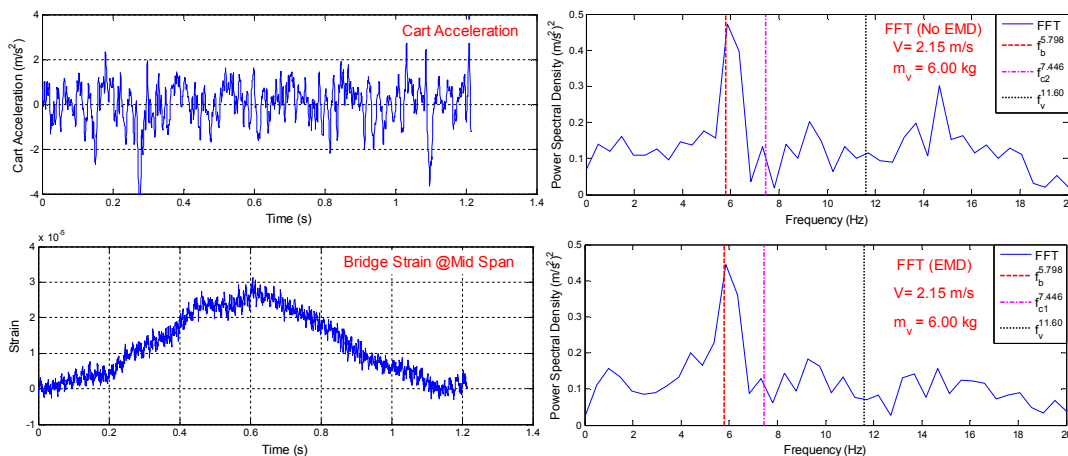
ภาพภาคผนวกที่ ก-30 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mLvH_s)



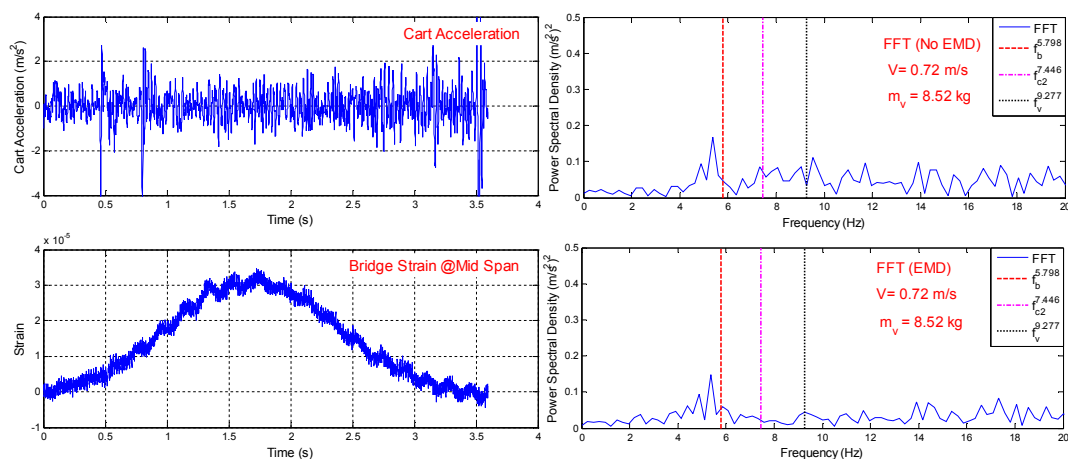
ภาพภาคผนวกที่ ก-31 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mMvL_s)



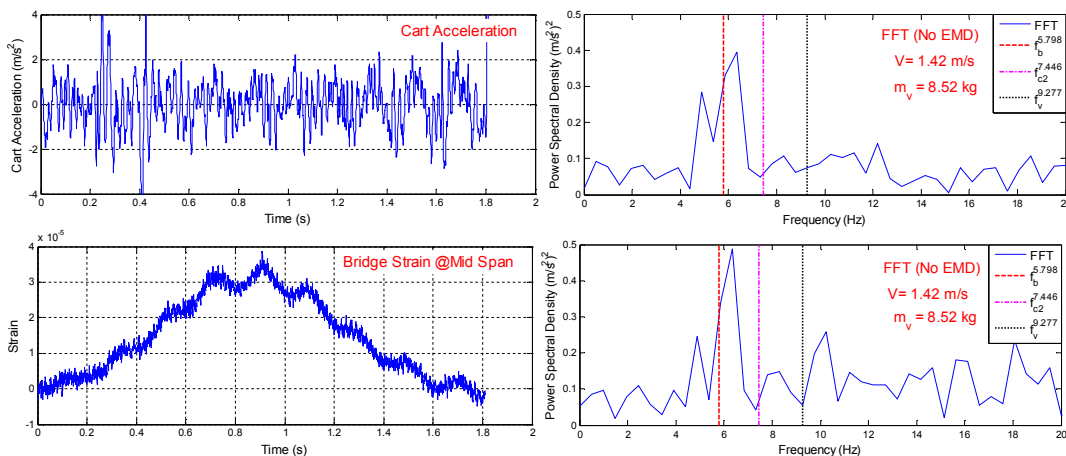
ภาพภาคผนวกที่ ก-32 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mMvM_s)



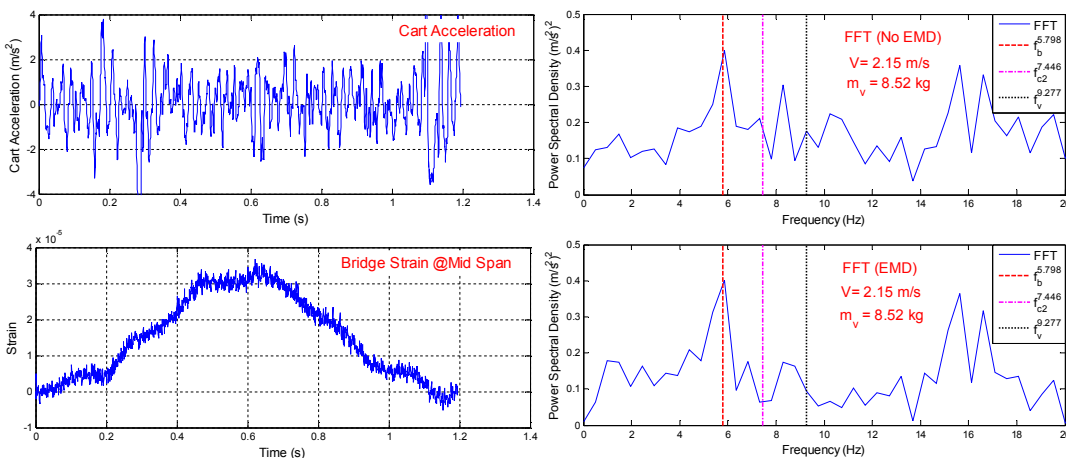
ภาพภาคผนวกที่ ก-33 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mMvH_s)



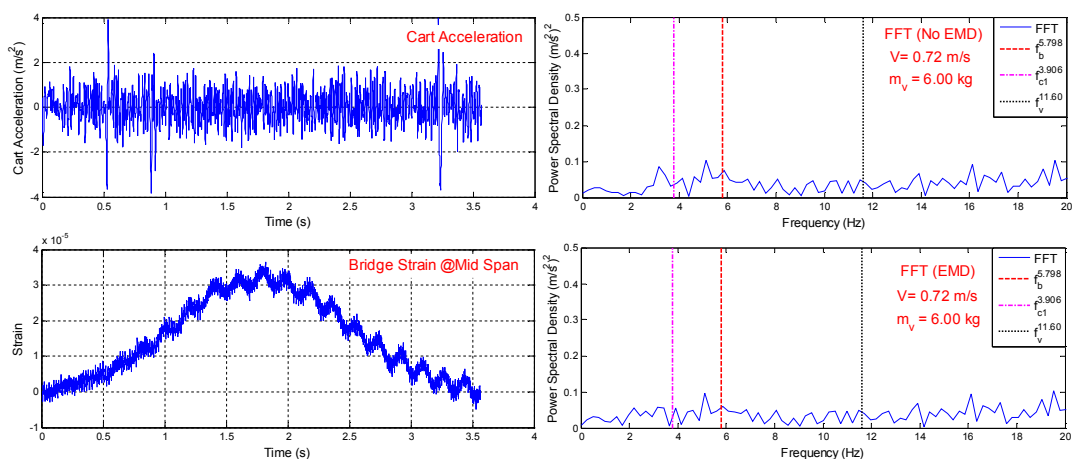
ภาพภาคผนวกที่ ก-34 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mHvL_s)



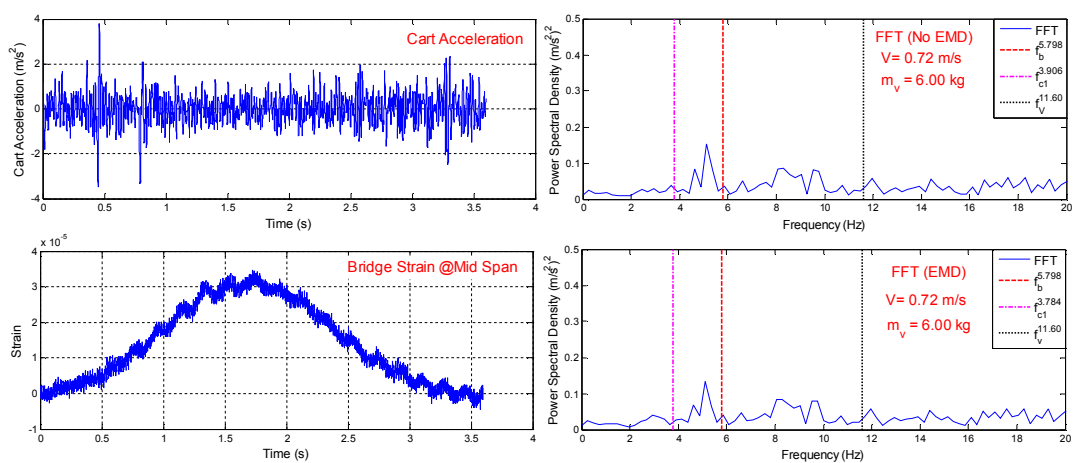
ภาพภาคผนวกที่ ก-35 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mHvM_s)



ภาพภาคผนวกที่ ก-36 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (C2_mHvH_s)



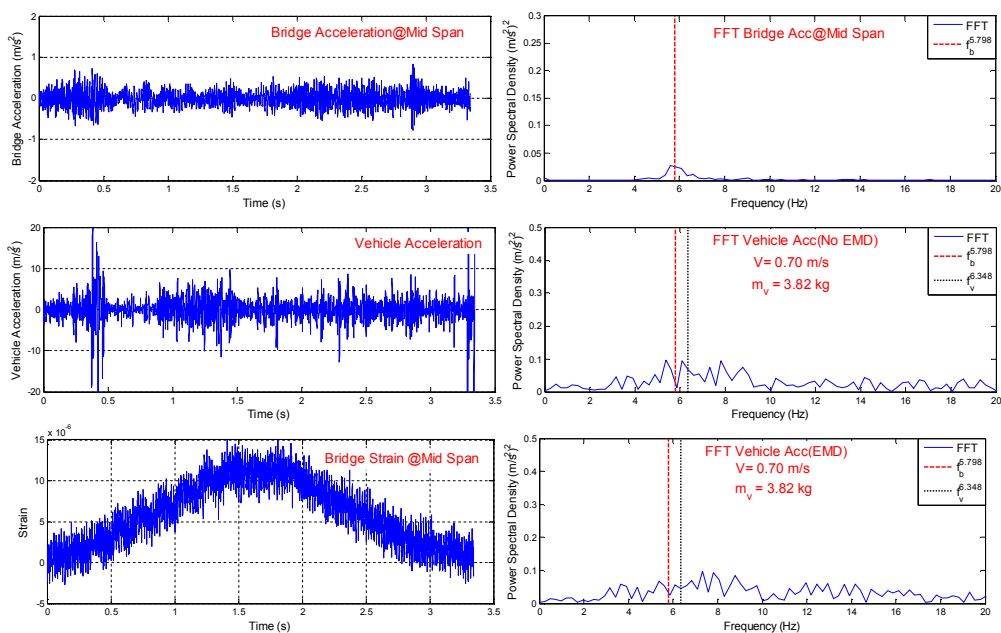
ภาพภาคผนวกที่ ก-37 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่นำหน้ายานพาหนะคันอื่นในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (F_C1_mMvL_c)



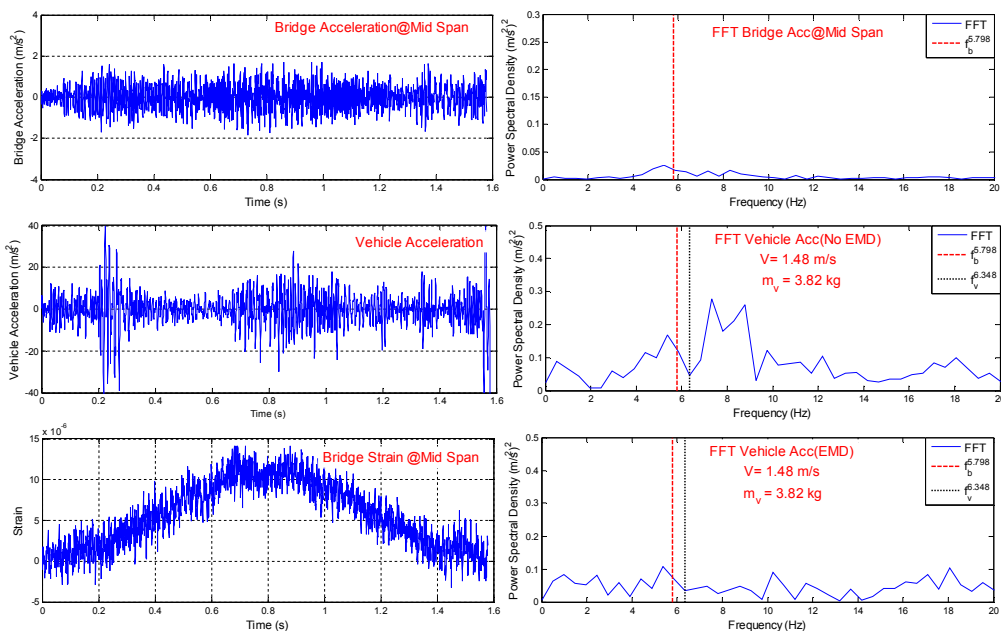
ภาพภาคผนวกที่ ก-38 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะต่อพ่วงเคลื่อนที่ตามหลังยานพาหนะคันอื่นในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (B_C1_mMvL_c)

ภาคผนวก ข

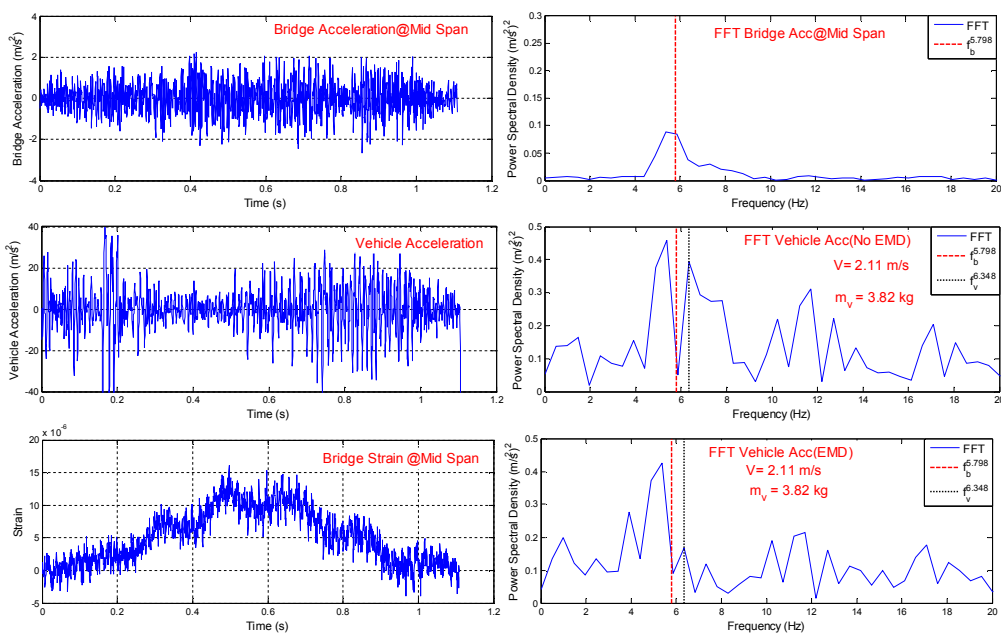
ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยการทดสอบแบบทางอ้อม
ของกรณีใช้ยานพาหนะที่ปราศจากส่วนต่อพ่วงตรวจวัด



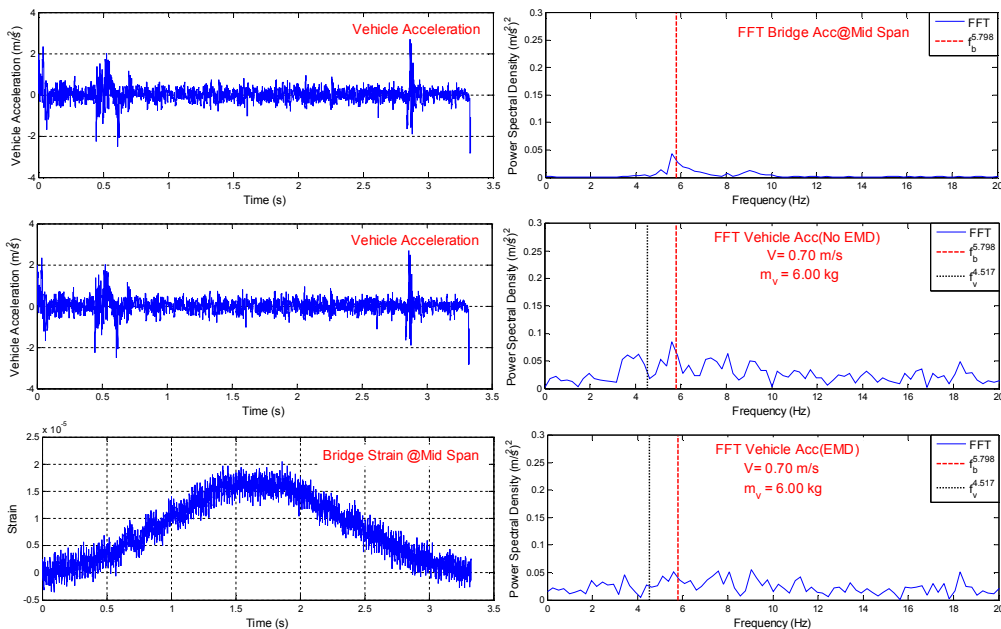
ภาพภาคผนวกที่ ข-1 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mLvL_c)



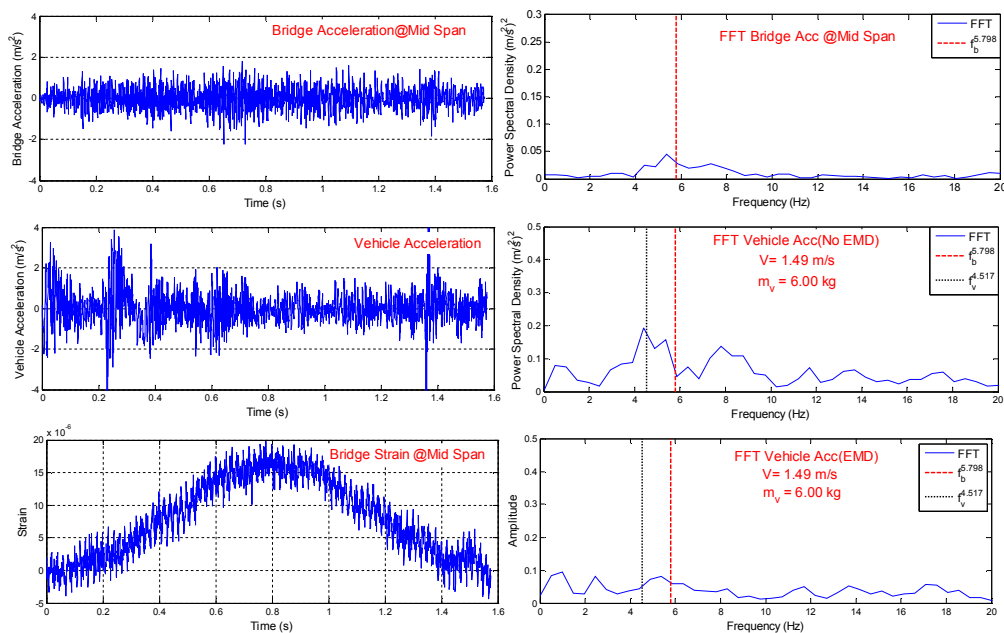
ภาพภาคผนวกที่ ข-2 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mLvM_c)



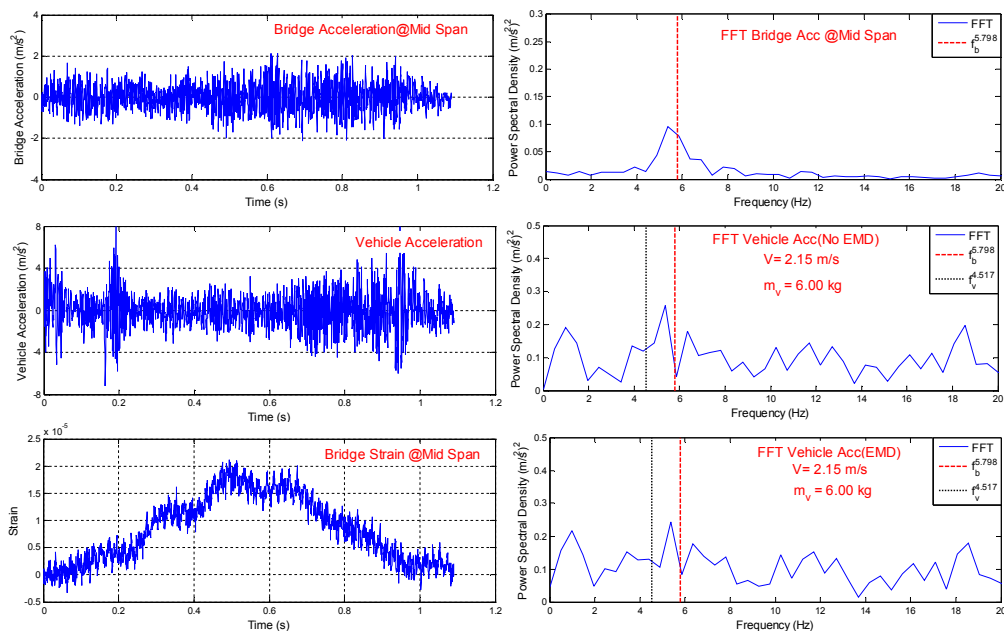
ภาพภาคผนวกที่ ข-3 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mLvH_c)



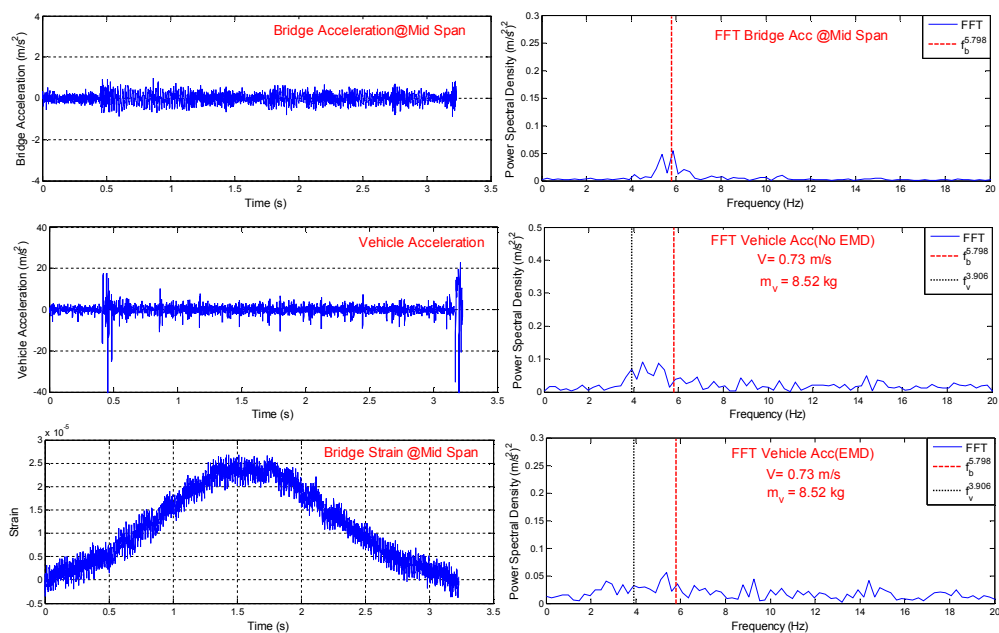
ภาพภาคผนวกที่ ข-4 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mMvL_c)



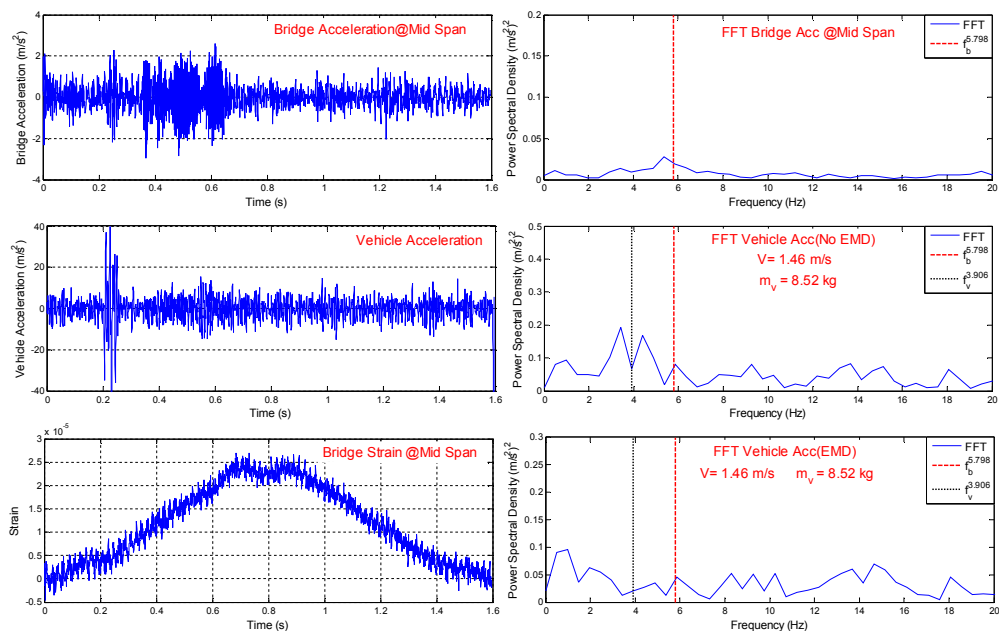
ภาพภาคผนวกที่ ข-5 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mMvM_c)



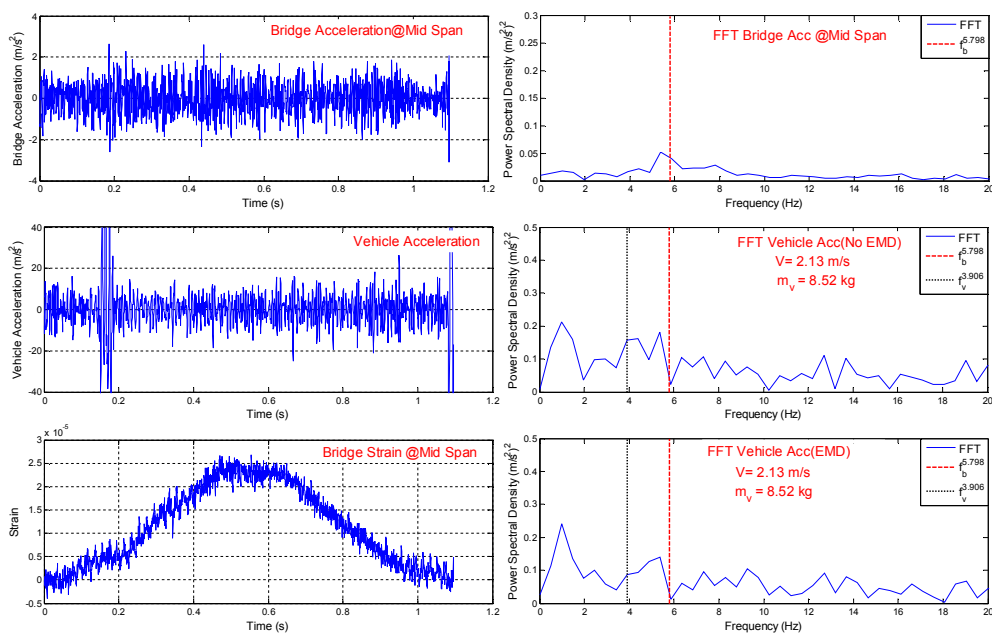
ภาพภาคผนวกที่ ข-6 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mMvH_c)



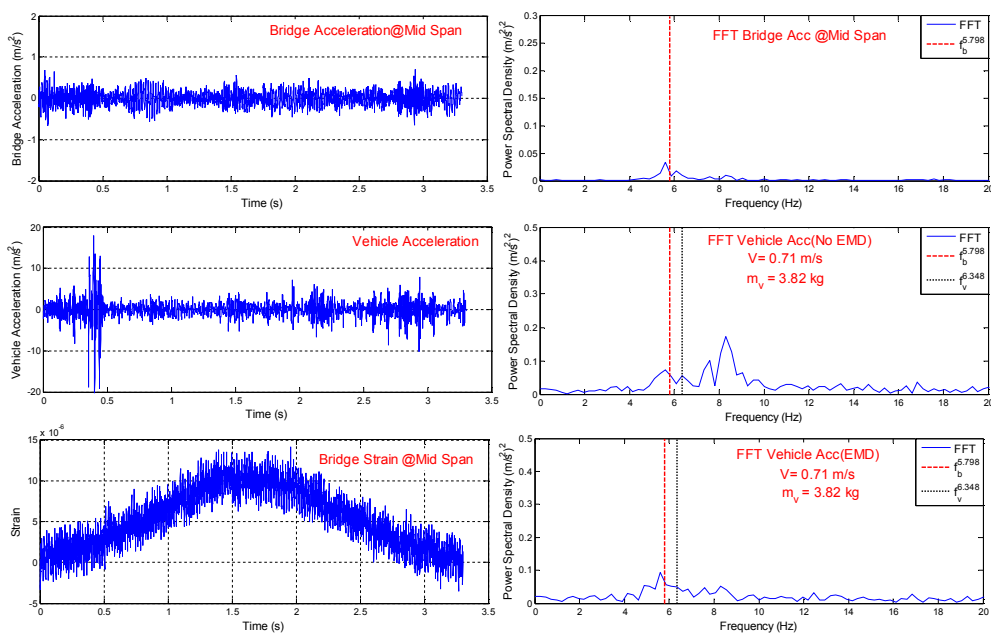
ภาพภาคผนวกที่ ข-7 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mHvL_c)



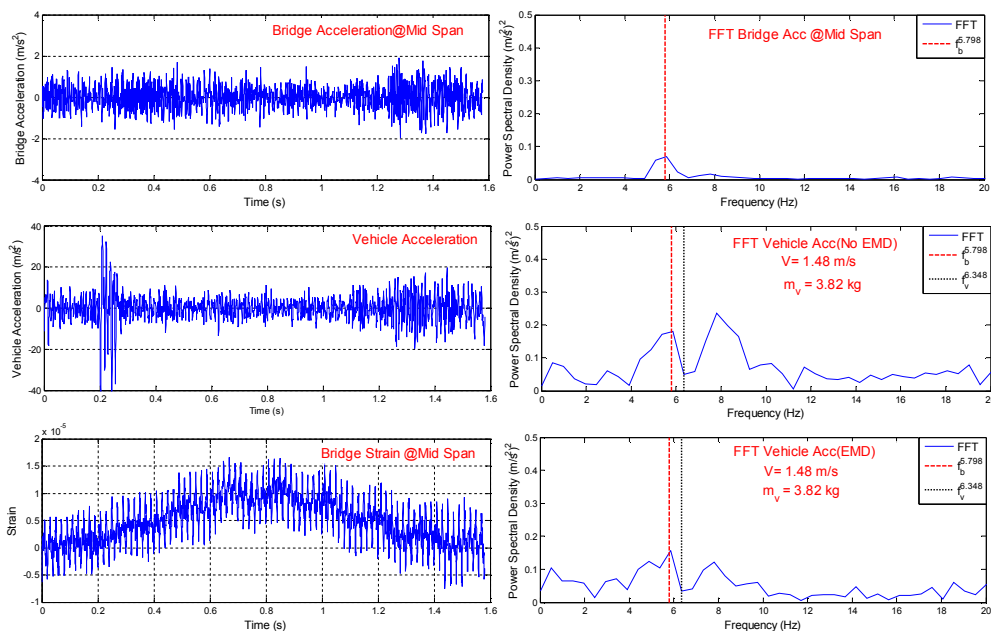
ภาพภาคผนวกที่ ข-8 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mHvM_c)



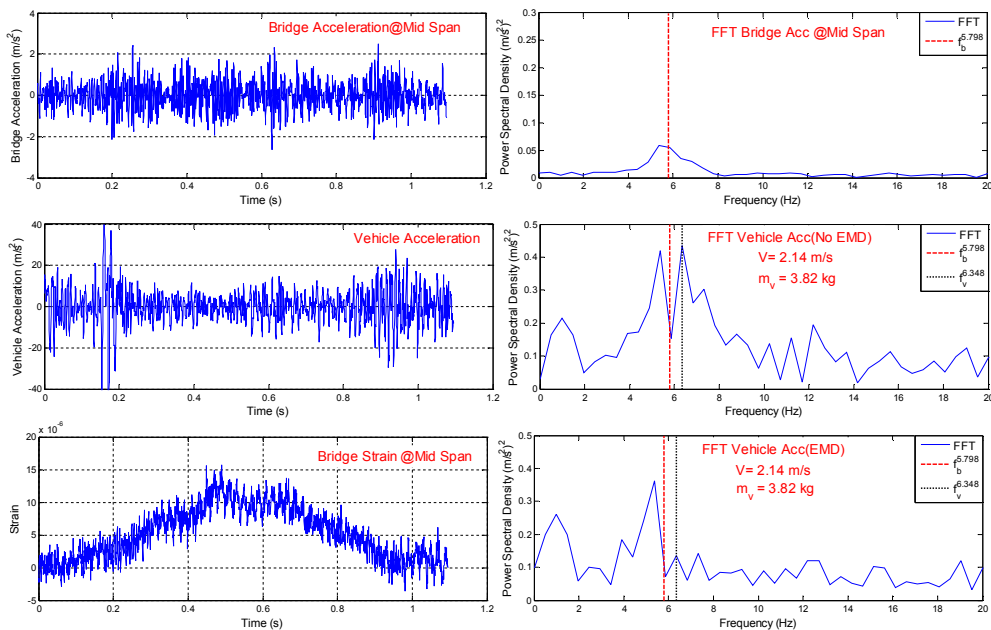
ภาพภาคผนวกที่ ข-9 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mHvH_c)



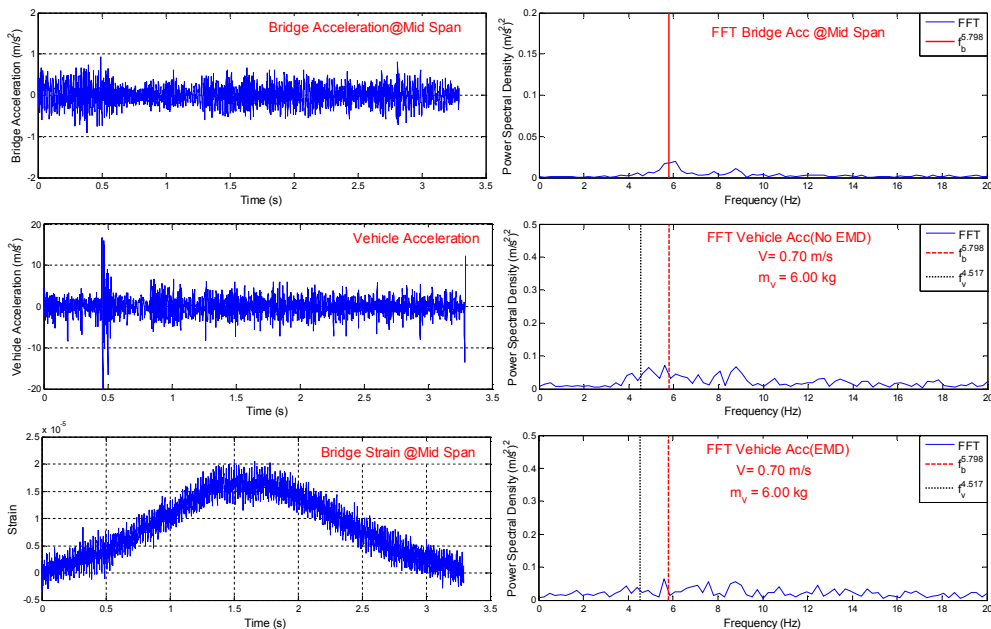
ภาพภาคผนวกที่ ข-10 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวด้านริมของสะพาน กรณีที่ (V_mLvL_s)



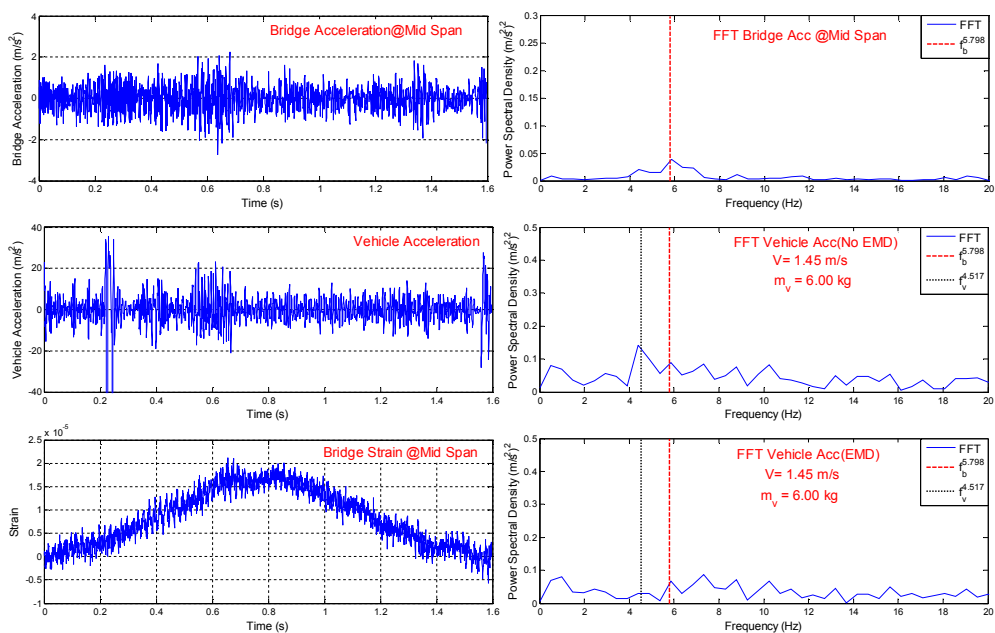
ภาพภาคผนวกที่ ข-11 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mLvM_s)



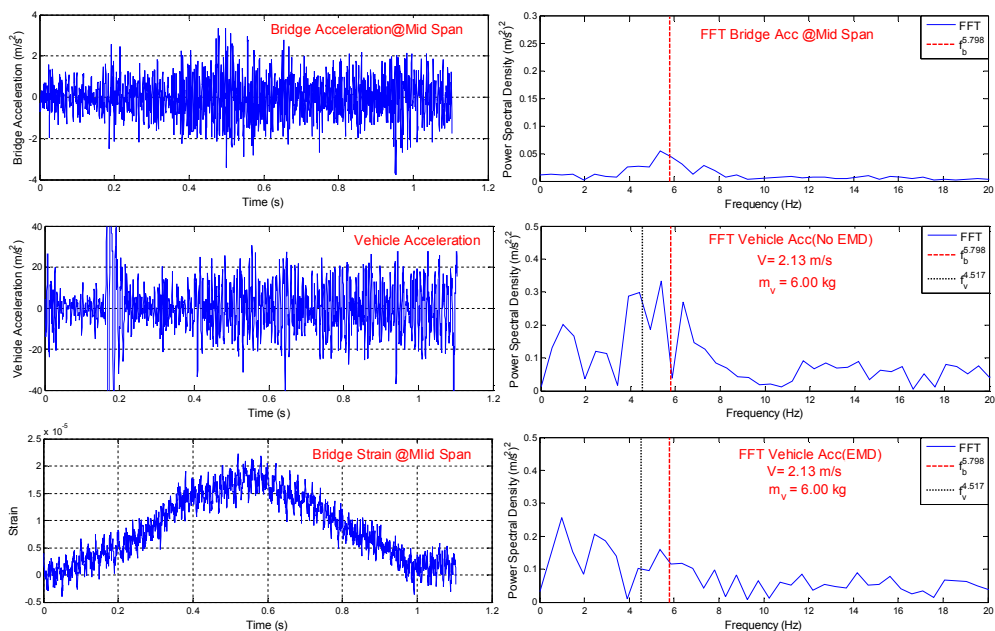
ภาพภาคผนวกที่ ข-12 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mL_vH_s)



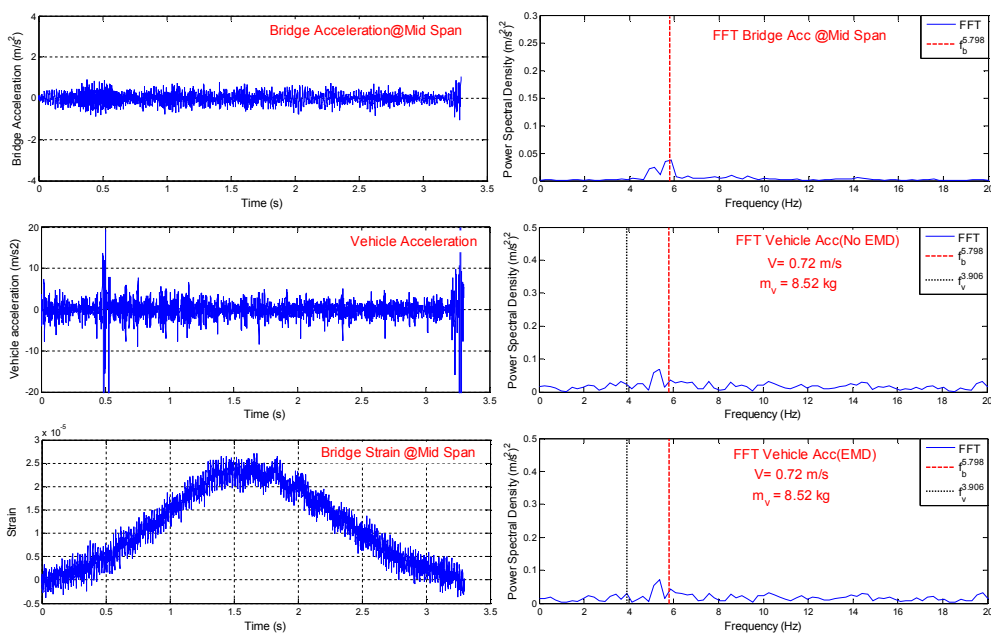
ภาพภาคผนวกที่ ข-13 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mM_vL_s)



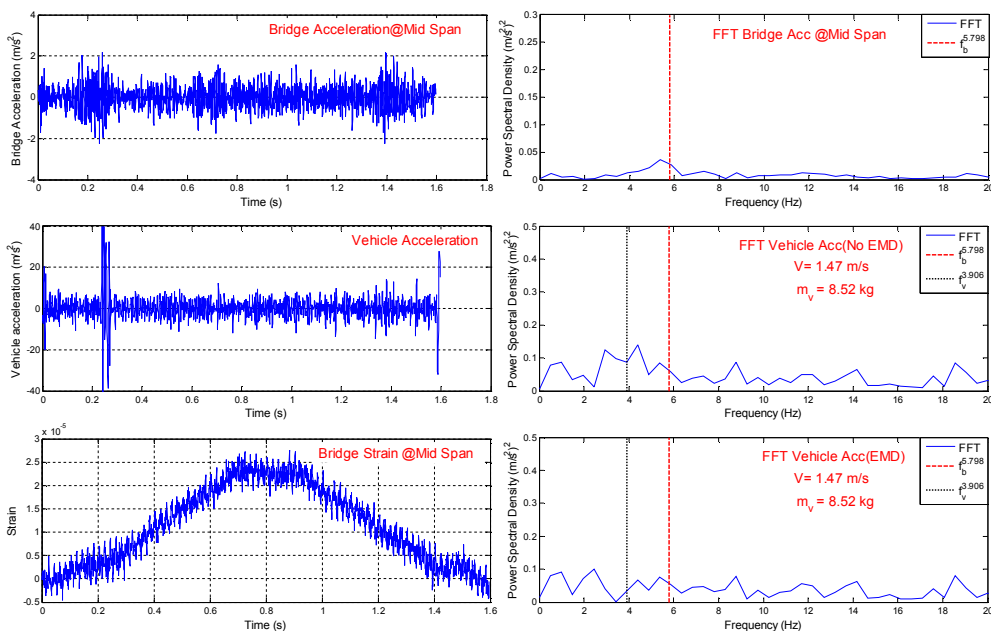
ภาพภาคผนวกที่ ข-14 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_{mMvM_s})



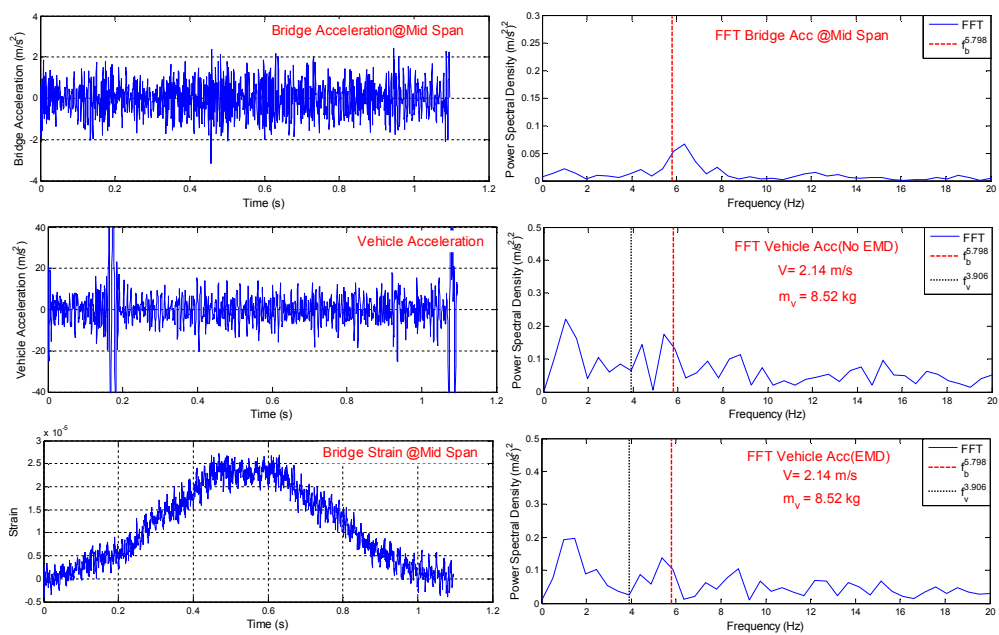
ภาพภาคผนวกที่ ข-15 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_{mMvH_s})



ภาพภาคผนวกที่ ข-16 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mHvL_s)



ภาพภาคผนวกที่ ข-17 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลัก
เคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mHvM_s)



ภาพภาคผนวกที่ ข-17 ผลการทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยยานพาหนะหลักเคลื่อนที่ในแนวกึ่งกลางของสะพาน กรณีที่ (V_mHvH_s)