

การสิ้นเสเทือนของรายนต์ที่จุดติดบนสะพาน



นาย ธนวรรณ ไสภณมหาผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VIBRATION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES

Mr. Tanawat Soponmahaphol



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

ธนวรรณ โสภณมหาผล : การสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพาน. (VIBRATION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 120 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถในการให้บริการของโครงสร้างสะพานเหล็กข้ามทางแยกในกรุงเทพมหานครในแง่ที่เกิดผลกระทบต่อผู้โดยสารภายในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ในกรณีที่การจราจรบนสะพานข้ามทางแยกในแต่ละทิศทางมีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก ทำให้ผู้โดยสารภายในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานเกิดความรู้สึกถึงการสั่นสะเทือนขึ้นทุกครั้งที่มียานพาหนะวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามของสะพาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากสะพานทั้งสองทิศทางวางตัวอยู่บนคานขวางเดียวกัน ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงพฤติกรรมและผลกระทบของการสั่นไหวของสะพานต่อยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพาน โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะที่จอดนิ่งบนคานซึ่งจุดรองรับทั้งสองด้านมีการเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง และอาศัยข้อมูลการเคลื่อนที่ของจุดรองรับสะพานที่ได้จากการทดสอบจริงในภาคสนามของสะพานเหล็กข้ามทางแยกแห่งหนึ่ง ภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็วต่างๆ และภายใต้การจราจรปกติ ทำให้สามารถวิเคราะห์หาการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานได้ การศึกษานี้พิจารณาผลของคุณสมบัติด้านน้ำหนัก และช่วงล่างของยานพาหนะ รวมทั้งตำแหน่งที่จอดติดบนสะพาน เพื่อให้ครอบคลุมรูปแบบต่างๆ ของรถยนต์

ผลการศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ โดยอาศัยสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็วต่างๆ พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระดับการสั่นสะเทือนที่รุนแรงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ และความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้าม โดยเฉพาะเมื่อรถยนต์มีค่าความถี่ช่วงล่างที่สูงจนมีค่าเข้าใกล้ความถี่ในโหมดการสั่นหลักของสะพาน ในขณะที่ค่าน้ำหนักของรถยนต์จะมีผลกระทบต่อค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์น้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลของความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกและค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ ผลการประเมินโดยมาตรฐาน ISO 2631 พบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ส่งผลกระทบต่อผู้โดยสารได้ถึงการสั่นสะเทือนในทุกกรณีและเกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายกับผู้โดยสารในบางกรณี

ในส่วนของการประเมินการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยอาศัยสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับสะพานที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติ พบว่าการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนภายในรถยนต์ที่มีระยะเวลายาวนานเกินกว่า 1 ชั่วโมง 36 นาที (1.60 ชม.) จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้โดยสาร นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ภายใต้การจราจรปกติสามารถรับรู้ได้ในทุกกรณีและเกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายในบางกรณี ซึ่งมีความสอดคล้องกับกรณีของการวิ่งผ่านโดยรถบรรทุก

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา.....2553.....

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก 

5170319221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : BRIDGE VIBRATION / VEHICLE VIBRATION / SUPPORT MOTION

TANAWAT SOPONMAHAPHOL : VIBRATION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. TOSPOL PINKAEW, D.Eng., 120 pp.

This research studies the serviceability of a steel fly-over bridge in Bangkok in case of different congestion in both traffic directions. The passengers in the stopped cars can feel the vibration induced by the passage of vehicles in opposite direction since the bridge decks of both traffic directions are placed on the same cross beam. The research focuses on the behavior and the effect of the bridge vibration on the stopped vehicles. The mathematical model of stopped vehicles on the bridge with vertical support motions is proposed. Based on the measured support motions from an actual bridge under the passages of a test truck driving with various speeds and under normal traffic condition, the vibration of the stopped vehicles on the bridge can be determined. To cover all types of passenger cars, the variations of their weights and suspension properties as well as the car position are considered.

The obtained results under the passages of the test truck indicate that the two main effects on the acceleration of stopped vehicles are the suspension frequency of the vehicle and the speed of truck. Especially, the suspension frequency when its value closes to the natural frequency of the bridge. The effect of vehicle weight seems to be comparatively smaller. The obtained results also reveal that the passengers can percept the vibration in all considered cases but they may feel not-comfort in only some cases according to ISO 2631. These results are similar to the cases under normal traffic condition. However, the induced vibration under normal traffic condition may affect the health of passengers if they are subjected to the vibration for longer than 1.6 hours.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

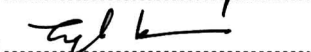
Department : ... CIVIL ENGINEERING

Student's Signature



Field of Study : ... CIVIL ENGINEERING

Advisor's Signature



Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ มารดา คุณอา พี่สาว พี่ชาย และครูบาอาจารย์ที่อบรม สั่งสอน ให้การอุปถัมภ์จนกระผมได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงานเติบโตใหญ่จนถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้วิชาพื้นฐานภาคทฤษฎีก่อนทำงานวิจัย หากปราศจากการให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด ทั้งการแนะนำวิธีการศึกษา และการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ โดยอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ หากปราศจากความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉมิไชย และความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้โดย รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี

ขอขอบพระคุณสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ในส่วนของการทดสอบสะพาน และให้ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้และทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและหน่วยงานบัณฑิตภาควิศวกรรมโยธา คุณ วรธนา ช้างเกิด ธุรการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ช่วยประสานงานด้านระเบียบการจบการศึกษา คุณ สุจรรยา จินดาวงศ์ บรรณารักษ์ห้องสมุดภาควิศวกรรมโยธา และหน่วยงานบรรณารักษ์ประจำห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการสืบค้นข้อมูลในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคณะทำงาน เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท และปริญญาเอก รหัสปีการศึกษา 51 สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกท่าน และขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตที่อยู่ในความดูแลของ รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณธีระชัย ดีสมสุข, คุณวิชญุตร์ อารยโกศล คุณกิตติ จิวโพธิ์เจริญ คุณपालพิพัฒน์ แสงชูวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ในการศึกษาตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณคุณณัฐคุณ กิตตินาคบัญญัติ ที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของการถ่ายภาพประกอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการให้ความช่วยเหลือในส่วนของการทดสอบย่อยต่างๆ ทำยที่สุดนี้ขอขอบคุณคุณศุทธิณี ธีระศักดิ์โสภณ ที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบความถูกต้องของคำสะกด และความช่วยเหลือต่างๆซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ทำยที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้สนใจศึกษา จุดประกายความคิดและเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกในแง่ความสะดวกสบายที่มีต่อ การสัมผัสเพื่อน ตามมาตรฐานสากล (ISO 2631-1)	2
1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบจากการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะ ที่วิ่งผ่าน	3
1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน	4
1.3 วัตถุประสงค์	7
1.4 ขอบเขตการวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	8
1.6 การดำเนินงานวิจัย	8
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1.1 แนวทางในการศึกษาปัญหาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบจำลองและการสร้าง สมการการกระจัดของปฏิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพานและรถยนต์ โดยสาร	11
2.1.2 การประยุกต์เพื่อสร้างแบบจำลองและสมการการกระจัดของปฏิริยาตอบสนองซึ่งกัน และกันระหว่างสะพาน รถยนต์โดยสารและมวลหน่วงปรับค่า	12
2.1.3 แบบจำลองรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน	18
2.2 การแก้สมการการเคลื่อนที่โดยการประมาณเชิงตัวเลขด้วยวิธีเสตทสเปซ	21
3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์	23
3.1 การหาค่าคุณสมบัติของสะพานจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์	23
3.2 การตรวจสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับ การวิเคราะห์ผลเฉลยทางคณิตศาสตร์	27

บทที่	หน้า
3.3 การตรวจสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขและผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีระบบของค่าความอิสระเดี่ยวติดอยู่ที่กลางช่วงของคาน	36
4 การประเมินผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนโดยมาตรฐาน ISO 2631-1	44
4.1 ขอบเขตของมาตรฐาน ISO 2631	44
4.2 ขั้นตอนและวิธีการประเมินค่าความเร่งจากการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO 2631	45
4.2.1 ความหมายทางคณิตศาสตร์และการสร้าง Frequency-weighting filters	46
4.3 การประเมินการสั่นสะเทือน (Vibration evaluation)	50
4.3.1 การประเมินโดยวิธีพื้นฐาน (Basic evaluation method)	50
4.3.2 การประเมินการสั่นสะเทือนในกรณีที่วิธีการประเมินพื้นฐานไม่เพียงพอ (Additional evaluation method)	51
4.4 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือน	52
4.4.1 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในกรณีที่ค่า Crest factor < 9	52
4.4.2 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในกรณีที่ค่า Crest factor > 9	54
4.5 การประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายและการรับรู้จากการสั่นสะเทือน	55
4.6 การผลกระทบต่อภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว	56
5 การทดสอบสะพานในภาคสนาม	58
5.1 ลักษณะทั่วไปของสะพานข้ามทางแยก	59
5.1.1 สะพานข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบ	59
5.2 ผลการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก	60
5.2.1 ผลการตรวจวัดสะพานจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก	63
5.2.1.1 การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้	63
5.3 การทดสอบสะพานจริงเมื่อสะพานอยู่ในสภาวะการใช้งานภายใต้การจราจรปกติ	67
5.3.1 การเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวของสะพานแบบระยะยาวภายใต้สภาพการจราจรปกติ	67
5.4 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริง	68
5.4.1 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก	68
5.4.2 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติ	72
6 การวิเคราะห์หาค่าการสั่นสะเทือนของรถยนต์	75
6.1 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์บนสะพาน	76
6.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์บนสะพาน	78

บทที่	หน้า
6.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวที่ฐานรองรับโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก	78
6.2.1.1 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 5 km/hr	82
6.2.1.2 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 30 km/hr	86
6.2.1.3 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 60 km/hr	87
6.2.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวที่ฐานรองรับภายใต้การจราจรปกติ	91
6.3 ผลการประเมินการรับรู้ได้จากการสั่นสะเทือน (Perception evaluation)	99
6.4 ผลการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ (Comfort evaluation)	101
6.5 ผลการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ (The effect of vibration on health)	103
6.5.1 การประยุกต์เพื่อคำนวณค่า Vibration Dose (VDV) ของสัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่รวมผลของเวลาและการเปลี่ยนตำแหน่ง	103
6.6 ผลการประเมินผลกระทบต่อภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว (Motion Sickness)	107
6.7 ผลกระทบต่อผู้โดยสารในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานข้ามทางแยกจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น	108
7 ความเป็นไปได้ในการลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ด้วยมวลหน่วงปรับค่า	109
7.1 มวลหน่วงปรับค่า	109
7.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า	110
7.3 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานภายหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า	111
8 อภิปรายและบทสรุปของงานวิจัย	114
รายการอ้างอิง	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	120

สารบัญญัตินำ

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงพจน์ต่างๆจากการสังเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ระหว่างสะพานและรถยนต์ โดยสมการที่ 2.9	16
ตารางที่ 2.2 แสดงพจน์ต่างๆจากการสังเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ระหว่างสะพาน รถยนต์ และมวลหน่วยปรับค่าและรถยนต์โดยสมการที่ 2.9	20
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติสะพานที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	24
ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากแบบจำลองแต่ละโปรแกรม และค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.1)	25
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสะพานที่คำนวณโดยการดำเนินการ ทางตัวเลขเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ ในกรณีความถี่ ของการสั่นไหวที่ฐานแตกต่างกัน	35
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองระหว่างสะพานและรถยนต์โดยสารที่คำนวณ โดยการดำเนินการทางตัวเลข เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ ในกรณีความถี่ของการสั่นไหวที่ฐานแตกต่างกัน	43
ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงความถี่ที่ใช้ประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นต่อร่างกาย ของมนุษย์	44
ตารางที่ 4.2 แสดงเกณฑ์ในการเลือกใช้ Frequency-weighting curves ในการกรองสัญญาณ ตามทิศทางและอิริยาบถภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือน	46
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักสำหรับการส่งผ่าน	47
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency weightings)	48
ตารางที่ 4.5 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการประเมินผลกระทบต่อความสะดวกสบายจากการสั่น สะเทือนโดย ISO 2631	56
ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติของสะพานที่ได้จากการทดสอบสะพานจริง	66
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบ โดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก	72
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติ	74
ตารางที่ 6.1 แสดงคุณสมบัติของคานสะพานและรถยนต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	76
ตารางที่ 6.2 แสดงคุณสมบัติของรถยนต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีต่างๆ	78

ตารางที่ 6.3	แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้การทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่ความเร็วต่างๆ	82
ตารางที่ 6.4	แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้สภาพการจราจรปกติ	93
ตารางที่ 6.5	แสดงการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบสะพานจริงระหว่างกรณีการทดสอบภายใต้การจราจรปกติและการทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr	96
ตารางที่ 6.6	แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนหลังการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้การทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก	100
ตารางที่ 6.7	แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนหลังการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้การจราจรปกติ	101
ตารางที่ 6.8	แสดงค่า Crest factor ของสัญญาณความเร่งรถยนต์ที่จอดติดในที่ 1, 2 และ 3 ภายใต้การจราจรปกติ	102
ตารางที่ 6.9	แสดงความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดอยู่ในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้การจราจรปกติ	102
ตารางที่ 7.1	ผลการวิเคราะห์ค่าความเร่งแบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ (Frequency weighted acceleration) ของแบบจำลองทางรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า	112

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดทางขวางของสะพานเหล็กข้ามทางแยกในกรุงเทพมหานคร.....	10
รูปที่ 2.2 แบบจำลองรถยนต์โดยสาร (ก) แบบจำลองในระนาบ Bicycle Car (ข) แบบจำลองเทียบเท่า.....	12
รูปที่ 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างสะพานและรถยนต์โดยสารภายใต้แรงกระทำที่เกิดจากการ สั่นไหวในแนวดิ่งที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพาน	13
รูปที่ 2.4 รูปแบบจำลองระหว่างสะพานที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าและรถยนต์โดยสาร.....	18
รูปที่ 3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์ของสะพาน	24
รูปที่ 3.2 รูปแบบการตัดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์ของสะพานในโหมดต่างๆ (ก) รูปแบบการตัดของสะพานในโหมดที่ 1 ($T = 0.279$ s, $f = 3.581$ Hz.) (ข) รูปแบบการตัด ของของสะพานในโหมดที่ 2 ($T = 0.0812$ s, $f = 12.31$ Hz.) (ค) รูปแบบการตัดของสะพาน ในโหมดที่ 3 ($T = 0.0325$ s, $f = 30.77$ Hz.).....	25
รูปที่ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำที่เกิดจากการสั่นไหวใน แนวดิ่งที่จุดรองรับทั้งสองข้าง	27
รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทาง คณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.1.1 (ค่า $\Omega = \omega_1$) (ก) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 1 (ข) ค่า พิกัดทั่วไปในโหมดที่ 2 (ค) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 3 (ง) ค่าการกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งกลางช่วง และที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง	29
รูปที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทาง คณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.1.2 (ค่า $\Omega = \omega_2$) (ก) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 1 (ข) ค่า พิกัดทั่วไปในโหมดที่ 2 (ค) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 3 (ง) ค่าการกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งกลางช่วง และที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง	31
รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทาง คณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.1.3 (ค่า $\Omega = \omega_3$) (ก) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 1 (ข) ค่า พิกัดทั่วไปในโหมดที่ 2 (ค) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 3 (ง) ค่าการกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งกลางช่วง และที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง	33
รูปที่ 3.7 คานช่วงเดียวที่มีระบบองศาความอิสระเดียวติดอยู่ที่กลางช่วงเกิดการสั่นไหวจากการเคลื่อนที่ใน แนวดิ่ง ณ จุดรองรับของคาน	36
รูปที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้ จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.2.1(ค่า $\Omega = 0.25\omega_1$) (ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร	40

รูปที่ 3.9	แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีนี้ที่ 3.2.1(ค่า $\Omega = \omega_1$)	
	(ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร	41
รูปที่ 3.10	แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีนี้ที่ 3.2.1(ค่า $\Omega = 4\omega_1$)	
	(ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร	42
รูปที่ 4.1	แสดงทิศทางและอิริยาบถภายใต้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐาน ISO	45
รูปที่ 4.2	เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency weighting curve)	50
รูปที่ 4.3	แผนภาพเกณฑ์ผลกระทบต่อสุขภาพและขอบเขตเฝ้าระวัง (Health guidance caution zones)	54
รูปที่ 4.4	แผนผังขั้นตอนในการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือน	55
รูปที่ 5.1	โครงสร้างสะพานเหล็กข้ามทางแยกแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร	59
รูปที่ 5.2	สภาพการจราจรบนสะพานข้ามทางแยกในกรุงเทพมหานครที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันมาก	59
รูปที่ 5.3	สะพานเหล็กข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบ	60
รูปที่ 5.4	ภาพสำนักงานชั่วคราวที่ใช้สำหรับการทดสอบสะพาน	60
รูปที่ 5.5	แสดงผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน	61
รูปที่ 5.6	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่สะพานทดสอบจริงในสนาม	61
รูปที่ 5.7	ภาพขยายการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ปลายคานขวาง	61
รูปที่ 5.8	แสดงขนาดและน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ	62
รูปที่ 5.9	ภาพแสดงการชั่งน้ำหนักบรรทุกทุกที่ด้านชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ	62
รูปที่ 5.10	แสดงผลการชั่งน้ำหนักของรถบรรทุกที่ด้านชั่งน้ำหนัก	62
รูปที่ 5.11	ภาพแสดงการวิ่งผ่านของรถบรรทุกทดสอบบนสะพาน	62
รูปที่ 5.12	ภาพแสดงเครื่องบันทึกข้อมูลที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ	62
รูปที่ 5.13	ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณความเครียด (ก) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr (ข) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr	64
รูปที่ 5.14	ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณการกระจัด (ก) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr (ข) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr	64
รูปที่ 5.15	ผลกระทบของความหน่วงต่อการสั่นไหวแบบอิสระ	65

	หน้า
รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบสัญญาณความเร่งในช่วงที่มีการสั่นไหวแบบอิสระ	66
รูปที่ 5.17 การจรวจบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกในช่วงเวลาเย็นที่จับภาพโดยกล้องวงจรปิด	68
รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งที่วัดได้ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองความถี่.....	69
รูปที่ 5.19 การวิเคราะห์ค่าความถี่ของตัวอย่างสัญญาณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (ก) ความถี่ของตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้ก่อนผ่านกระบวนการกรองความถี่ (ข) ความถี่ของตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้หลังผ่านกระบวนการกรองความถี่.....	69
รูปที่ 5.20 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 30 km/hr (ก) สัญญาณการกระจัด (ข) สัญญาณการกระจัดที่กลางช่วงของสะพาน (ค) สัญญาณความเร่ง (ง) สัญญาณความเครียดที่กลางช่วงของสะพาน.....	70
รูปที่ 5.21 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติ (ก) สัญญาณการกระจัด (ข) สัญญาณความเร่ง.....	73
รูปที่ 6.1 แบบจำลองสะพานและรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานทั้ง 5 คัน	77
รูปที่ 6.2 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับทั้งสองข้างของคานสะพานกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 km/hr (ก) การกระจัดที่จุดรองรับ (ข) ความเร่งที่จุดรองรับ	79
รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการกระจัดรวมของสะพาน ณ ตำแหน่งที่มีรถยนต์จอดอยู่จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz (ก) การกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งรถยนต์คันที่ 1 (ข) การกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งรถยนต์คันที่ 2 (ค) การกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งรถยนต์คันที่ 3.....	80
รูปที่ 6.4 ตัวอย่างความเร่งของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz (ก) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1 (ข) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 2 (ค) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 3.....	80
รูปที่ 6.5 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 1 และ 5 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 5 km/hr (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS) (ค) ค่าความถี่ธรรมชาติที่ปลายคานขวางของสะพานจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ (A1) (ง) ค่าความถี่ธรรมชาติที่ปลายคานขวางของสะพานจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ (A2).....	82
รูปที่ 6.6 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 2 และ 4 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 5 km/hr (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	84

รูปที่ 6.7	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 5 km/hr (ก) ค่าความเร่งและค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ค่าความถี่ของสะพานที่บริเวณกลางช่วงจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ค) แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดของรถยนต์คันที่ 1,2 และ 3 ตามลำดับ (ง) แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของรถยนต์คันที่ 1,2 และ 3.....	84
รูปที่ 6.8	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 1 และ 5 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	86
รูปที่ 6.9	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 2 และ 4 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	86
รูปที่ 6.10	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์คันที่ 3 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr.....	87
รูปที่ 6.11	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 1 และ 5 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)	87
รูปที่ 6.12	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 2 และ 4 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)	88
รูปที่ 6.13	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์คันที่ 3 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr.....	88
รูปที่ 6.14	แสดงตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 ในกรณีที่รถยนต์มีมวล 1400 kg.....	89
รูปที่ 6.15	แสดงตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและมวลของรถยนต์ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 ในกรณีที่รถยนต์มีความถี่ช่วงล่าง 2.0 Hz.....	90

รูปที่ 6.16	ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับทั้งสองข้างของคานสะพานภายใต้การจราจรปกติ (ก) การ การจัดที่จุดรองรับ (ข) ความเร่งที่จุดรองรับ.....	92
รูปที่ 6.17	ตัวอย่างความเร่งของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz (ก) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1 (ข) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 2 (ค) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 3.....	93
รูปที่ 6.18	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่ง ที่เกิดขึ้นรถยนต์คันที่ 1 และ 5 ภายใต้สภาพการจราจรปกติ (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	94
รูปที่ 6.19	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่ง ที่เกิดขึ้นรถยนต์คันที่ 2 และ 4 ภายใต้สภาพการจราจรปกติ (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	94
รูปที่ 6.20	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่ง ที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ภายใต้การจราจรปกติ (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS) (ค) ค่าความเร่งสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1,2 และ 3 (ง) ค่าความเร่งรากที่ สองของกำลังสองเฉลี่ยเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1,2 และ 3.....	95
รูปที่ 6.21	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่ง ที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ระหว่างกรณีการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ และการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	97
รูปที่ 6.22	แสดงสัญญาณความเร่งทั้งก่อนและหลังผ่านการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน ในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr (มวลรถยนต์ 1400 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz)....	99
รูปที่ 6.23	แสดงตัวอย่างสัญญาณความเร่งของรถยนต์สำหรับการคำนวณค่า r.m.s. และ Crest factor.....	102
รูปที่ 6.24	แสดงภาพตัดทแยงขวางของสะพานและตำแหน่งของรถยนต์ในแต่ละช่วงของสะพาน.....	104
รูปที่ 6.25	แผนภาพแสดงการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือนตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1.....	106
รูปที่ 7.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า....	110
รูปที่ 7.2	ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งของรถยนต์ระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน่วง ปรับค่าที่มีมวลเป็น 3 % ของมวลสะพาน ในกรณีที่รถยนต์มีมวล 1000 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz.....	111

รูปที่ 7.3 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่กลางช่วงสะพานเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับสะพาน (ก) ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์จากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า (ข) ประสิทธิภาพของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีต่อรถยนต์ (%)..... 113



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นจากการเปิดเผยของสำนักสิ่งแวดล้อม สังกัดกรุงเทพมหานครถึงข้อมูลจำนวนประชากรในกรุงเทพฯ มีไม่ต่ำกว่า 10 ล้านคน แบ่งเป็นประชากรที่จดทะเบียนเป็น คนกรุงเทพฯ อย่างเป็นทางการจำนวน 5.7 ล้านคน ที่เหลือเป็น ตัวเลขประชากรแฝง ทำให้เกิดปัญหาในการอาศัยอยู่ร่วมกันอย่างแออัด การเดินทางสัญจรของคนที่อาศัยอยู่ในเมืองหลวงซึ่งเป็นเมืองที่ใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของชาติถือเป็นปัญหาที่แก้ไขมาเป็นระยะเวลายาวนานและเป็นปัญหาสำคัญอันดับหนึ่ง จากผลการสำรวจความคิดเห็นประชากรเกี่ยวกับความต้องการแก้ปัญหาของกรุงเทพมหานคร ซึ่งจากสถิติที่มีอยู่คือมีการเดินทางวันละ 17 ล้านเที่ยว แบ่งเป็นเดินทางโดยรถส่วนบุคคล 50% เดินทางโดยขนส่งสาธารณะ 50% (รถโดยสารประจำทาง 35% เรือโดยสาร 6% รถไฟชานเมือง 5.5% รถไฟลอยฟ้า หรือ BTS 2.5% รถไฟฟ้าใต้ดิน หรือ MRT 1%) จากตัวเลขดังกล่าวพบว่าการจราจรทางบกถือเป็นการเดินทางหลัก ซึ่งเมื่อรวมตัวเลขการเดินทางโดยรถส่วนบุคคลและเดินทางโดยขนส่งสาธารณะเฉพาะในส่วนของรถโดยสารประจำทางจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีตัวเลขถึง 85% ซึ่งยังไม่รวมถึงรถโดยสารรับจ้างสาธารณะต่างๆ ถึงแม้ว่าโครงข่ายถนนจะมีอยู่กว่า 1,000 สาย แต่ก็ยังคงไม่เพียงพอกับการให้บริการ

สะพานข้ามทางแยกบริเวณทางแยกต่างๆที่กรุงเทพมหานคร จึงถูกก่อสร้างขึ้นเพื่อลดปริมาณความหนาแน่นทางการจราจรโดยเฉพาะบริเวณทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร โครงสร้างสะพานซึ่งเป็นโครงสร้างเหล็กซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างหลักที่อยู่เหนือพื้นดิน (Super structure) ได้แก่ เสาเหล็กกลมแบบเชื่อมประกอบ (Pier) คานเหล็กประกอบทางขวาง (Cross beam) คานเหล็กประกอบแบบ I-Girder พื้นสะพานคอนกรีตแบบสำเร็จรูป โดยคานเหล็กประกอบจะทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากพื้นสะพานลงสู่ปลายทั้งสองข้างของคานขวางในแต่ละด้านที่มีทิศทางการจราจรสวนทางกัน ทั้งนี้การก่อสร้างสะพานข้ามทางแยกมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อระบายการจราจรบนท้องถนนบริเวณทางแยก ดังนั้นเพื่อมิให้การจราจรเกิดการติดขัดขณะทำการก่อสร้างหรือมีผลกระทบกับการเดินทางสัญจร จึงต้องมีการก่อสร้างที่รวดเร็วจึงเป็นที่มาของการใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างสะพาน เพราะโครงสร้างเหล็กสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าวัสดุชนิดอื่นเช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือ แม้แต่โครงสร้างคอนกรีตอัดแรง แต่ทั้งนี้ข้อเสียของการใช้โครงสร้างเหล็กที่พบทั่วไปคือการแอนตัวและการสั่นไหวที่สูงกว่าโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นในการใช้งานสะพานเหล็กจึงอาจพบปัญหาเกี่ยวข้องกับการแอนตัวและการสั่นไหวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสะพานมีช่องทางเดินเท้า ก็มักก่อให้เกิดความรู้สึกรำคาญแก่ผู้สัญจรบนทางเดิน สำหรับสะพานเหล็กข้ามทางแยกที่ไม่มีช่องทางเดินนั้น แม้สะพานจะสั่นไหวคนโดยสารในยานพาหนะก็รับรู้ได้ยาก เพราะยานพาหนะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามในบางกรณีพบว่าความหนาแน่นทางการจราจรในสองทิศทางของสะพานข้ามทางแยกแตกต่างกันมาก เมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัวจะเกิดการสั่นไหวส่งผ่านไปยังฝั่งตรงข้ามที่มียานพาหนะจอดติดอยู่บนสะพาน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในห้องโดยสารจนรู้สึกได้อย่างรุนแรง

ปัญหาดังกล่าวเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมและผลกระทบของการสั่นไหวของสะพานตอานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพาน โดยทำการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะที่จอดนิ่งบนคานซึ่งฐานรองรับทั้งสองด้านมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งอาศัยข้อมูลการเคลื่อนที่ของสะพานที่ได้จากการทดสอบจริงในภาคสนามของสะพาน เหล็กข้ามทางแยกแห่งหนึ่งภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านสะพานของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 5, 30 และ 60 กม./ชม. ทำให้สามารถจำลองการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านให้กับยานพาหนะที่จอดนิ่งบนสะพานในลักษณะต่างๆได้ การศึกษานี้พิจารณาผลของจำนวนและตำแหน่งของยานพาหนะบนสะพาน รวมถึงคุณสมบัติด้านน้ำหนักและช่วงล่างของยานพาหนะ นอกจากนี้เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพที่แท้จริงในการให้บริการของสะพานข้ามทางแยกจึงได้มีการตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะบนสะพานอย่างต่อเนื่องระหว่างวันที่มีการให้บริการของสะพาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดียวกันกับที่กล่าวมาในข้างต้นพร้อมทั้งประเมินถึงผลกระทบต่อความรู้สึกจนทำให้เกิดความไม่สะดวกสบายจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของการจราจรตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ISO 2631-1 โดยจะพิจารณาเฉพาะในช่วงเวลาที่การจราจรในแต่ละทิศทางมีความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมากซึ่งทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นจนเป็นที่มาของงานวิจัยฉบับนี้

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกในแง่ความสะดวกสบายที่มีต่อการสั่นสะเทือน ตามมาตรฐานสากล (ISO 2631-1)

ISO 2631-1:1997 [6] เป็นมาตรฐานสากลที่สร้างขึ้นเพื่อกำหนดแนวทางในการประเมินถึงการสั่นสะเทือนที่มนุษย์สามารถรับรู้หรือรู้สึกได้ โดยใช้วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการประเมินถึงความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นไหวผ่านความเร่งที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการประเมินความเร่งที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนโดยแหล่งกำเนิดจะถูกนำมาประเมินควบคู่ไปกับปัจจัยที่มีผลต่อความรู้สึกซึ่งได้แก่ ทิศทางของการสั่น ตำแหน่ง(ส่วนต่างๆของร่างกาย)ของการสั่นสะเทือน ลักษณะของสัญญาณความเร่งที่นำมาประเมิน ช่วงเวลาของการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือน เป็นต้น ทั้งนี้ทิศทางที่แตกต่างจากการสั่นสะเทือนบนร่างกายของมนุษย์ที่สัมผัสกับแหล่งกำเนิดการสั่นให้ผลทางความรู้สึกไม่เหมือนกันเช่น การสั่นไหวที่แผ่นหลัง กับการสั่นไหวที่บริเวณที่นั่งจะมีค่าที่แตกต่างกันทางความรู้สึก ดังนั้นในมาตรฐานจึงกำหนดพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติ ที่เรียกว่าค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละแนวแกน (Frequency weighting) ขึ้นเพื่อใช้ปรับรอกค่าการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งต่างๆให้อยู่ในแต่ละทิศทางตามแนวแกนนั้นๆ และสามารถประเมินความรู้สึกที่มนุษย์รับรู้ได้ในแต่ละแนวแกนที่พิจารณา

M. J. GRIFFIN (2007) [7] ได้ทำการทบทวนการคำนวณผลตอบสนองทางความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นไหวตามมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน BS 6841: 1987 ซึ่งพบว่าแท้จริงแล้วมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 มีพื้นฐานการร่างมาจากมาตรฐาน BS 6841: 1987 โดยมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 มีความซับซ้อนสำหรับผู้ใช้นั้นมากกว่า แต่หากพิจารณาเพียงแค่ความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นไหวแล้วพบว่ามาตรฐานทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของมาตรฐานต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน ในเรื่องของการสร้างสมมติฐานขึ้นเหมือนกันคือ ขนาดของการสั่นที่ใช้ในแต่ละมาตรฐานถูกสมมติขึ้นว่ามีขนาดที่คงที่ตลอดซึ่งในความเป็นจริงอาจจะไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

Bonin G. และคณะ (2007) [8] ได้ทำการศึกษาผลการวิจัยถึงความรู้สึกสั่นไหวที่มนุษย์สามารถรู้สึกได้ และเกิดผลตอบสนองทางร่างกายภายในรถยนต์โดยสารที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นไหวตามส่วนต่างๆ โดยในการทดลองได้ใช้มาตรฐาน ISO 2631-1:1997 ซึ่งในการทดลองจะให้รถยนต์โดยสารดังกล่าวเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วคงที่ที่ระดับต่างๆ ภายใต้พื้นผิวจราจรในสภาพจริงที่มีความขรุขระของพื้นผิวถนน เพื่อสังเกตถึงการสั่นไหวผ่านข้อมูลที่ตรวจจับโดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในห้องโดยสารของรถโดยสารที่ใช้ในการทดสอบ และนำค่าที่ได้มาทำการป้อนเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองให้รถยนต์โดยสารเป็นแบบจำลองเต็มรูปที่มี 8 องศาอิสระ ผลการประเมินความเร่งจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความขรุขระและมีความเสียหายของผิวถนนโดยใช้มาตรฐาน ISO 2631 พบว่าความเร่งที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้เกิดความรู้สึกที่ไม่สะดวกสบายกับผู้ที่อยู่ภายในห้องโดยสารของรถยนต์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความรู้สึกไม่สะดวกสบายประกอบด้วยความขรุขระ ความเสียหายของพื้นผิวถนน รวมทั้งความเร็วในการขับขี่ของรถยนต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถยนต์ทำให้เกิดปฏิกริยาร่วมกันทางพลศาสตร์ระหว่างรถยนต์และพื้นผิวสัมผัส โดยอิทธิพลจากความเสียหายของพื้นผิวจราจรที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้คุณภาพในการขับขี่ลดลง ในขณะที่ความขรุขระของพื้นผิวจราจรเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดแรงกระทำทางพลศาสตร์ที่เพิ่มมากขึ้นระหว่างที่รถยนต์เคลื่อนที่และเหนี่ยวนำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นกับโครงสร้างรถยนต์และผู้โดยสารจนนำไปสู่ความรู้สึกไม่สะดวกสบาย

1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบจากการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะที่วิ่งผ่าน

Hassan Moghimi, Hamid R. Ronagh (2008) [9] ได้ทำการศึกษาถึงการสั่นไหวของสะพานที่มีผลกระทบต่อความรู้สึกได้ของคนที่อยู่บนสะพาน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Bonin G. และคณะ (2007) แต่มีความแตกต่างกันในส่วนของแหล่งกำเนิดการสั่นไหว โดยงานวิจัยนี้กล่าวถึงกรณีที่มีการสั่นไหวเกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสาร เมื่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์โดยสารทำให้สะพานมีการสั่นไหวส่งผลให้รถยนต์โดยสารเกิดการสั่นไหวตามกันไป โดยอ้างอิงถึงความถี่ในการสั่นไหวที่คนจะรู้สึกได้จากมาตรฐาน ISO ที่ระบุว่าความถี่ในช่วง 4 ถึง 8 Hz. เป็นความถี่ช่วงที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ถึงความรู้สึกสั่นไหวในแนวดิ่ง แบบจำลองทางพลศาสตร์ภายใต้แรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในการวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสะพานแบบคอมโพสิตกล่าวคือ มีคานหลักเป็นโครงสร้างเหล็กและพื้นสะพานเป็นคอนกรีต ความยาวช่วง 60.5 ม.ความ

กว้าง 13.5 ม. และใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิจัยระบุว่าความเร็วของพาหนะที่เคลื่อนที่บนสะพานเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดกับผลตอบสนองของสะพาน เช่น ความเร็วของพาหนะเพิ่มขึ้นความเร่งทางพลศาสตร์ของสะพานก็เพิ่มขึ้นตามกัน ส่วนความถี่ของการสั่นมีผลกระทบต่อสะพานน้อยมาก สำหรับในส่วนของน้ำหนักบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมสูงกว่า 10 % ของน้ำหนักสะพานควรจะมีการจำกัดความเร็วในการวิ่งผ่านสะพานอย่างเคร่งครัดเนื่องจากจะเป็นการกระตุ้นที่ตัวสะพานมากเกินไป ในงานวิจัยนี้ยังให้ความเห็นเกี่ยวกับช่องทางเดินข้างทาง (Sidewalk) ที่ปรากฏการสั่นไหวขึ้นในช่องทางเดินดังกล่าวเป็นอิทธิพลมาจากการเอียงศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะขณะวิ่งผ่านเป็นสาเหตุหลัก ทำให้สะพานเกิดการบิดตัวและส่งผลกระทบต่อผู้คนที่เดินอยู่บนไหล่ทางดังกล่าวรู้สึกถึงการสั่นไหวไปด้วย นอกจากนี้ยังให้คำแนะนำสำหรับการแอมตัวสูงสุดของสะพานที่ไม่เกินกว่า 6 มม. ต่อน้ำหนักกระทำแบบสถิต 100 กิโลนิวตัน ที่ตำแหน่งใด ๆ บนสะพานจะมีผลตอบสนองของสะพานที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน

1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน

Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) [10] ได้ศึกษาผลตอบสนองของแบบจำลองคานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาภายใต้แรงกระทำที่เคลื่อนที่ได้แบบจุดหลายแรงและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่กึ่งกลางคาน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการสั่นไหวของคานให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการของลากรางจ์ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง และใช้หลักการแปลงของลาปลาซในการหาผลตอบสนองทางพลศาสตร์ทั้งในส่วนของคานและมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่ อัตราส่วนของมวล อัตราส่วนความหน่วง อัตราส่วนการปรับค่า ซึ่งผลการศึกษาพบว่า สำหรับคานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระจายที่เคลื่อนที่ได้ใหม่ดพื้นฐานเป็นใหม่ดที่มีอิทธิพลมากที่สุด ดังนั้นการพิจารณาเพียงใหม่ดที่หนึ่งจึงเพียงพอกับการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังค้นพบว่าการใช้มวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดการสั่นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกแบบกระจายชนิดเคลื่อนที่ได้ (distribute moving force) สำหรับกรณีของแบบจำลองของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระจายที่เคลื่อนที่ได้ในงานวิจัยนี้ถูกพบว่า อัตราส่วนการกระจัดสูงสุด (The maximum displacement ratio) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างผลตอบสนองเชิงการกระจัดสูงสุดทางพลศาสตร์ที่บริเวณกลางช่วงของคาน (Maximum dynamic response) ต่อการกระจัดสูงสุดทางสถิต (Maximum static displacement) ที่บริเวณกลางช่วงของคานในกรณีที่อยู่ภายใต้แรงกระทำแบบจุด (Single point load) มีค่าต่ำกว่าสอง ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีที่น้ำหนักกระทำเคลื่อนที่แบบจุด ทั้งนี้ในกรณีแบบจำลองของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระจายที่เคลื่อนที่ได้ไม่พบการสั่นพ้องจึงทำให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าสำหรับกรณีนี้มีข้อจำกัดอยู่ในวงแคบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถระบุประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าได้เฉพาะในกรณีนี้

Kwon, H.-C./Kim, M.-C./Lee, I.-W. (1998) [11] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของสะพานที่มีช่วงความยาว 3 ช่วงและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบจุดเดียวที่บริเวณกลางช่วงของสะพานเช่นเดียวกันกับแบบจำลองของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) แต่อยู่ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ที่ต่างกัน โดยใช้รถไฟความเร็วสูง TGV

เป็นกรณีศึกษา การศึกษาแบบจำลองทั้งของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) และ Kwon, H.-C./Ki, M.-C./Lee, I.-W. (1998) ได้ให้ความสนใจกับผลตอบสนองบริเวณกลางช่วงซึ่งมีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่บริเวณดังกล่าวเหมือนกัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การออกแบบมวลหน่วงปรับค่ามีค่าที่แนะนำในการออกแบบคืออัตราส่วนมวลควรมีค่าอยู่ในช่วง 1% ถึง 4% และหากมีการเพิ่มอัตราส่วนมวลจะเป็นการเพิ่มความเฉื่อยให้กับระบบมวลหน่วงปรับค่าซึ่งทำให้สามารถควบคุมการสั่นไหวที่สูงขึ้นได้ แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราส่วนมวลก็เป็นการเพิ่มการแอ่นตัวทางสถิต ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงควบคู่ไปพร้อมกัน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าระบบมวลหน่วงปรับค่ามีผลกับการสั่นไหวแบบอิสระมากกว่าการสั่นไหวแบบชั่วคราวที่เกิดจากแรงกระทำ โดยความถี่ธรรมชาติที่หนึ่งของสะพานจะเป็นตัวปรับความถี่ของระบบมวลหน่วงปรับค่าให้เริ่มทำงาน โดยผลการทดลองพบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดผลตอบสนองของสะพานลงได้จากเดิมในระบบที่ไม่มีติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าในแบบจำลองจะเกิด ระยะเวลาจัดสูงสุดที่กลางช่วง 0.896 มม. แต่เมื่อมีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าในแบบจำลองแล้วพบว่าระยะเวลาจัดสูงสุดที่กลางช่วงเหลือเพียง 0.7 มม.คิดเป็นการลดลงร้อยละ 21% อีกทั้งระบบที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ายังทำให้สภาวะที่เป็นการสั่นแบบอิสระซึ่งเกิดขึ้นหลังจากสภาวะที่มีการสั่นแบบชั่วคราวให้กลับสู่สภาวะเดิมได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบอีกด้วยว่าหากต้องการให้การควบคุมการสั่นไหวมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นควรจะมีการเพิ่มเงื่อนไขค่าเริ่มต้นให้กับระบบมวลหน่วงปรับค่า

Medina Andrés, Violeta (2006) [15] ได้ใช้แบบจำลองในการศึกษาแบบเดียวกับ Kwon, H.C. / Kim, M.C. / Lee, I.W. (1998) ซึ่งผลการศึกษาเป็นไปตามที่ Kwon, H.C. และคณะได้สรุปไว้แต่ถูกขยายผลการศึกษาโดยการประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับแบบหลายชุด (MTMD) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายชุดจะสามารถควบคุมผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานและรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงเฉพาะในกรณีที่ทั้งสะพานและรถไฟอยู่ภายใต้อิทธิพลของการสั่นพ้องในช่วงค่าความเร็วของรถไฟที่ใช้ในการออกแบบ(The design train speed) เท่านั้น นอกจากนี้ในงานวิจัยยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยว (Single TMD) เนื่องจากความถี่ที่ปรับคลาดเคลื่อนจากความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของสะพาน อย่างไรก็ตามสำหรับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายชุด (MTMD) ที่กำหนดให้มวลในแต่ละชุดมีค่าที่เท่าๆกันแม้ว่าจะมีการปรับช่วงความถี่ที่คลาดเคลื่อนจากความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของสะพานอยู่บ้างแต่จะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่ามากนัก อีกทั้งระบบ MTMD ยังมีความน่าเชื่อถือและทนทานในแง่ประสิทธิภาพมากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยว

Xiaomin Shi and C.S. Cai (2008) [12] ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้มวลหน่วงปรับค่ากับสะพานช่วงเดียวที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าระบบเดียว เพื่อลดผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) และ Kwon, H.-C./Ki, M.-C./Lee, I.-W. (1998) แต่มีรูปแบบกรณีศึกษาที่หลากหลายกว่า โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีที่หนึ่งการเคลื่อนที่ไปด้วยกันแต่คนละช่องการจราจร กรณีที่สองรถบรรทุกเคลื่อนที่ตามกันแบบต่อเนื่อง ผลการศึกษาและข้อแนะนำได้แสดงให้เห็นว่า การใช้มวลหน่วงปรับค่าสามารถลดผลตอบสนองของสะพานและ

การสั่นพ้องเนื่องจากความหน่วงที่อยู่ในมวลห้วงปรับค่าสามารถทำหน้าที่ลดการสั่นไหวในกรณีที่เกิดการสั่นพ้อง แต่ความหน่วงในมวลห้วงปรับค่ามีความสามารถในการลดผลตอบสนองในส่วนที่เกิดแบบชั่วคราว (Transient response) ได้น้อยกว่าในส่วนที่เกิดจากการสั่นแบบอิสระ (Free vibration) เพราะในความเป็นจริง ในขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านเกิดแรงกระทำที่สูงและเป็นช่วงระยะเวลาที่สั้นทำให้มวลห้วงปรับค่าที่ติดตั้งแสดงผลตอบสนองไม่ทันกับแรงกระทำแต่ผลตอบสนองของมวลห้วงปรับค่าจะเกิดขึ้นในภายหลังซึ่งเป็นสถานะที่โครงสร้างปรับตัวเข้าสู่การสั่นไหวแบบอิสระ ดังนั้นมวลห้วงปรับค่าจึงมีผลกับสถานะการสั่นไหวแบบอิสระมากกว่า อีกทั้งการสั่นแบบอิสระมีรูปแบบโหมดการสั่นไหวในจำนวนโหมดที่มากกว่าการสั่นที่เกิดจากแรงกระทำชั่วคราวเนื่องจากการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างเกิดขึ้นตามโหมดของความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้นๆ ในแต่ละโหมดรวมกัน ในขณะที่การสั่นไหวที่เกิดจากแรงกระทำชั่วคราวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมากอาจเกิดความเด่นชัดจากความถี่ของแรงกระทำมากกว่าความถี่ธรรมชาติในโหมดหลักของโครงสร้าง ดังนั้นมวลห้วงปรับค่าจึงมีคุณสมบัติในแง่การใช้งานที่ดีต่อการควบคุมการสั่นแบบอิสระ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของมวลห้วงปรับค่ายังขึ้นกับความเหมาะสมของความยาวช่วงสะพาน โดยการใช้มวลห้วงปรับค่ากับสะพานที่มีความยาวช่วงสั้นจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสะพานที่มีความยาวช่วงที่ยาวกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากความถี่ธรรมชาติของสะพานช่วงสั้นที่สูงกว่าสะพานช่วงยาวเนื่องจากสะพานสั้นมีค่าความแข็ง (stiffness) สูงกว่า

Fan Yang, Ramin Sedaghati, Ebrahim Esmailzadeh (2009) [13] ได้ศึกษาแบบจำลองของคานช่วงเดี่ยวที่มีการติดตั้งมวลห้วงปรับค่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานแบบคาบและแบบสุ่ม ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) และ Kwon, H.-C./Ki, M.-C./Lee, I.-W. (1998) แต่ใช้วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเหมาะสมสูงสุดของการออกแบบมวลห้วงปรับค่าที่สามารถขจัดปัญหาการสั่นของโครงสร้างคานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจำนวนแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองมีทั้งสิ้น 7 ชุดแบบจำลอง แต่ละแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (4 จุด) ผลการศึกษาพบว่าค่าความเหมาะสมสูงสุดจะให้ค่าผลตอบสนองเชิงกระจัดค่าๆหนึ่งที่เหมาะสมแต่หากมีการเบี่ยงค่าจากค่าดังกล่าวในทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะมีผลอย่างมากในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความถี่ไปทำให้ทราบว่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความไวอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองของคาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวผ่านมา ส่วนการเบี่ยงเบนค่าอัตราส่วนความถี่มีอิทธิพลกับค่าผลตอบสนองเชิงกระจัดน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการเบี่ยงเบนไปของอัตราส่วนความถี่ โดยการเบี่ยงเบนค่าอัตราส่วนความถี่จากค่าที่เหมาะสมสูงสุดที่คำนวณได้ไปในทิศทางที่น้อยลงจะให้ผลตอบสนองเชิงกระจัดที่น้อยกว่าการเบี่ยงเบนในทิศทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงว่าค่าเบี่ยงเบนของอัตราส่วนความถี่ในทิศทางลดลงจะให้ผลที่ดีกว่า

Farhad S.Samani, และ Francesco Pellicano (2009) [14] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของคานช่วงเดี่ยวที่ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าระบบเดี่ยวภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบจุดที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) แต่งานวิจัยมุ่งเน้นถึงความแตกต่างระหว่างมวลห้วงปรับค่าแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น โดยใช้คานช่วงเดี่ยวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาภายใต้น้ำหนัก

บรรทุกเคลื่อนที่เป็นแบบจำลองทางโครงสร้างที่ใช้ศึกษาควบคู่กับพฤติกรรมมวลหน่วงปรับค่า และเพื่อเป็นการควบคุมการแอ่นตัวทางสถิต (Static deflection) ระบบมวลหน่วงปรับค่าจะต้องมีมวลน้อยๆ ซึ่งในการวิจัยนี้กำหนดให้มวลมีค่าไม่เกินกว่า 5 % ของมวลรวมทั้งหมดของคาน การวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการหาค่าความเหมาะสมสูงสุด (Optimum response) ของมวลหน่วงปรับค่าที่สามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาได้ให้ความสนใจการสั่นไหวแบบชั่วคราว (Transient vibration) ซึ่งพบว่ามวลหน่วงปรับค่ามีผลกับการลดระดับสูงสุดของลูกคลื่นการสั่น (Amplitude of Vibration) ทางโครงสร้างได้ โดยสาระสำคัญอยู่ที่มวลหน่วงปรับค่าแบบไม่เชิงเส้น (ชนิดลูกบาศก์ ; Cubic) มีความเหมาะสมกว่ากับการลดระดับสูงสุดของลูกคลื่นการสั่น แต่ในส่วนของมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นจะมีประโยชน์กว่ากับกรณีที่ต้องการลดพลังงานการสั่นออกจากโครงสร้าง ซึ่งกรณีทั้งสองมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ในการศึกษายังระบุถึงตำแหน่งที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองแบบ โดยมวลหน่วงปรับค่าแบบไม่เชิงเส้นจะมีระยะติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.53 ของความยาวช่วงคานจากจุดรองรับทางฝั่งซ้าย ส่วนมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นจะมีระยะติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.55 ของความยาวช่วงคานจากจุดรองรับทางฝั่งซ้าย ซึ่งทั้งสองตำแหน่งล้วนอยู่ใกล้กับตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวทางสถิตสูงสุด (กลางช่วง) ทั้งนี้สำหรับปัญหาเฉพาะของโครงสร้างคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ ยังไม่สามารถระบุได้ถึงข้อได้เปรียบที่แท้จริงของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบไม่เชิงเส้น (ฟังก์ชันการประมาณเป็นแบบลูกบาศก์) ที่เหนือกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นที่ใช้สืบทอดกันมาในงานวิจัยก่อนหน้า เนื่องจากผลการศึกษาพบว่าผลการลดการสั่นไหวของทั้งสองระบบใกล้เคียงกันเมื่อใช้กับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ (คานช่วงเดียวมีจุดรองรับแบบธรรมดา)

จากงานวิจัยที่ศึกษาทั้งหมดในข้างต้น พบว่าการศึกษาส่วนใหญ่จะศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของสะพานหรือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารอาจจะมีความรุนแรงมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานจะเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงจนสามารถรับรู้ได้และอาจจะรุนแรงขึ้นจนทำให้เกิดความรู้สึกที่ไม่สะดวกสบายได้เมื่อต้องเผชิญกับการสั่นสะเทือนแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาาน นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สอดคล้องกับปัญหาการสั่นสะเทือนของยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพานที่เกิดการสั่นไหวบริเวณจุดรองรับทั้งสองข้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะ ตลอดจนถึงการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะได้ เพื่อให้สามารถรับมือกับปัญหาและนำประโยชน์จากผลการวิจัยนี้ไปใช้ในการศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขต่อไปในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์

ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1.3.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานโดยการทดสอบในภาคสนาม
- 1.3.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปัญหา
- 1.3.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมจากผลตอบสนองของรถยนต์โดยสารที่จอดนิ่งอยู่บนสะพานเนื่องจากการสั่นไหวของจุดรองรับ

- 1.3.4 เพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการสั่นไหวของจุดรองรับ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาและทำการวิจัยประกอบไปด้วย

- 1.4.1 การวิเคราะห์จะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานที่มีลักษณะเป็นคานช่วงเดียวในระนาบสองมิติที่มีการกระจายของมวลและความแข็งอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาว (Uniform mass and stiffness) โดยที่จุดรองรับเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง
- 1.4.2 พิจารณาโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรม ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกเป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)
- 1.4.3 พิจารณาแบบจำลองเฉพาะรถยนต์โดยสารในรูปแบบของระบบองศาอิสระเดียว (Single Degree Of Freedom)
- 1.4.4 การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2631-1:1997
- 1.4.5 การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าประโยชน์ที่ได้รับดังต่อไปนี้

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานที่ได้จากการทดลองภาคสนาม
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมและผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพาน
- 1.5.3 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาแนวทางการแก้ไขเพื่อเพิ่มความสามารถในการให้บริการของสะพานข้ามทางแยกได้สำหรับสะพานที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน
- 1.5.4 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประโยชน์ด้านการวิเคราะห์เพื่อออกแบบสะพานโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้ใช้บริการสะพานควบคู่กันไปในอนาคต

1.6 การดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยตามลำดับดังต่อไปนี้

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและความเป็นไปได้ของหัวข้อวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งการวิจัยที่ผ่านมา
- 1.6.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
- 1.6.3 จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 1.6.4 ทำการทดสอบสะพานจริงในภาคสนาม
- 1.6.5 ศึกษาและเก็บรวบรวมคุณสมบัติของรถยนต์โดยสารจากแหล่งข้อมูลต่างๆ

- 1.6.6 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสัญญาณที่วัดได้กับสะพานทั้งในส่วนของการทดสอบโดยการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกและสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในระหว่างวันที่สะพานมีการเปิดให้บริการ
- 1.6.7 ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน
- 1.6.8 ประเมินความรุนแรงและผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารจากแบบจำลอง
- 1.6.9 เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหา และสรุปผลการศึกษา
- 1.6.10 จัดทำวิทยานิพนธ์



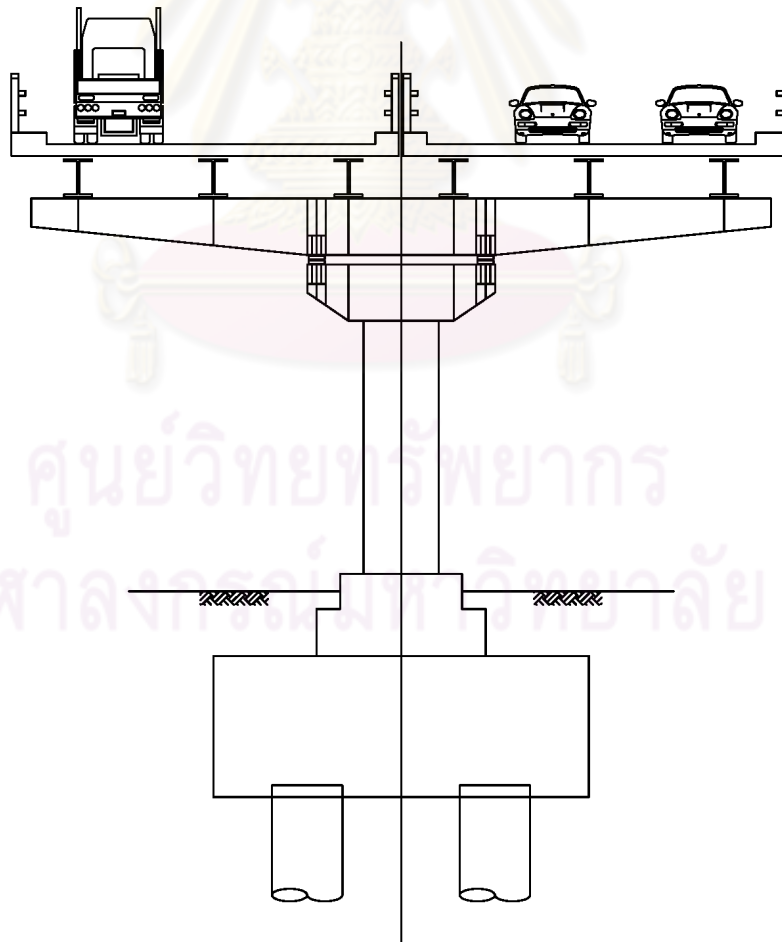
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเกี่ยวข้อง

2.1 แนวทางในการศึกษาปัญหาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สะพานข้ามทางแยกและทางยกระดับซึ่งเป็นโครงสร้างหลักนิยมใช้โครงสร้างเสาเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งผู้ใช้บริการสะพานมักประสบปัญหาความรู้สึกได้ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่ในฝั่งที่มีการจราจรหนาแน่นส่งผลไปยังผู้โดยสารที่อยู่ภายในห้องโดยสารซึ่งสามารถรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนดังกล่าวทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัวในกรณีที่มีความหนาแน่นทางการจราจรในสองทิศทางของสะพานข้ามทางแยกแตกต่างกันมากและมักพบเห็นได้อย่างบ่อยครั้ง โดยสาเหตุเกิดขึ้นจากการสั่นไหวจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในทิศทางที่มีการจราจรคล่องตัวส่งผ่านไปยังฝั่งตรงข้ามที่มียานพาหนะจอดติดอยู่บนสะพาน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในห้องโดยสารจนรู้สึกได้อย่างรุนแรง



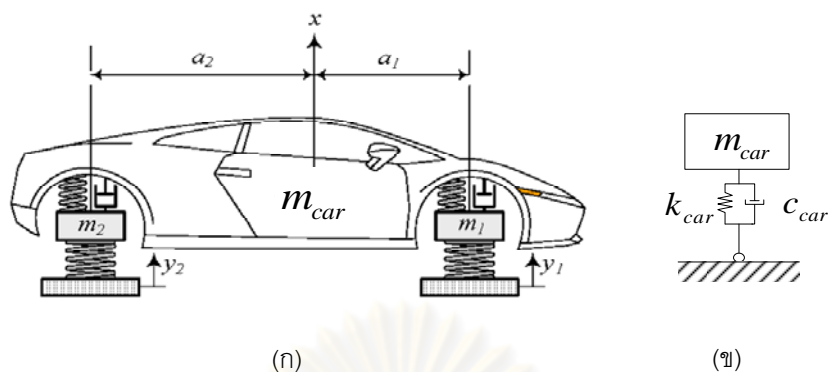
รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดขวางของสะพานหลักข้ามทางแยกในกรุงเทพมหานคร

การศึกษาปัญหาโดยการทดสอบในสถานการณ์จริงที่เกิดขึ้นทำได้ยากลำบากและอาจส่งผลกระทบต่อสภาพการจราจรรวมถึงเป็นอุปสรรคในการให้บริการแก่ผู้ที่ใช้สะพานข้ามทางแยกเนื่องจากสะพานข้ามทางแยกที่กรุงเทพมหานครที่เปิดให้บริการอยู่ในปัจจุบันมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการโดยสารผ่านของยานพาหนะทั้งในส่วนของรถยนต์โดยสารส่วนบุคคลและรถยนต์โดยสารสาธารณะเพื่อบรรเทาความหนาแน่นทางการจราจรบริเวณแยกต่างๆได้เป็นอย่างดี ด้วยประโยชน์ดังกล่าวทำให้มีอัตราการใช้บริการสะพานข้ามทางแยกที่สูงมากในแต่ละวัน การศึกษาปัญหาทางที่กล่าวมาข้างต้นโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงปัญหาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างยิ่งเนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้บริการของสะพาน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถจำลองสถานการณ์ให้ใกล้เคียงความเป็นจริงได้อีกทั้งยังสามารถจำลองสถานการณ์ได้หลากหลายกว่าการทดสอบในสถานการณ์จริง และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการศึกษาวิจัยได้เป็นอย่างมาก

การสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาถึงคุณสมบัติทางรูปลักษณะภายนอกของสะพานซึ่งพบว่าโครงสร้างสะพานข้ามทางแยกโดยทั่วไปที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกัน โดยโครงสร้างหลักของสะพานในแต่ละทิศทางการจราจรจะวางตัวอยู่บนปลายคานขวางเดียวกัน เมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคั่งตัวจึงเกิดการสั่นไหวของคานขวางในฝั่งนั้นส่งผ่านไปยังฝั่งตรงข้ามที่มียานพาหนะจอดติดอยู่บนสะพานจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในห้องโดยสารจนรู้สึกได้อย่างรุนแรง จากการวิเคราะห์ถึงสาเหตุและที่มาของปัญหาจึงนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องได้ดังรายละเอียดที่จะทำการกล่าวไว้ในบทนี้

2.1.1 แบบจำลองรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน

ในส่วนของแบบจำลองรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานนั้นจะพิจารณาให้อยู่ในระนาบเช่นเดียวกันกับสะพาน แต่จะพิจารณาให้มีเพียงองศาอิสระเดียว (Single Degree Of Freedom; SDOF) ที่ประกอบไปด้วยมวลของรถยนต์ ความแข็งของช่วงล่างรถยนต์ และความหน่วง โดยมีการสั่นไหวได้เฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น ในความเป็นจริงนั้นแบบจำลองของรถยนต์โดยสารจากงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบยานยนต์จะมีการพิจารณาเป็นระบบองศาอิสระทั้งสิ้น 2 องศาอิสระ (2-DOF) ดังรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นมวลแขวน (Sprung mass) หมายถึงมวลของรถยนต์ในส่วนที่เหนืออย่างล้อขึ้นไปและในส่วนมวลที่ไม่ถูกแขวน (Unsprung mass) ซึ่งหมายถึงมวลในส่วนที่เป็นยางล้อ โดยในส่วนของมวลที่ไม่ถูกแขวนจะมีค่าความแข็งสูงมากเมื่อเทียบความแข็งของช่วงล่างรถยนต์ (ในส่วนของยางรถยนต์จะต้องมีคุณสมบัติในการต้านการเสียวรูปได้เป็นอย่างดี) อีกทั้งในส่วนของมวลที่ยังมีค่าที่ต่ำกว่ามวลที่ถูกแขวนอย่างมาก ทำให้ความถี่ของช่วงล่างรถยนต์มีความแตกต่างอย่างมากเมื่อเทียบกับความถี่ของยางล้อรถยนต์ ดังนั้นจึงไม่พิจารณาในส่วนของมวลที่ไม่ถูกแขวนเนื่องจากมีความถี่สูงมากกว่าความถี่ในช่วงที่เราพิจารณา ทำให้แบบจำลองรถยนต์โดยสารที่ใช้ถูกพิจารณาให้มีเพียงองศาอิสระเดียวดังแสดงในรูป 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 แบบจำลองรถยนต์โดยสาร (ก) แบบจำลองในระนาบ Bicycle Car
(ข) แบบจำลองเทียบเท่า

จากรูปที่ 2.2 (ก) ได้แสดงแบบจำลองของรถยนต์โดยสารในระนาบ หรือ Bicycle Car [2] ซึ่งเป็นแบบจำลองรถยนต์ที่พิจารณาคุณสมบัติเชิงมวลครั้งหนึ่งของมวลทั้งหมด และพิจารณาคคุณสมบัติช่วงล่างทั้งในส่วนหน้าและหลังที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาองศาอิสระในส่วนของยางล้อรถยนต์ด้วย แต่เนื่องจากจำนวนองศาอิสระที่มากของแบบจำลองรถยนต์ทำให้เกิดความซับซ้อนอย่างมากในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างสะพานและรถยนต์ อีกทั้งองศาความอิสระบางส่วนอาจอยู่นอกเหนือปัญหาที่ได้ทำการศึกษาอยู่นี้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการวิเคราะห์ปัญหาจึงได้ทำการลดจำนวนองศาอิสระของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ลงให้เหลือเพียงองศาอิสระเดียวดังรูปที่ 2.2 (ข) ที่พิจารณามวลของรถยนต์เท่ากับแบบจำลอง Bicycle Car แต่ไม่พิจารณาองศาอิสระของยางล้อรถยนต์เนื่องจากมีค่าความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่สอดคล้องกับปัญหามาก รวมถึงการพิจารณาโหมดการสั่นสะเทือนเฉพาะในแนวตั้งเพียงโหมดเดียวตามความถี่ทั่วไปของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแนวตั้งของรถยนต์เป็นตัวแทนของความถี่ช่วงล่างรถยนต์ในแบบจำลองสำหรับการพิจารณาในการศึกษา

2.1.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของปฏิกริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพานและรถยนต์โดยสาร

เมื่อจุดรองรับของสะพานเกิดการสั่นไหว จะทำให้สะพานเกิดการสั่นสะเทือนส่งผลให้และรถยนต์โดยสารที่จอดอยู่บนสะพานมีการสั่นสะเทือนไปด้วยกัน อันเกิดจากปฏิกริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพานกับรถยนต์โดยสาร โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาคานหลักตัวริมสุดของสะพานที่อยู่บริเวณปลายของคานขวางเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาให้แบบจำลองมีลักษณะเป็นคานช่วงเดียวและมีระบบองศาอิสระเดียว (Single Degree Of Freedom; SDOF) ติดอยู่บนคานเพื่อใช้เป็นตัวแทนของแบบจำลองรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานดังรูปที่ 2.3

เมื่อพิจารณาการสั่นไหวของจตุรกรรรับ จากรูป 2.2 จะได้

$$u_s(x,t) = q_{sL}(t) \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) + q_{sR}(t) \cdot \left(\frac{x}{L}\right) = \Psi(x) \mathbf{q}_s(t) \quad (2.3)$$

โดยที่

$$\Psi = \left\{ 1 - \frac{x}{L} \quad \frac{x}{L} \right\} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{q}_s = \begin{Bmatrix} q_{sL}(t) \\ q_{sR}(t) \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

นอกจากนี้ได้สมมติให้การเคลื่อนที่ของรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งอธิบายโดยตัวแปร $\mathbf{u}_c(t)$

$$\mathbf{u}_c(t) = \begin{Bmatrix} u_{c1}(t) \\ u_{c2}(t) \\ \vdots \\ u_{cm}(t) \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

เมื่อ m คือจำนวนรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพาน

การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งระบบโดยการใช้สมการการเคลื่อนที่เชิงพลังงานของลากรางจ์ (Lagrange's equation) ซึ่งพลังงานและงานเนื่องจากแรงไม่อนุรักษ์ (nonconservative force) จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดทั่วไป (generalized coordinate) และอนุพันธ์ของตัวแปรเทียบกับเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} = Q_j \quad (2.7)$$

โดยที่

T	คือ	พลังงานจลน์ทั้งหมดของระบบ
V	คือ	พลังงานศักย์ทั้งหมดของระบบ
q_j	คือ	พิกัดทั่วไป (generalized coordinates)
Q_j	คือ	แรงกระทำ ณ ตำแหน่งของพิกัดทั่วไป (generalized force) ที่สอดคล้องกับ q_j

จากแบบจำลองในรูป (2.3) สามารถเขียนสมการของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ทั้งระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L m_b(x) [\dot{u}']^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_c} [m_{ci} \cdot \dot{u}_{ci}^2] \quad (2.8)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI_b(x) \cdot [w''(x,t)]^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_c} k_{ci} \cdot [u_{ci}(x_{ci},t) - u_i^t(x_{ci},t)]^2 - [R_L(t) \cdot u_{sL}(t) + R_R(t) \cdot u_{sR}(t)] \quad (2.9)$$

โดยที่	u^t	คือ	การกระจัดรวมของสะพาน มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างการเคลื่อนตัวของสะพานอันเนื่องจากการดัดและการเคลื่อนที่ของจุดรองรับ หรือ $u^t(x,t) = w(x,t) + u_s(x,t)$
	u_{ci}	คือ	ค่าการกระจัดสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ i
	$m_b(x)$	คือ	มวลของสะพานต่อหนึ่งหน่วยความยาว
	m_{ci}	คือ	มวลของรถยนต์คันที่ i
	k_{ci}	คือ	ความแข็งของช่วงล่างรถยนต์คันที่ i
	$EI_b(x)$	คือ	ค่าความแข็งเกร็งต้านทานการดัด (Flexural rigidity) ของสะพานต่อหนึ่งหน่วยความยาว
	R_L และ R_R	คือ	แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับของสะพานด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ

ทั้งนี้ จะพิจารณาโดยการสมมติให้สะพานมีการกระจายหน้าตัดอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นมวลต่อหนึ่งหน่วยความยาว $m_b(x)$ สามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ได้คือ m_b เช่นเดียวกับกับค่า $EI_b(x)$ ก็จะสามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ได้คือ EI_b และจากสมการที่ (2.8) และ (2.9) สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ตัวอักษรได้

$$\mathbf{T} = \frac{m_b}{2} \int_0^L (\dot{\mathbf{u}}^t \cdot \dot{\mathbf{u}}^t) dx + \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{u}}_c^T \mathbf{m}_c \dot{\mathbf{u}}_c) \quad (2.10)$$

หรือสามารถเขียนสมการพลังงานจลน์ให้อยู่ในรูปของพิกัดทั่วไปได้ดังสมการที่ 2.11

$$\begin{aligned} \mathbf{T} = & \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi^T \cdot \Phi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_b^T \dot{\mathbf{q}}_b + \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi^T \cdot \Psi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_b^T \dot{\mathbf{q}}_s \\ & + \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Psi^T \cdot \Phi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_s^T \dot{\mathbf{q}}_b + \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Psi^T \cdot \Psi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_s^T \dot{\mathbf{q}}_s \\ & + \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{q}}_c^T \mathbf{m}_c \dot{\mathbf{q}}_c) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{V} = \frac{EI_b}{2} \int_0^L (w''(x,t)^T \cdot w''(x,t)) dx + \frac{1}{2} (\delta_c^T \cdot \mathbf{k}_c \cdot \delta_c) - \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{u}_s \quad (2.12)$$

โดยสามารถเขียนสมการพลังงานศักย์ให้อยู่ในรูปของพิกัดทั่วไปได้ดังสมการที่ 2.13

$$\mathbf{V} = \frac{EI_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi''^T \cdot \Phi'') dx \right\} \mathbf{q}_b^T \mathbf{q}_b + \frac{1}{2} (\delta_c^T \cdot \mathbf{k}_c \cdot \delta_c) - \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{q}_s \quad (2.13)$$

$$\text{โดยที่ } \delta_c = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_{c1} - \mathbf{u}^t(x_{c1}) \\ \mathbf{u}_{c2} - \mathbf{u}^t(x_{c2}) \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{cm} - \mathbf{u}^t(x_{cm}) \end{Bmatrix} \quad \text{คือ การกระจัดสัมพัทธ์ (Relative displacement) ของรถยนต์}$$

ในที่นี้พจน์ Q_j ในสมการที่ 2.7 หมายถึงแรงไม่อนุรักษ์เนื่องจากความหน่วง (nonconservative damping force) มีค่าเท่ากับอนุพันธ์ย่อยของพลังงานที่สูญเสีย \mathbf{D} เทียบกับความเร็วของพิกัดทั่วไป q_j

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} c_b \int_0^L (\dot{w}''(x,t)^T \cdot \dot{w}''(x,t)) dx + \frac{1}{2} (\dot{\delta}_c^T \cdot \mathbf{c}_c \cdot \dot{\delta}_c) \quad (2.14)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถเขียนสมการของพลังงานสูญเสียให้อยู่ในรูปของพิกัดทั่วไปได้ดังสมการที่ 2.15

$$\mathbf{D} = \frac{c_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi''^T \cdot \Phi'') dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_b^T \dot{\mathbf{q}}_b + \frac{1}{2} (\dot{\delta}_c^T \cdot \mathbf{c}_c \cdot \dot{\delta}_c) \quad (2.15)$$

นำสมการที่ 2.11 2.13 และ 2.15 แทนในสมการ 2.7 ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่เชิงพลังงานของลากรางจ์ (Lagrange's equation) เมื่อพิจารณาแต่ละพจน์จะได้ความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงพจน์ต่างๆจากการสังเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ระหว่างสะพานและรถยนต์โดยสมการที่ 2.9

Coordinate	$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)$	$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}}$	$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}}$	$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \dot{\mathbf{q}}}$
Bridges	$\begin{bmatrix} m_b \int_0^L \Phi^T \cdot \Phi dx \\ + \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_b$ $\begin{bmatrix} m_b \int_0^L \Phi^T \cdot \Psi dx \\ + \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_s$	0	$\left\{ \begin{aligned} &EI_b \int_0^L \Phi''^T \cdot \Phi'' dx \\ &+ [\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c)] \\ &+ \{-\mathbf{k}_c \cdot \Phi^T(x_c)\} \mathbf{q}_c \\ &+ \{\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c)\} \mathbf{q}_s \end{aligned} \right\} \mathbf{q}_b$	$\left\{ \begin{aligned} &c_b \int_0^L (\Phi'' \cdot \Phi'') dx \\ &+ [\Phi(x_c)^T \cdot \mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c)] \\ &+ \{-\mathbf{c}_c \cdot \Phi^T(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_c \\ &+ \{\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_s \end{aligned} \right\} \dot{\mathbf{q}}_b$
Cars	$\mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{q}}_c$	0	$\left\{ \begin{aligned} &-\mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c) \mathbf{q}_b + \mathbf{k}_c \cdot \mathbf{q}_c \\ &+ \{-\mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c)\} \mathbf{q}_s \end{aligned} \right\}$	$\left\{ \begin{aligned} &-\mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c) \dot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{c}_c \cdot \dot{\mathbf{q}}_c \\ &+ \{-\mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_s \end{aligned} \right\}$
Support	$\begin{bmatrix} m_b \int_0^L \Psi^T \cdot \Phi dx \\ + \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_b$ $\begin{bmatrix} m_b \int_0^L \Psi^T \cdot \Psi dx \\ + \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_s$	0	$\left\{ \begin{aligned} &\mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c)^T \cdot \Phi(x_c) \mathbf{q}_b \\ &+ \{-\mathbf{k}_c \cdot \Psi^T(x_c)\} \mathbf{q}_c \\ &+ \left\{ \mathbf{k}_c \cdot [\Psi(x_c)^T \cdot \Psi(x_c)] \right\} \mathbf{q}_s \\ &-\mathbf{R} \end{aligned} \right\}$	$\left\{ \begin{aligned} &\mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c)^T \cdot \Phi(x_c) \dot{\mathbf{q}}_b \\ &+ \{-\mathbf{c}_c \cdot \Psi^T(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_c \\ &+ \left\{ \mathbf{c}_c \cdot [\Psi^T(x_c) \cdot \Psi(x_c)] \right\} \dot{\mathbf{q}}_s \end{aligned} \right\}$

แต่เนื่องจากคุณสมบัติการตั้งฉากกัน (orthogonality property) ของฟังก์ชันพื้นฐานของสะพาน ดังนั้นค่านอกแนวทแยง (off-diagonal) ของเมตริกซ์มวล (mass matrix) เท่ากับศูนย์ ทำให้เกิดความสมมาตรขึ้นในเมตริกซ์มวล และจากการวิเคราะห์เชิงโหมด (modal analysis) จะสามารถหาเมตริกซ์สติฟเนสเชิงโหมด (modal stiffness matrix) และเมตริกซ์ความหน่วงเชิงโหมด (modal damping matrix) ได้โดยที่ค่านอกแนวทแยงของเมตริกซ์สติฟเนสเชิงโหมดและเมตริกซ์ความหน่วงเชิงโหมดเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน เมื่อแทนสมการความสัมพันธ์ ของพจน์ต่างๆในตารางที่ 2.1 ลงในสมการ (2.7) จะได้สมการการกระจัดทั้งระบบซึ่งสามารถจัดในรูปแบบการกระจายของเมตริกซ์ที่สอดคล้องกันระหว่างพิกัดทั่วไปต่างๆทั้งในส่วนของสะพาน รอยน็ดและจุดรองรับดังสมการที่ 2.15 ก

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_b \int_0^L (\Phi \cdot \Phi^T) dx & \vdots & \mathbf{0} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{0} & \vdots & \text{diag}(m_{ci}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_b \\ \dots \\ \ddot{\mathbf{q}}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (2 \cdot \mathbf{M}_b \omega \xi) \\ + [\mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c)]^T \cdot \Phi(x_c) & \vdots & -\mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c) \\ \dots & \vdots & \dots \\ -[\mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c)]^T & \vdots & \text{diag}(c_{ci}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_b \\ \dots \\ \dot{\mathbf{q}}_c \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} EI_b \int_0^L (\Phi'' \cdot \Phi''^T) dx & \vdots & -\mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c) \\ + [\mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c)]^T \cdot \Phi(x_c) & \vdots & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \\ -[\mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c)]^T & \vdots & \text{diag}(k_{ci}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_b \\ \dots \\ \mathbf{q}_c \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b \int_0^L (\Phi \cdot \Psi) dx \\ \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_s - \begin{bmatrix} [\mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c)]^T \cdot \Psi(x_c) \\ \dots \\ -\mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_s \\
 & - \begin{bmatrix} [\mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c)]^T \cdot \Psi(x_c) \\ \dots \\ -\mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c) \end{bmatrix} \mathbf{q}_s
 \end{aligned} \tag{2.16n}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_b \\ \ddot{\mathbf{q}}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b & \mathbf{c}_{bc} \\ \mathbf{c}_{bc}^T & \mathbf{c}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_b \\ \dot{\mathbf{q}}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{k}_{bc} \\ \mathbf{k}_{bc}^T & \mathbf{k}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_b \\ \mathbf{q}_c \end{Bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_s - \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{sb} \\ \mathbf{k}_{sc} \end{bmatrix} \mathbf{q}_s
 \end{aligned} \tag{2.16ข}$$

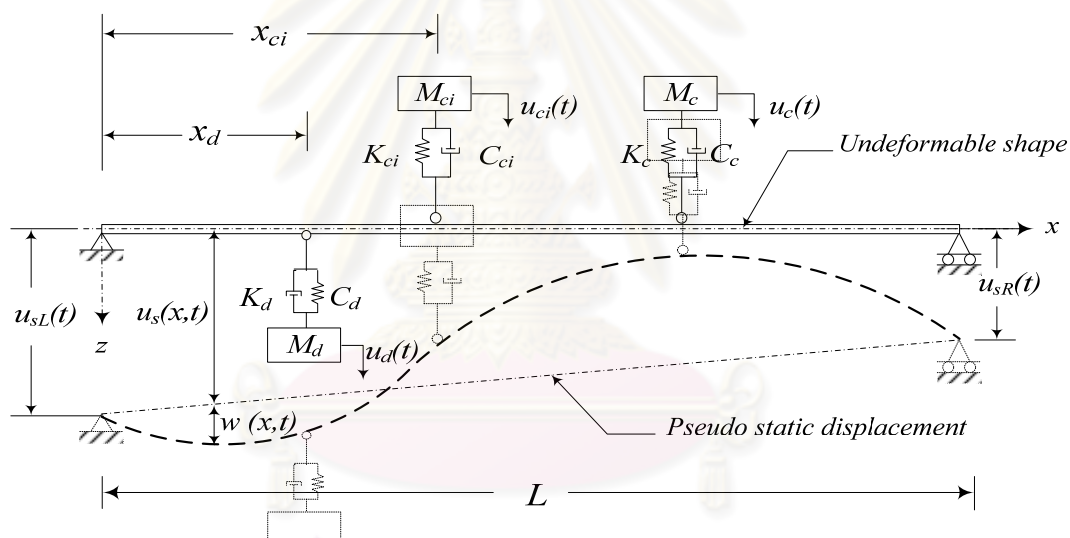
สมการการเคลื่อนที่ 2.16ข สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการการเคลื่อนที่ทั่วไป (General form) โดยการรวมพจน์ทางขวาของสมการเข้าไว้ด้วยกันในรูปแบบของแรง $\mathbf{P}(t)$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = -\mathbf{M}_s\ddot{\mathbf{q}}_s(t) - \mathbf{K}_s\mathbf{q}_s(t) = \mathbf{P}(t) \quad (2.17)$$

โดยที่ $\mathbf{P}(t)$ คือ แรงกระทำรวม ณ ตำแหน่งของพิกัดทั่วไป (generalized force)

2.1.3 การประยุกต์เพื่อสร้างแบบจำลองและสมการการกระจัดของปฏิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพาน รถยนต์โดยสารและมวลห้วงปรับค่า

การสร้างสมการการกระจัดในกรณีที่มีการติดตั้งมวลห้วงปรับค่าในแบบจำลองสะพานที่มีรถจอดติดอยู่บนสะพานสามารถทำได้โดยการประยุกต์สมการการเคลื่อนที่ที่ได้สร้างขึ้นมาแล้วในสมการที่ (2.17) ด้วยการเพิ่มพิกัดการเคลื่อนที่เข้าไปยังสมการ โดยพิกัดที่เพิ่มเข้ามาในสมการการเคลื่อนที่ก็คือ พิกัดการเคลื่อนที่ของมวลห้วงปรับค่า \mathbf{u}_d ซึ่งมีพิกัดทั่วไปแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathbf{q}_d(t)$



รูปที่ 2.4 รูปแบบจำลองระหว่างสะพานที่มีการติดตั้งมวลห้วงปรับค่าและรถยนต์โดยสาร

จากสมการ (2.10) (2.12) และ (2.14) พลังงานจลน์และพลังงานศักย์สามารถปรับเขียนใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{T} = \frac{m_b}{2} \int_0^L (\dot{\mathbf{u}}^T \cdot \dot{\mathbf{u}}) dx + \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{u}}_c^T \mathbf{m}_c \dot{\mathbf{u}}_c) + \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{u}}_d^T \mathbf{m}_d \dot{\mathbf{u}}_d) \quad (2.18)$$

$$\mathbf{V} = \frac{EI_b}{2} \int_0^L (w''(x,t)^T \cdot w''(x,t)) dx + \frac{1}{2} (\delta_c^T \cdot \mathbf{k}_c \cdot \delta_c) + \frac{1}{2} (\delta_d^T \cdot \mathbf{k}_d \cdot \delta_d) - \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{u}_s \quad (2.19)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} c_b \int_0^L (\dot{w}''(x,t)^T \cdot \dot{w}''(x,t)) dx + \frac{1}{2} (\dot{\delta}_c^T \cdot \mathbf{c}_c \cdot \dot{\delta}_c) + \frac{1}{2} (\dot{\delta}_d^T \cdot \mathbf{c}_d \cdot \dot{\delta}_d) \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถเขียนสมการที่ 2.18 ถึง 2.20 ให้อยู่ในรูปของพิกัดทั่วไปได้ดังสมการที่ 2.21 ถึง 2.23

$$\begin{aligned} \mathbf{T} = & \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi^T \cdot \Phi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_b^T \dot{\mathbf{q}}_b + \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi^T \cdot \Psi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_b^T \dot{\mathbf{q}}_s \\ & + \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Psi^T \cdot \Phi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_s^T \dot{\mathbf{q}}_b + \frac{m_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Psi^T \cdot \Psi) dx \right\} \dot{\mathbf{q}}_s^T \dot{\mathbf{q}}_s \\ & + \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{q}}_d^T \mathbf{m}_d \dot{\mathbf{q}}_d) + \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{q}}_c^T \mathbf{m}_c \dot{\mathbf{q}}_c) \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V} = & \frac{EI_b}{2} \left\{ \int_0^L (\Phi''^T \cdot \Phi'') dx \right\} \mathbf{q}_b^T \mathbf{q}_b + \frac{1}{2} (\delta_c^T \cdot \mathbf{k}_c \cdot \delta_c) \\ & + \frac{1}{2} (\delta_d^T \cdot \mathbf{k}_d \cdot \delta_d) - \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{q}_s \end{aligned} \quad (2.22)$$

โดยที่ $\delta_c = \begin{cases} \mathbf{u}_{c1} - \mathbf{u}^t(x_{c1}) \\ \mathbf{u}_{c2} - \mathbf{u}^t(x_{c2}) \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{cm} - \mathbf{u}^t(x_{cm}) \end{cases}$ คือ การกระจัดสัมพัทธ์ (Relative displacement) ของรอยยนต์

$\delta_d = \begin{cases} \mathbf{u}_{d1} - \mathbf{u}^t(x_{d1}) \\ \mathbf{u}_{d2} - \mathbf{u}^t(x_{d2}) \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{dm} - \mathbf{u}^t(x_{dm}) \end{cases}$ คือ การกระจัดสัมพัทธ์ (Relative displacement) ของมวลหน่วงปรับค่า

ตารางที่ 2.2 แสดงพจน์ต่างๆจากการสังเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ระหว่างสะพาน รถยนต์และมวลหน่วงปรับ
ค่าโดยสมการที่ 2.9

Coordinate	$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)$	$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}}$	$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}}$	$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \dot{\mathbf{q}}}$
Bridges	$\begin{bmatrix} m_b \int_0^L \Phi^T \cdot \Phi dx \\ + m_b \int_0^L \Phi^T \cdot \Psi dx \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_b$	0	$\begin{Bmatrix} EI_b \int_0^L \Phi'' \cdot \Phi''^T dx \\ + [\Phi^T(x_d) \cdot \mathbf{k}_d \cdot \Phi(x_d)] \\ + [\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c)] \end{Bmatrix} \mathbf{q}_b$ $+ \{-\mathbf{k}_d \cdot \Phi^T(x_d)\} \mathbf{q}_d$ $+ \{-\mathbf{k}_c \cdot \Phi^T(x_c)\} \mathbf{q}_c$ $+ \{\Phi^T(x_d) \cdot \mathbf{k}_d \cdot \Psi(x_d)\} \mathbf{q}_s$ $+ \{\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c)\} \mathbf{q}_s$	$\begin{Bmatrix} c_b \int_0^L (\Phi'' \cdot \Phi''^T) dx \\ + [\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c)] \\ + [\Phi^T(x_d) \cdot \mathbf{c}_d \cdot \Phi(x_d)] \end{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_b$ $+ \{-\mathbf{c}_c \cdot \Phi^T(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_c$ $+ \{-\mathbf{c}_d \cdot \Phi^T(x_d)\} \dot{\mathbf{q}}_d$ $+ \{\Phi^T(x_c) \cdot \mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_s$ $+ \{\Phi^T(x_d) \cdot \mathbf{c}_d \cdot \Psi(x_d)\} \dot{\mathbf{q}}_s$
Cars	$\mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{q}}_c$	0	$\{-\mathbf{k}_c \cdot \Phi(x_c)\} \mathbf{q}_b + \mathbf{k}_c \cdot \mathbf{q}_c$ $+ \{-\mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c)\} \mathbf{q}_s$	$\{-\mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{c}_c \cdot \dot{\mathbf{q}}_c$ $+ \{-\mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_s$
TMDs	$\mathbf{m}_d \ddot{\mathbf{q}}_d$	0	$\{-\mathbf{k}_d \cdot \Phi(x_d)\} \mathbf{q}_b + \mathbf{k}_d \cdot \mathbf{q}_d$ $+ \{-\mathbf{k}_d \cdot \Psi(x_d)\} \mathbf{q}_s$	$\{-\mathbf{c}_d \cdot \Phi(x_d)\} \dot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{c}_d \cdot \dot{\mathbf{q}}_d$ $+ \{-\mathbf{c}_d \cdot \Psi(x_d)\} \dot{\mathbf{q}}_s$
Support	$\begin{bmatrix} m_b \int_0^L \Psi^T \cdot \Phi dx \\ + m_b \int_0^L \Psi^T \cdot \Psi dx \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_b$	0	$\begin{Bmatrix} \mathbf{k}_c \cdot \Psi(x_c)^T \cdot \Phi(x_c) \\ + \mathbf{k}_d \cdot \Psi(x_d)^T \cdot \Phi(x_d) \end{Bmatrix} \mathbf{q}_b$ $+ \{-\mathbf{k}_c \cdot \Psi^T(x_c)\} \mathbf{q}_c$ $+ \{-\mathbf{k}_d \cdot \Psi^T(x_d)\} \mathbf{q}_d$ $+ \begin{Bmatrix} \mathbf{k}_c \cdot [\Psi^T(x_c) \cdot \Psi(x_c)] \\ + \mathbf{k}_d \cdot [\Psi^T(x_d) \cdot \Psi(x_d)] \end{Bmatrix} \mathbf{q}_s - \mathbf{R}$	$\begin{Bmatrix} \mathbf{c}_c \cdot \Phi(x_c) \cdot \Psi(x_c) \\ + \mathbf{c}_d \cdot \Phi(x_d) \cdot \Psi(x_d) \end{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_b$ $+ \{-\mathbf{c}_c \cdot \Psi(x_c)\} \dot{\mathbf{q}}_c$ $+ \{-\mathbf{c}_d \cdot \Psi(x_d)\} \dot{\mathbf{q}}_d$ $+ \begin{Bmatrix} \mathbf{c}_c \cdot [\Psi(x_c) \cdot \Psi^T(x_c)] \\ + \mathbf{c}_d \cdot [\Psi(x_d) \cdot \Psi^T(x_d)] \end{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_s$

ในการทำงานเดียวกันจากหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้น โดยคุณสมบัติการตั้งฉากกัน (orthogonality property) ของฟังก์ชันพื้นฐานของสะพาน และจากการวิเคราะห์เชิงโหมด (modal analysis) จะสามารถสร้างเมตริกซ์สติฟเนสเชิงโหมด (modal stiffness matrix) และเมตริกซ์ความหน่วงเชิงโหมด (modal damping matrix) ได้เมื่อแทนสมการความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆในตารางที่ 2.2 ลงในสมการ (2.7) จะได้สมการการกระจายที่ระบบซึ่งสามารถจัดในรูปแบบการกระจายของเมตริกซ์ที่สอดคล้องกันระหว่างพิกัดทั่วไปต่างๆทั้งในส่วนของสะพาน รถยนต์ มวลหน่วงปรับค่าและจุดรองรับดังสมการที่ 2.20

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{m}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_b \\ \dot{\mathbf{q}}_d \\ \dot{\mathbf{q}}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b & \mathbf{c}_{bd} & \mathbf{c}_{bc} \\ \mathbf{c}_{bd}^T & \mathbf{c}_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{c}_{bc}^T & \mathbf{0} & \mathbf{c}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_b \\ \dot{\mathbf{q}}_d \\ \dot{\mathbf{q}}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{k}_{bd} & \mathbf{k}_{bc} \\ \mathbf{k}_{bd}^T & \mathbf{k}_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{k}_{bc}^T & \mathbf{0} & \mathbf{k}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_b \\ \mathbf{q}_d \\ \mathbf{q}_c \end{Bmatrix} \\
& = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_s - \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{sb} \\ \mathbf{k}_{sd} \\ \mathbf{k}_{sc} \end{bmatrix} \mathbf{q}_s
\end{aligned} \tag{2.23}$$

นอกจากนี้สมการที่ 2.23 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการเคลื่อนที่ทั่วไป (General form) ได้เช่นเดียวกันกับสมการที่ 2.17

2.2 การแก้สมการการเคลื่อนที่โดยการประมาณเชิงตัวเลขด้วยวิธีเสตทสเปซ

การใช้สมการเสตทสเปซ (state-space formulation) สมการ (2.16) จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งดังแสดง

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{f} \tag{2.21}$$

โดยที่

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}_{2n \times 1}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P} \end{bmatrix}_{2n \times n_f} \tag{2.22}$$

โดยที่ \mathbf{X} คือ เวกเตอร์ของตัวแปร (state variables) ที่มีมิติเท่ากับ $2n$ ซึ่งประกอบด้วย การแอนตัวและความเร็ว

n_f คือ จำนวนของแรงภายนอกที่มากระทำ

\mathbf{f} คือ แรงภายนอกที่ไม่ทราบค่าที่มีมิติเท่ากับ $n_f \times 1$

สมการอนุพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของสมการไม่ต่อเนื่อง (discrete equation) โดยการใช้ เอกซ์โพเนนเชียลเมตริกซ์ (exponential matrix) เข้ามาเกี่ยวข้อง จะได้

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_j + \bar{\mathbf{G}}_{j+1}\mathbf{B}_j\mathbf{f}_j \tag{2.23}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{e}^{\mathbf{A}h} \tag{2.24}$$

$$\bar{\mathbf{G}} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{I}) \tag{2.25}$$

โดยที่ \mathbf{F} คือ เอกซ์โพเนนเชียลเมตริกซ์ (exponential matrix)

$\bar{\mathbf{G}}$ คือ เมตริกซ์ที่เชื่อมโยงระหว่างแรงกับระบบ

$j+1$ คือ การคำนวณ ณ ชั้นเวลาที่ $j+1$

h คือ ผลต่างของเวลาในการคำนวณ (variable state) ระหว่าง \mathbf{X}_j และ \mathbf{X}_{j+1}

จากการแทนสมการ (2.24) และ (2.25) ลงไปในสมการ (2.23) จะได้

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_j + \mathbf{G}_{j+1}\mathbf{f}_j \quad (2.26)$$

โดยที่

$$\mathbf{G} = \bar{\mathbf{G}}_{2n \times 2n} \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}_{2n \times n_j} \quad (2.27)$$

2.2.1 วิธีการหาเอกซ์โพเนนเชียลเมตริกซ์ (exponential matrix) \mathbf{F}

$$\text{จาก } \mathbf{e}^{A h} = \mathbf{I} + h\mathbf{A} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{A}^2 + \frac{h^3}{3!}\mathbf{A}^3 + \dots \quad (2.28)$$

$$\text{และ } \mathbf{A} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} \quad (2.29)$$

โดยที่

$\mathbf{\Lambda}$ คือ เมตริกซ์ไอเกนแวลู (eigenvalue) ของเมตริกซ์ \mathbf{A}

\mathbf{V} คือ เมตริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ (eigenvector) ของเมตริกซ์ \mathbf{A}

แทนสมการ (2.38) ลงใน (2.37) จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{A h} &= \mathbf{V}\mathbf{V}^{-1} + h\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} \\ &\quad + \frac{h^3}{3!}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} + \dots \\ &= \mathbf{V}\mathbf{V}^{-1} + h\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^{-1} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^2\mathbf{V}^{-1} + \frac{h^3}{3!}\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^3\mathbf{V}^{-1} + \dots \\ &= \mathbf{V}\left(\mathbf{I} + h\mathbf{\Lambda} + \frac{h^2}{2!}\mathbf{\Lambda}^2 + \frac{h^3}{3!}\mathbf{\Lambda}^3 + \dots\right)\mathbf{V}^{-1} \\ &= \mathbf{V}\mathbf{e}^{\mathbf{\Lambda} h}\mathbf{V}^{-1} \end{aligned} \quad (2.30)$$

ผลจากการแก้สมการโดยการดำเนินการทางตัวเลขด้วยวิธีเสถียรค่าเวกเตอร์ \mathbf{X} ที่ได้จะอยู่ในรูปของเวกเตอร์ที่ประกอบไปด้วยค่า \mathbf{q} และอนุพันธ์ของค่า \mathbf{q} ซึ่งได้จากการแก้สมการเพียงครั้งเดียวและหากต้องการทราบค่าอนุพันธ์อันดับสองของ \mathbf{q} สามารถทำได้โดยการแทนค่าเวกเตอร์ \mathbf{X} กลับไปยังสมการที่ 2.21 เพื่อหาค่า $\dot{\mathbf{X}}$ ซึ่งจากสมการที่ 2.22 พบว่า $\dot{\mathbf{X}}$ นั้นประกอบไปด้วยเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของ \mathbf{q} ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแก้สมการโดยวิธีเสถียรค่าสามารถให้ผลจากการแก้สมการที่ครบถ้วนและรวดเร็ว แต่ค่าความถูกต้องของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการหาเอกซ์โพเนนเชียลเมตริกซ์

บทที่ 3

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะทำการตรวจสอบแบบจำลองที่ได้จากบทที่ 2 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) โดยตรวจสอบการผลตอบสนองเชิงการกระจัดของสะพาน และตรวจสอบการสั่นสะเทือนของรถยนต์ในแบบจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สะพานข้ามทางแยกพระราม 9 บริเวณแยก อ.ส.ม.ท เป็นกรณีศึกษา โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างสะพานเหล็กขนาด 2 ช่องจราจร (ต่อ 1 ทิศทางจราจร) โดยแต่ละช่องสะพานมีความยาวช่วงประมาณ 25 เมตร สะพานที่ใช้ในการศึกษาการพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์ จะพิจารณาคานหลักตัวริมนอกสุดของสะพานซึ่งพิจารณาเป็นแบบคานช่วงเดี่ยวความยาว 25 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นตัวแทนในการศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของสะพานและรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพาน

ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเกิดความถูกต้องจึงต้องใช้ค่าคุณสมบัติของสะพานที่มีค่าตามความเป็นจริงหรือใกล้เคียงกับคุณสมบัติที่แท้จริงของสะพานมากที่สุด โดยค่าคุณสมบัติของสะพานที่ใช้นี้ได้มาจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามแบบก่อสร้างจริงและการทดสอบจริงในสนามซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนและรายละเอียดของการทดสอบในบทถัดไป

3.1 การหาค่าคุณสมบัติของสะพานจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์

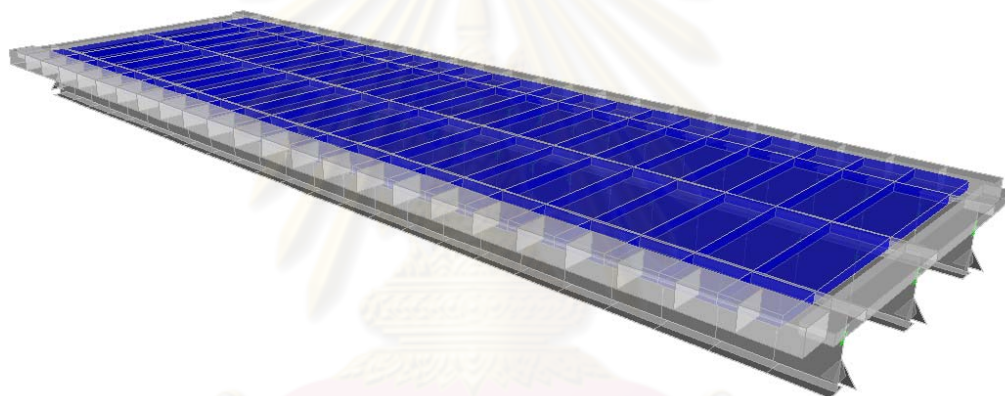
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์ของสะพานถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของสะพานบางประการ โดยเฉพาะค่ามวลต่อหน่วยความยาวของสะพาน (Uniform distribution mass; ρA) ที่มีความยากลำบากอย่างยิ่งในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าโดยวิเคราะห์หน้าตัดที่มีอยู่ตามแบบจริงหรือแม้แต่การหาค่าจากการทดสอบจริงในสนาม แต่การหาค่ามวลของสะพานสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามแบบก่อสร้างจริง และวิธีที่สามารถคำนวณได้ง่ายและรวดเร็วที่สุดคือการวิเคราะห์โดยทางอ้อมจากแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับอันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวสะพานเองในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำค่าแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับมาแปลงค่าเป็นมวลต่อหน่วยความยาวได้ในที่สุด ส่วนค่าความแข็งต้านทานการดัดของสะพาน (Flexural rigidity; EI) สามารถหาค่าได้ทั้งจากการทดสอบจริงในสนามหรือจากการคำนวณค่าแอนตัวของสะพานสูงสุดอันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวสะพานเองในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระจายบนคานและการแอนตัวดังสมการที่ 3.1

$$\Delta = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (3.1)$$

ซึ่งผลการวิเคราะห์ตามสมการที่ 3.1 ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานสามารถแสดงคุณสมบัติต่างๆได้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติสะพานที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

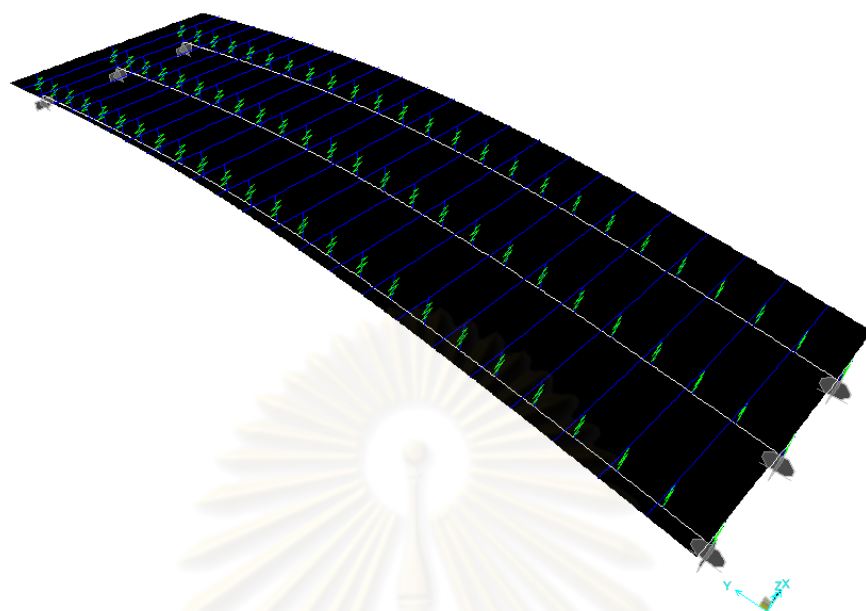
$\Delta_{average}$ (m)	L (m)	ρA (kg/m)	EI (N-sq.m)	ξ
0.025	25	2380.36	4.83×10^9	0.02



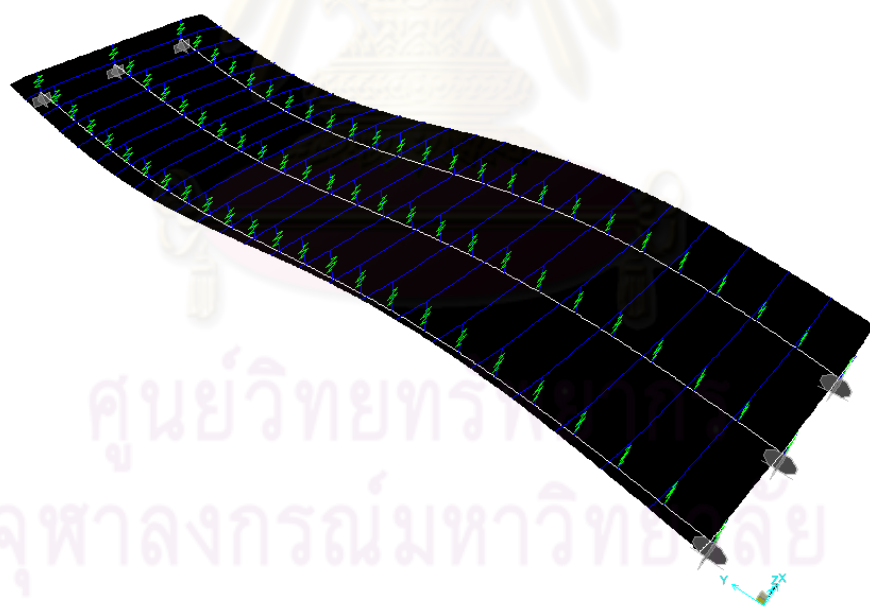
รูปที่ 3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์ของสะพาน

นอกจากนี้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังสามารถให้ค่าคาบธรรมชาติและความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดต่างๆ ซึ่งในได้ที่นี้เลือกพิจารณาใน 3 โหมดแรก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

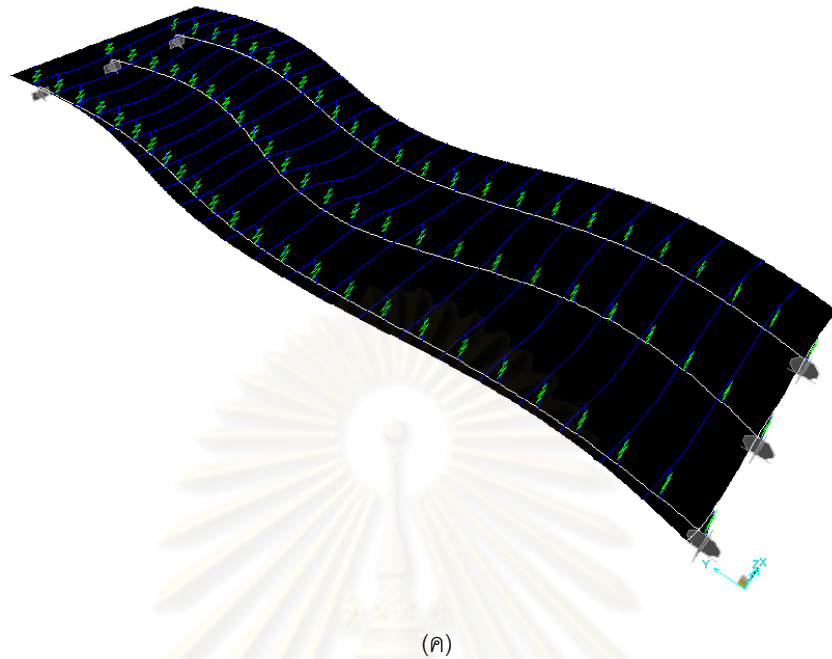


(ก)



(ข)

ศูนย์วิทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 รูปแบบการตัดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์ของสะพานในโหมดต่างๆ

(ก) รูปแบบการตัดของสะพานในโหมดที่ 1 ($T = 0.279$ s, $f = 3.581$ Hz.)

(ข) รูปแบบการตัดของสะพานในโหมดที่ 2 ($T = 0.0812$ s, $f = 12.31$ Hz.)

(ค) รูปแบบการตัดของสะพานในโหมดที่ 3 ($T = 0.0325$ s, $f = 30.77$ Hz.)

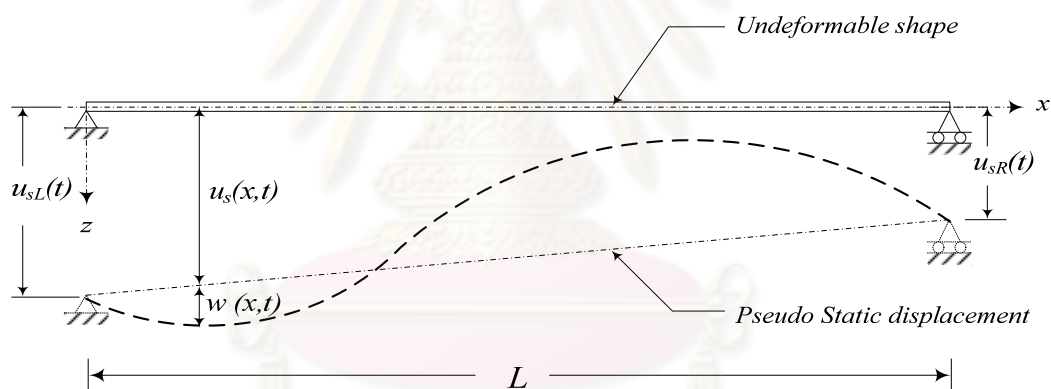
ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความถี่ที่คำนวณได้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งในส่วน of แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานในโปรแกรม SAP 2000 ซึ่งแสดงผลของค่าคาบธรรมชาติและรูปแบบของโหมดไว้ในรูปที่ 3.2 ก ถึง 3.2 ข เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในบทที่ 2 โดยโปรแกรม MATLAB พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในบางโหมดดังแสดงในตารางที่ 3.2 เนื่องจากการสร้างแบบจำลองทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันที่เงื่อนไขโดย แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางคอมพิวเตอร์ (SAP 2000) ของสะพานถูกจำลองขึ้นในลักษณะสามมิติ แต่แบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) นั้นถูกจำลองขึ้นเป็นแบบจำลองในระนาบ และเมื่อทำการตรวจสอบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีในสมการที่ 3.2 ซึ่งเป็นสมการการวิเคราะห์ค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติของคานช่วงเดี่ยวในระนาบเช่นเดียวกัน ซึ่งทำให้ค่าที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณโดยสมการที่ 3.2 เนื่องจากอยู่บนเงื่อนไขเดียวกัน

$$\omega_j = \frac{j^2 \pi^2}{L^2} \left(\sqrt{\frac{EI_b}{m_b}} \right) \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากแบบจำลองแต่ละโปรแกรมและค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

Mode	Natural frequency (Hz)		
	SAP 2000	MATLAB	Equation (3.2)
1	3.58	3.58	3.58
2	12.31	14.32	14.32
3	30.77	32.23	32.23

3.2 การตรวจสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับการวิเคราะห์ผลเฉลยทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำที่เกิดจากการสั่นไหวในแนวตั้งที่จุดรองรับทั้งสองข้าง

สมการการเคลื่อนที่ของสะพานในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$m_b \frac{\partial^2 u'(x,t)}{\partial t^2} + C_b \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + EI_b \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = 0 \quad (3.3)$$

โดยที่ $u'(x,t)$ คือ การกระจัดรวมของสะพาน มีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างการแอ่นตัวของสะพานอื่นเนื่องจากการตัดและการเคลื่อนที่ของจุดรองรับ หรือ $u'(x,t) = w(x,t) + u_s(x,t)$

$w(x, t)$	คือ การแอ่นตัวของสะพาน
m_b	คือ มวลของคานต่อหนึ่งหน่วยความยาว
C_b	คือ ค่าความหน่วงของคาน
EI_b	คือ ค่าความแข็งเกร็งด้านทานการดัด (Flexural rigidity)
L	คือ ความยาวช่วงคาน

จากการคำนวณเชิงโหมด ค่าการแอ่นตัวของสะพานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) \quad (3.4)$$

โดยที่	n	คือ โหมดที่ใช้ในการคำนวณในที่นี้มีค่าเท่ากับ 3
	$\phi_j(x)$	คือ ฟังก์ชันพื้นฐานของโหมดที่ j
	$q_j(t)$	คือ ค่าตำแหน่งเชิงโหมดที่ j

ส่วนการเคลื่อนตัวของจุดรองรับที่ตำแหน่งของจุดรองรับ และเวลานั้นสามารถเขียนได้เช่นเดียวกับค่าการแอ่นตัวของสะพานดังนี้

$$u_s(x, t) = \sum_{r=1}^2 \psi_r(x) q_{sr}(t) \quad (3.5)$$

โดยที่	$\psi_r(x)$	คือ ฟังก์ชันพื้นฐานการเปลี่ยนตำแหน่งสมมติเชิงสถิตย์ (pseudo-static) ที่ตำแหน่งจุดรองรับ r
	$q_{sr}(t)$	คือ ค่าการกระจัดที่ตำแหน่งจุดรองรับ r

ดังนั้นจะได้สมการเชิงโหมดที่ j

$$\frac{d^2 q_j(t)}{dt^2} + 2\zeta_j \omega_j \frac{dq_j(t)}{dt} + \omega_j^2 q_j(t) = -\frac{m_b}{M_j} \sum_{r=1}^2 \left(\int_0^L (\phi_j^T \psi_r) dx \cdot \frac{d^2 q_{sr}(t)}{dt^2} \right) \quad (3.6)$$

$$\omega_j = \left(\frac{j\pi}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m_b}} \quad \phi_j(x) = \sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right)$$

$$M_j = \frac{m_b L}{2} \quad Q_j(t) = -\frac{m_b}{M_j} \sum_{r=1}^2 \left(\int_0^L (\phi_j^T \psi_r) dx \cdot \frac{d^2 q_{sr}(t)}{dt^2} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่	ω_j	คือ ความถี่เชิงมุมโหมดที่ j
	ζ_j	คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโหมดที่ j
	M_j	คือ ค่ามวลเชิงโหมดของโหมดที่ j
	$Q_j(t)$	คือ ค่าแรงเสมือนจากการสั่นไหวของจุดรองรับเชิงโหมดของโหมดที่ j

การทดสอบแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลข (Numerical solution) กับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ (Analytical solution) โดยจะสมมติให้การสั่นไหวในแนวตั้งของจุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานเป็นฟังก์ชันไซน์ (Sine function) ที่มีขนาดการสั่นสูงสุดเท่ากับ 1 ซม. ด้วยความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจำนวน 3 ความถี่ตามกรณีที่ 3.1.1 ถึง 3.1.3 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

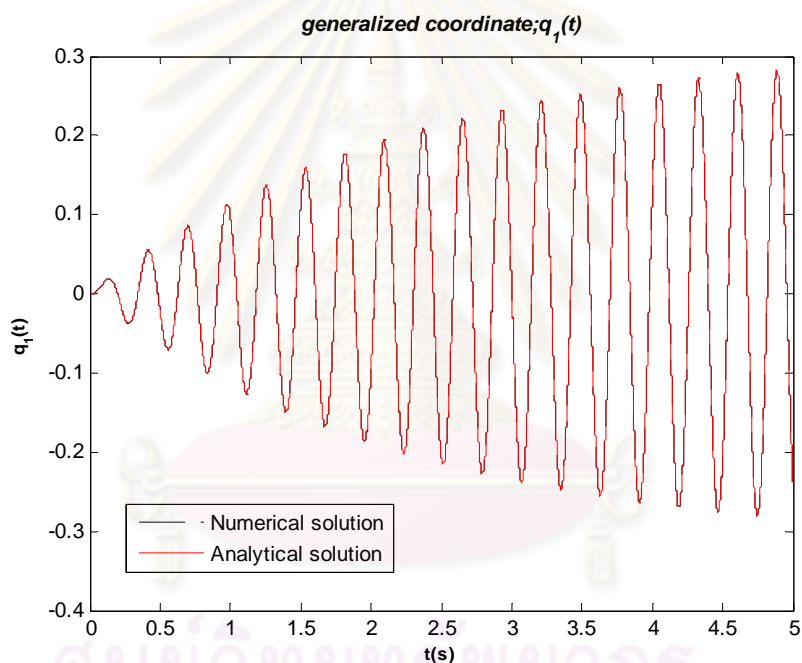
$$q_{sL}(t) = q_{sR}(t) = 0.01 \sin(\Omega t) \quad (3.8)$$

กรณีที่ 3.1.1 ค่า $\Omega = \omega_1$

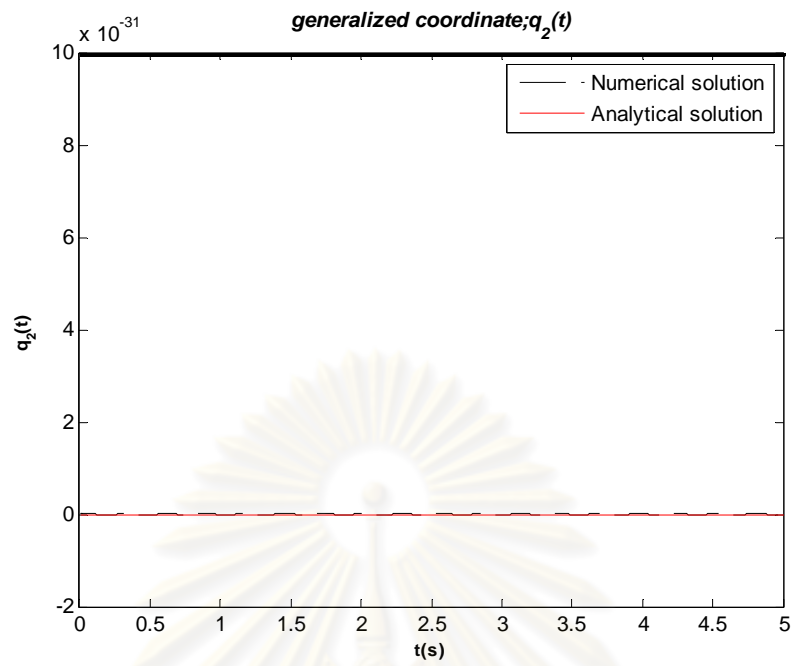
กรณีที่ 3.1.2 ค่า $\Omega = \omega_2$

กรณีที่ 3.1.3 ค่า $\Omega = \omega_3$

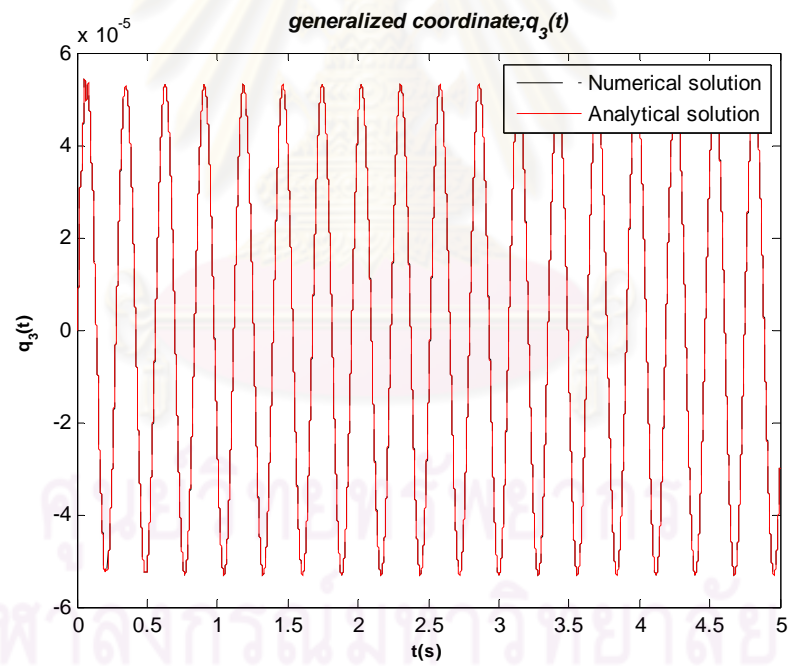
โดยที่ $\omega_{j=1,2,3}$ คือ ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมโหมดที่ j มีค่าเท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



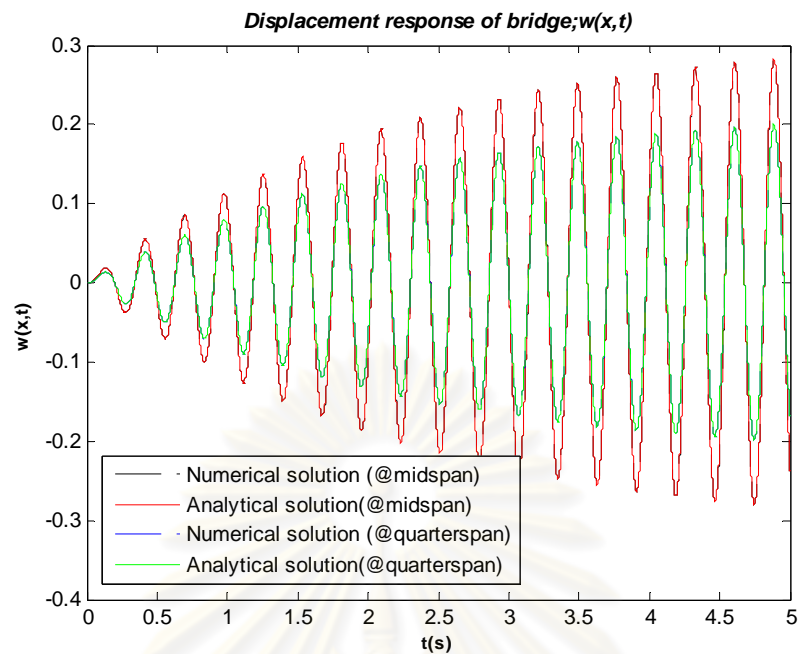
ศูนย์วิทยุทวพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



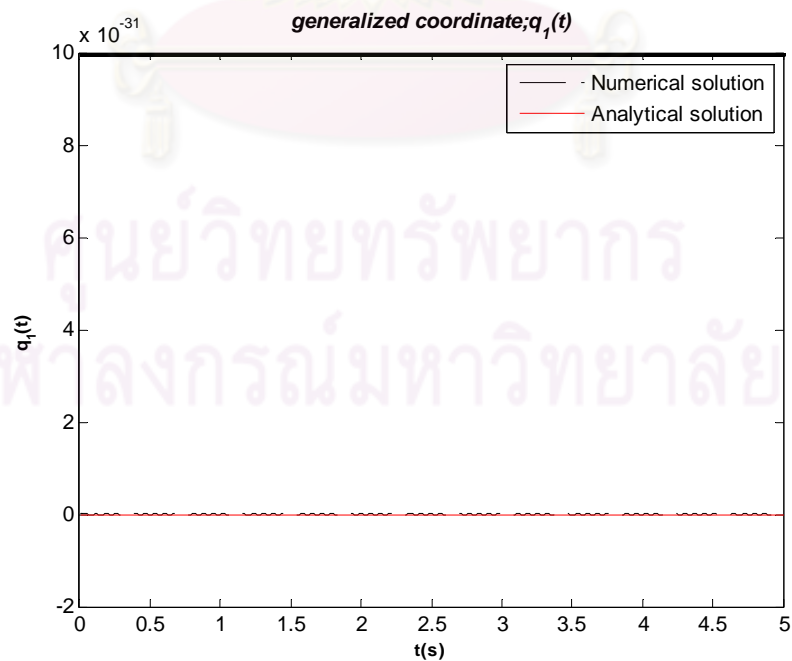
(๑)

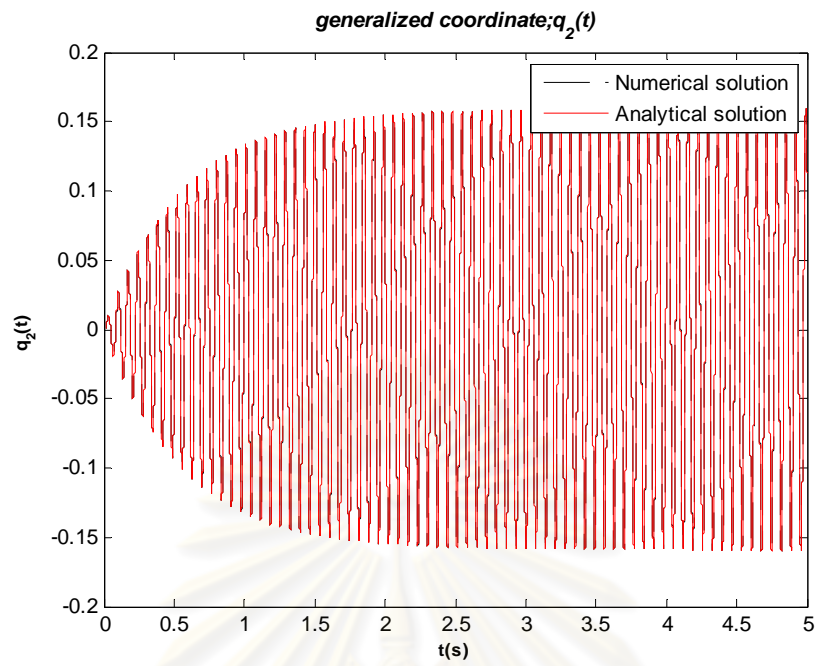


(๒)

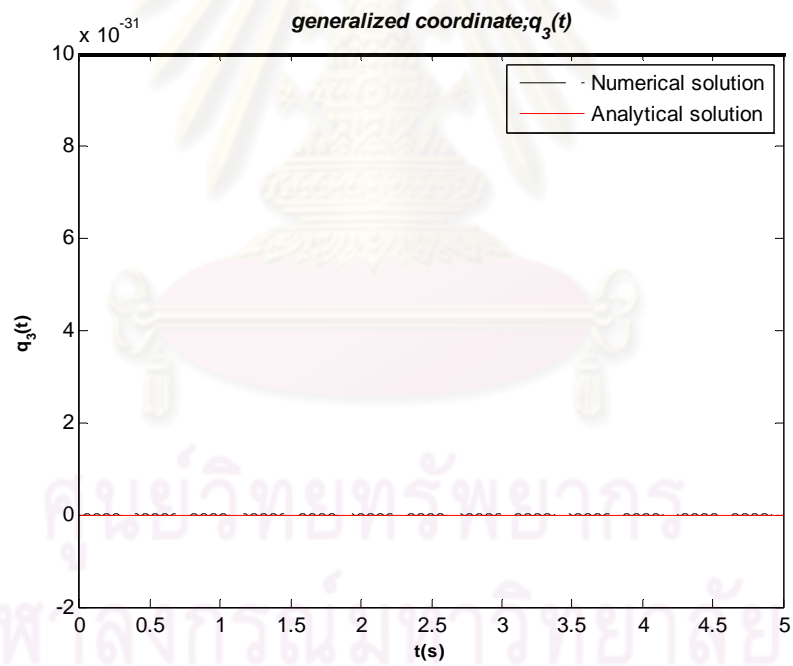


รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีนี้ที่ $3.1.1$ (ค่า $\Omega = \omega_1$)
 (ก) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 1 (ข) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 2 (ค) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 3
 (ง) ค่าการกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งกลางช่วง และที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง

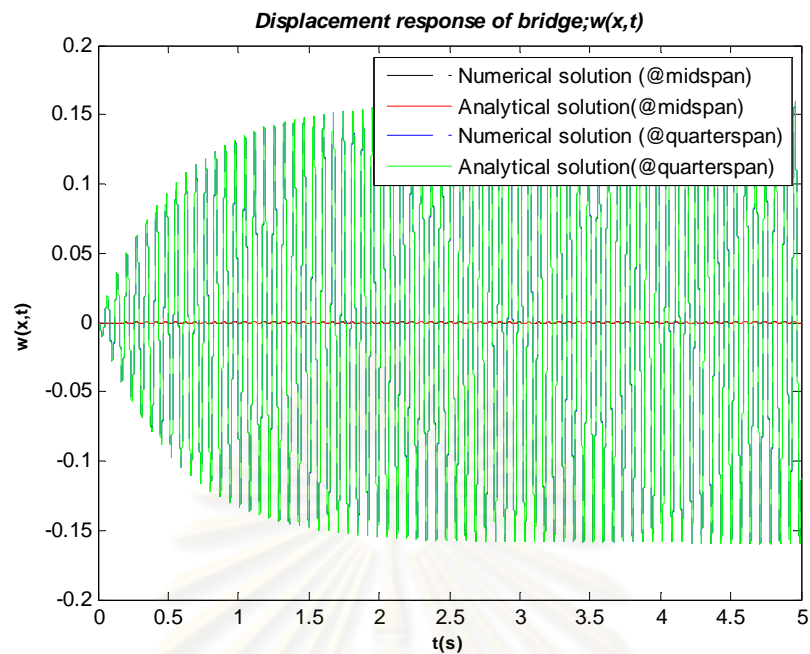




(๑)



(๒)

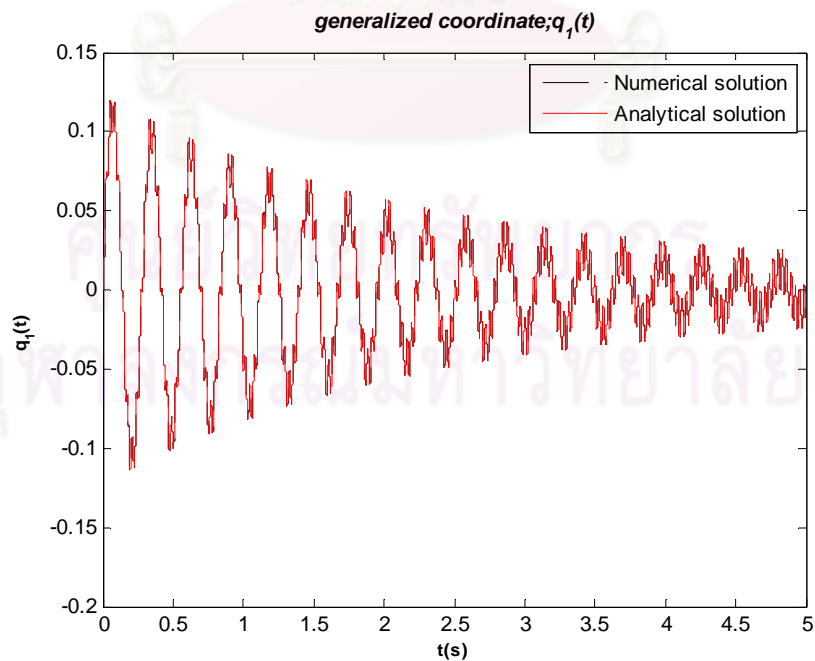


(ง)

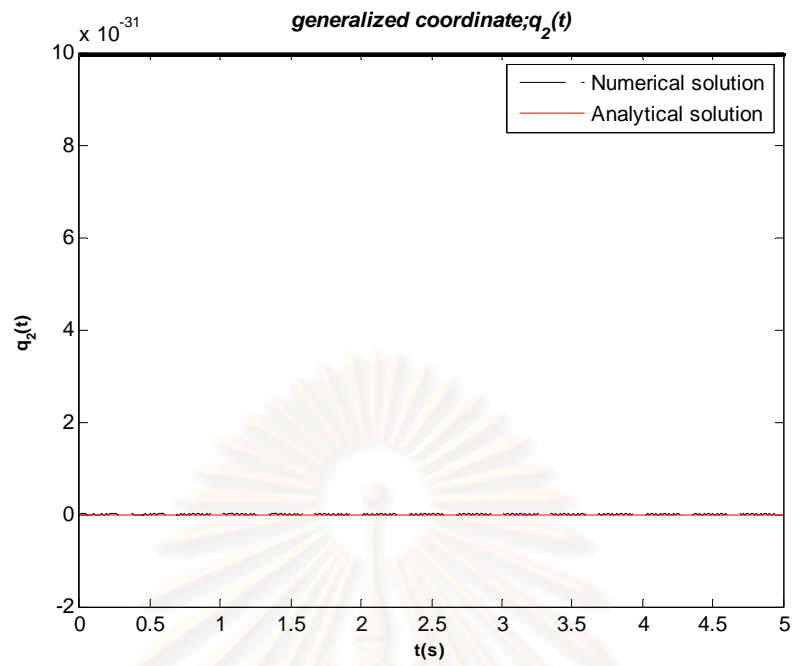
รูปที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.1.2 (ค่า $\Omega = \omega_2$)

(ก) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 1 (ข) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 2 (ค) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 3

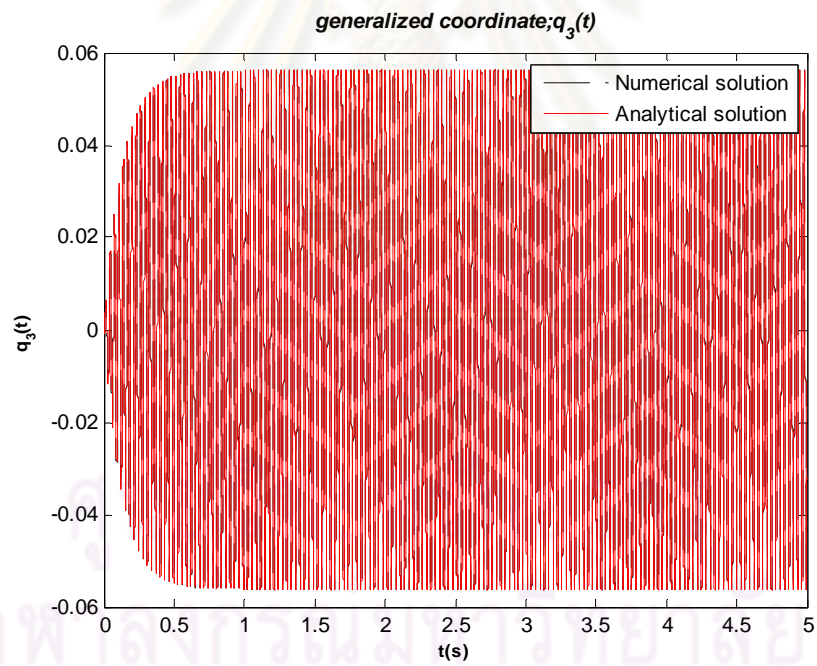
(ง) ค่าการกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งกลางช่วง และที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง



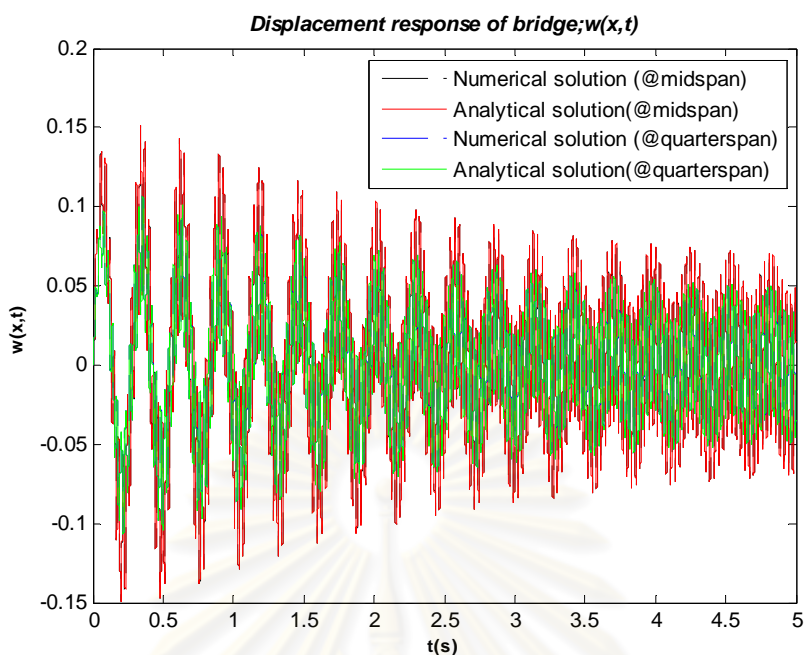
(ก)



(๑)



(๒)



(ง)

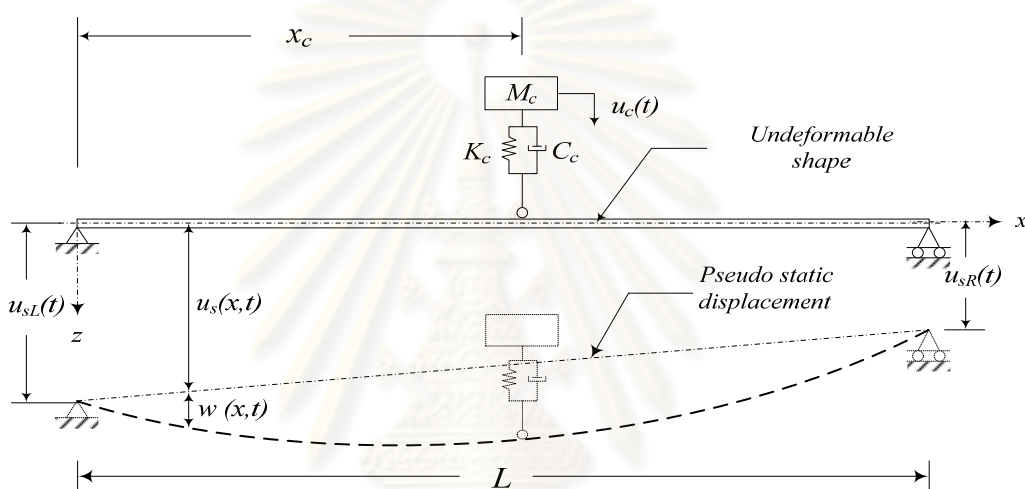
รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.1.3 (ค่า $\Omega = \omega_3$)
 (ก) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 1 (ข) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 2 (ค) ค่าพิกัดทั่วไปในโหมดที่ 3
 (ง) ค่าการกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งกลางช่วง และที่ระยะหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสะพานที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ ในกรณีความถี่ของการสั่นไหวที่ฐานแตกต่างกัน

กรณี	ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด (%)				
	$q_1(t)$	$q_2(t)$	$q_3(t)$	$w(0.5L,t)$	$w(0.75L,t)$
3.1.1 ($\Omega = \omega_1$)	0.11	0	0.20	0.11	0.11
3.1.2 ($\Omega = \omega_2$)	0	0.45	0	0.45	0.45
3.1.3 ($\Omega = \omega_3$)	0.21	0	2.67	1.08	0.92

3.3 การตรวจสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขและผลที่ได้จากการวิเคราะห์หاملเฉลยทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่มีระบบองศาความอิสระเดียวติดอยู่ที่กลางช่วงของคาน

การคำนวณเพื่อหاملเฉลยโดยตรงจากสมการคณิตศาสตร์ของแบบจำลองนั้น จะพิจารณาให้สะพานเป็นเสมือนคานช่วงเดียว ทั้งนี้เพื่อให้การแก้สมการการเคลื่อนที่โดยตรงโดยไม่เกิดความซับซ้อน จะสมมติให้จำนวนโหมดเนื่องจากการดัดของสะพานเท่ากับหนึ่ง และมีระบบองศาความอิสระเดียว (Single Degree Of Freedom) ติดอยู่ที่กลางช่วงของคาน



รูปที่ 3.7 คานช่วงเดียวที่มีระบบองศาอิสระเดียวติดอยู่ที่กลางช่วงเกิดการสั่นไหวจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ณ จุดรองรับของคาน

จากสมการที่ (2.16)

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

ซึ่งสมการข้างต้นสามารถทำการแก้สมการการเคลื่อนที่ได้ด้วยการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal Analysis) เพื่อแยกสมการแต่ละสมการให้เป็นอิสระจากกันโดยอาศัยเมตริกซ์รูปร่างโหมดสมมติ (Mode shape) โดยการใช้คุณสมบัติการตั้งฉากกันของฟังก์ชันพื้นฐานที่สมมติขึ้นเพื่อใช้สำหรับการแก้สมการดังนี้

$$\varphi_j^T M \varphi_i = M^* \quad \text{เมื่อ } j \neq i \tag{3.9}$$

และ $\varphi_j^T M \varphi_i = 0 \quad \text{เมื่อ } j = i \tag{3.10}$

เมื่อสมมติให้ $q(t) = \sum_j \varphi_j x_j(t) \tag{3.11}$

โดยที่ $x_j(t)$ คือ พิกัดเชิงโหมดสมมติที่ใช้ในการแก้สมการ

φ_j คือ ฟังก์ชันพื้นฐานที่สมมติขึ้นเพื่อใช้สำหรับการแก้สมการ เมื่อแทนสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (2.16) จะได้สมการเชิงโหดเทียบเท่าของสะพานและระบบของศาความอิสระเดี่ยวที่แยกอิสระจากกันดังนี้

$$M_b^* \ddot{x}_b + C_b^* \dot{x}_b + K_b^* x_b = Q_b^* \quad (3.12)$$

$$M_c^* \ddot{x}_c + C_c^* \dot{x}_c + K_c^* x_c = Q_c^* \quad (3.13)$$

การแก้สมการที่ (3.12) และ (3.13) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง สามารถทำได้โดยการแยกพิจารณาผลเฉลยออกเป็น 2 ส่วน คือผลเฉลยทั่วไป (general solution) และ ผลเฉลยเฉพาะ (particular solution) จากนั้นจึงนำผลเฉลยทั้งสองมารวมกันโดยใช้หลักการรวมผล (superposition) ดังนั้นผลเฉลยสมบูรณ์ (complete solution) ของสมการที่ (3.12) และ (3.13) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.14)

$$x_j(t) = x_{hj}(t) + x_{pj}(t) \quad (3.14)$$

การหาผลเฉลยทั่วไปสามารถทำได้โดยการใช้สมการช่วย (Auxiliary equation) เพื่อใช้ในการแก้สมการที่ (3.12) และ (3.13) ซึ่งมีสมการ Homogeneous คือ

$$M_j^* \ddot{x}_j + C_j^* \dot{x}_j + K_j^* x_j = 0 \quad (3.15)$$

จะได้สมการช่วยคือ

$$M_j^* r_j^2 + C_j^* r_j + K_j^* = 0 \quad (3.16)$$

ดังนั้น

$$r_j = \lambda_j \pm \nu_j i \quad (3.17)$$

และผลเฉลยทั่วไปคือ

$$x_{hj}(t) = e^{\lambda_j t} [c_{1j} \cos(\nu_j t) + c_{2j} \sin(\nu_j t)] \quad (3.18)$$

ส่วนการหาผลเฉลยเฉพาะสามารถทำได้โดยการใช้วิธี Undetermined coefficient ในการแก้สมการ (3.12) และ (3.13) ซึ่งมีสมการ Non-Homogeneous คือ

$$M_j^* \ddot{x}_j + C_j^* \dot{x}_j + K_j^* x_j = \eta_j \cdot \sin(\Omega t) + \sigma_j \cdot \cos(\Omega t) \quad (3.19)$$

สมมติให้ผลเฉลยเฉพาะอยู่ในรูปที่สอดคล้องกับพจน์ $\eta_j \cdot \sin(\Omega t) + \sigma_j \cdot \cos(\Omega t)$ จะได้ว่า

$$x_{pj} = A_j \cdot \sin(\Omega t) + B_j \cdot \cos(\Omega t) \quad (3.20)$$

$$\dot{x}_{pj} = A_j \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t) - B_j \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t) \quad (3.21)$$

$$\ddot{x}_{pj} = -A_j \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) - B_j \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\Omega t) \quad (3.22)$$

นำสมการที่ (3.20) (3.21) และ (3.22) แทนลงในสมการที่ (3.19) จะได้

$$\begin{aligned} M_j^* (-A_j \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) - B_j \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\Omega t)) + C_j^* (A_j \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t) - B_j \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t)) \\ + K_j^* (A_j \cdot \sin(\Omega t) + B_j \cdot \cos(\Omega t)) = \eta_j \cdot \sin(\Omega t) + \sigma_j \cdot \cos(\Omega t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

ในสมการที่ (3.23) สามารถทำการเทียบสัมประสิทธิ์ที่สอดคล้องกับค่า η_j และ σ_j ได้ดังนี้

$$(K_j^* - M_j^* \cdot \Omega^2) \cdot A_j - (C_j^* \cdot \Omega) \cdot B_j = \eta_j \quad (3.24)$$

$$(C_j^* \cdot \Omega) \cdot A_j + (K_j^* - M_j^* \cdot \Omega^2) \cdot B_j = \sigma_j \quad (3.25)$$

เมื่อแก้ระบบสมการที่ (3.24) และ (3.25) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์

$$A_j = \left[\frac{(1 - \beta_j^2) \cdot \eta_j + (2\xi_j \beta_j^2) \cdot \sigma_j}{M_j^* \omega_j^2 (1 + (4\xi_j^2 - 1) \beta_j^2)} \right] \quad (3.26)$$

$$B_j = \left[\frac{-(2\xi_j \beta_j^2) \cdot \eta_j + (1 - \beta_j^2) \cdot \sigma_j}{M_j^* \omega_j^2 (1 + (4\xi_j^2 - 1) \beta_j^2)} \right] \quad (3.27)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_i^2 = \frac{K_i^*}{M_i^*}, \quad \xi_i = \frac{C_i^*}{2M_i^* \omega_i} \quad \text{และ } \beta_i = \frac{\Omega}{\omega_i}$$

ดังนั้นผลเฉลยเฉพาะของสมการคือ

$$x_{pj}(t) = \frac{\left[(1 - \beta_j^2) \cdot \eta_j + (2\xi_j \beta_j^2) \cdot \sigma_j \right] \cdot \sin(\Omega t) + \left[-(2\xi_j \beta_j^2) \cdot \eta_j + (1 - \beta_j^2) \cdot \sigma_j \right] \cdot \cos(\Omega t)}{M_j^* \omega_j^2 (1 + (4\xi_j^2 - 1) \beta_j^2)} \quad (3.28)$$

ทำการแทนสมการที่ (3.28) และ (3.18) ลงในสมการที่ (3.14) จะสามารถเขียนผลเฉลยสมบูรณ์ได้ดังต่อไปนี้

$$x_j(t) = e^{\lambda_j t} \left[c_{1j} \cos(\nu_j t) + c_{2j} \sin(\nu_j t) \right] + \frac{\left[(1 - \beta_j^2) \cdot \eta_j + (2\xi_j \beta_j^2) \cdot \sigma_j \right] \cdot \sin(\Omega t) + \left[-(2\xi_j \beta_j^2) \cdot \eta_j + (1 - \beta_j^2) \cdot \sigma_j \right] \cdot \cos(\Omega t)}{M_j^* \omega_j^2 (1 + (4\xi_j^2 - 1) \beta_j^2)} \quad (3.29)$$

ผลเฉลยที่ได้จากสมการ (3.29) เป็นเพียงพิกัดเชิงโหนดสมมติที่ใช้เพื่อการแก้สมการเท่านั้น ดังนั้นเมื่อจะหาพิกัดเชิงโหนดที่แท้จริง $q_j(t)$ จะต้องทำการคูณกลับด้วยฟังก์ชันฐานที่สมมติขึ้น φ_j ดังสมการที่ (3.11) จะได้ว่า

$$q(t) = \varphi_1 \cdot x_1(t) + \varphi_2 \cdot x_2(t) \quad (3.30)$$

และเมื่อนำเมตริกซ์รูปร่างโหนด ϕ_j คูณเข้ากับพิกัดเชิงโหนด $q_j(t)$ จะสามารถหาค่าระยะกระจัดที่แท้จริง $w(x, t)$ ได้ตามสมการที่ (2.3) ในบทที่ 2

การแทนเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (initial condition) $w(x, 0)$ และ $\dot{w}(x, 0)$ จะต้องทำการแทนลงในสมการการกระจัด $w(x, t)$ แต่การหาสมการการกระจัดนั้นอาจทำให้เกิดความยุ่งยาก เนื่องจากพิกัดเชิงโหนด $q_j(t)$ มีค่าคงที่ที่ยังไม่ทราบค่าคือ c_{1j} และ c_{2j} ทั้งนี้การแทนเงื่อนไขค่าเริ่มต้นลงในพิกัดเชิงโหนด $q_j(t)$ นั้นไม่สามารถดำเนินการได้โดยตรง เพราะเงื่อนไขค่าเริ่มต้นประกอบไปด้วยตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งค่าคือ x และ t ทั้งนี้เพื่อให้สามารถแทนเงื่อนไขค่าเริ่มต้นลงในพิกัดเชิงโหนด $q_j(t)$ นั้นจะต้องทำการแปลงเงื่อนไขค่าเริ่มต้นจากสมการการกระจัด $w(x, t)$ ไปสู่พิกัดเชิงโหนด $q_j(t)$ โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองตามที่สมมติขึ้นในสมการที่ (2.3) ในบทที่ผ่านมา

$$w(x,t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) \cdot q_{bj}(t) = \Phi \mathbf{q}_b$$

หรือ

$$w(x,t) = q_1(t) \cdot \phi_1(x) + q_2(t) \cdot \phi_2(x) + q_3(t) \cdot \phi_3(x) + \dots + q_n(t) \cdot \phi_n(x) \quad (3.31)$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$

$$w(x,0) = q_1(0) \cdot \phi_1(x) + q_2(0) \cdot \phi_2(x) + q_3(0) \cdot \phi_3(x) + \dots + q_n(0) \cdot \phi_n(x) \quad (3.32)$$

และ $\dot{w}(x,0) = \dot{q}_1(0) \cdot \phi_1(x) + \dot{q}_2(0) \cdot \phi_2(x) + \dot{q}_3(0) \cdot \phi_3(x) + \dots + \dot{q}_n(0) \cdot \phi_n(x) \quad (3.33)$

นำ $\phi_j^T(x)M$ คูณทั้งสองข้างของสมการ พร้อมทั้งใช้คุณสมบัติการตั้งฉากกันของฟังก์ชันพื้นฐานในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (3.9) และ (3.10) จะได้

$$\phi_j^T(x) \cdot M \cdot w(x,0) = 0 + 0 + 0 + \phi_j^T(x) \cdot M \cdot \phi_j(x) \cdot q_j(0) + \dots + 0 + 0 + \dots \quad (3.34)$$

หรือ $q_j(0) = \frac{\phi_j^T(x) \cdot M \cdot w(x,0)}{\phi_j^T(x) \cdot M \cdot \phi_j(x)} \quad (3.35)$

และในทำนองเดียวกัน

$$\dot{q}_j(0) = \frac{\phi_j^T(x) \cdot M \cdot \dot{w}(x,0)}{\phi_j^T(x) \cdot M \cdot \phi_j(x)} \quad (3.36)$$

ในปัญหาที่กำลังทำการวิเคราะห์นี้มีเงื่อนไขที่พิจารณาคือ ทั้งคานช่วงเดียวและระบบของเสาความอิสระเดี่ยวติดที่กลางช่วง อยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิตยและอยู่นิ่งกับที่ ดังนั้นเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของปัญหาจึงเป็นดังนี้

$$w(x,0) = \dot{w}(x,0) = 0 \quad (3.30)$$

ดังนั้นสามารถแปลงเงื่อนไขค่าเริ่มต้นจากการกระจัดไปสู่พิกัดเชิงโหมดได้โดยใช้สมการที่ (3.35) และ (3.36)

ดังนี้

$$q(0) = \dot{q}(0) = 0 \quad (3.31)$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นลงในสมการที่ (3.29) จะสามารถหาค่าคงที่ใดๆ c_{1j} และ c_{2j} ได้

การตรวจสอบในกรณีนี้จะเป็นการตรวจสอบแบบจำลองในกรณีที่มีรถจอดอยู่บนสะพาน โดยจะสมมติให้การสั่นไหวในแนวตั้งของจตุรรองรับทั้งสองข้างของสะพานเป็นฟังก์ชันไซน์ (Sine function) ที่มีขนาดการสั่นสูงสุดเท่ากับ 1 ซม. ด้วยความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปใน 3 ความถี่ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.1 แต่มีการเปลี่ยนความถี่ไปตามกรณีที่แตกต่างกันไปจากกรณีที่แล้ว ดังต่อไปนี้

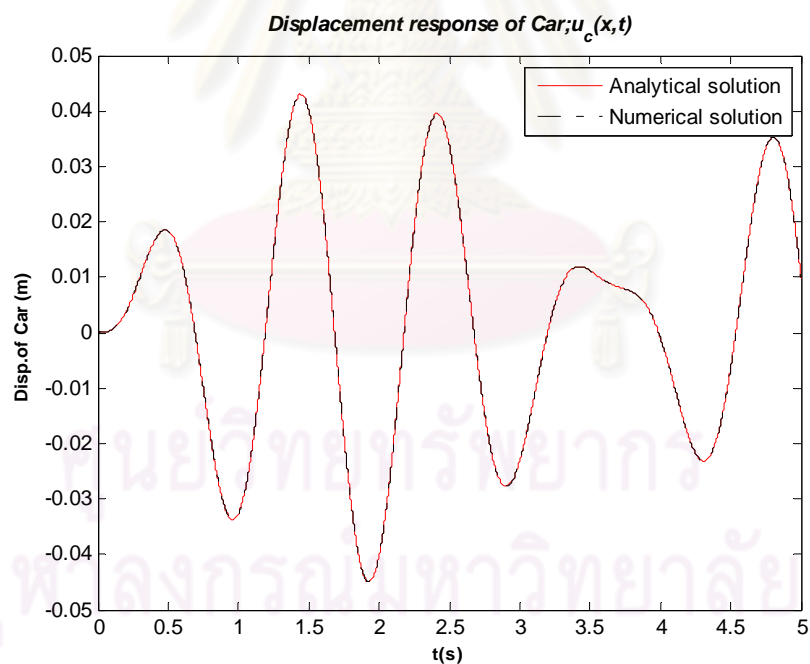
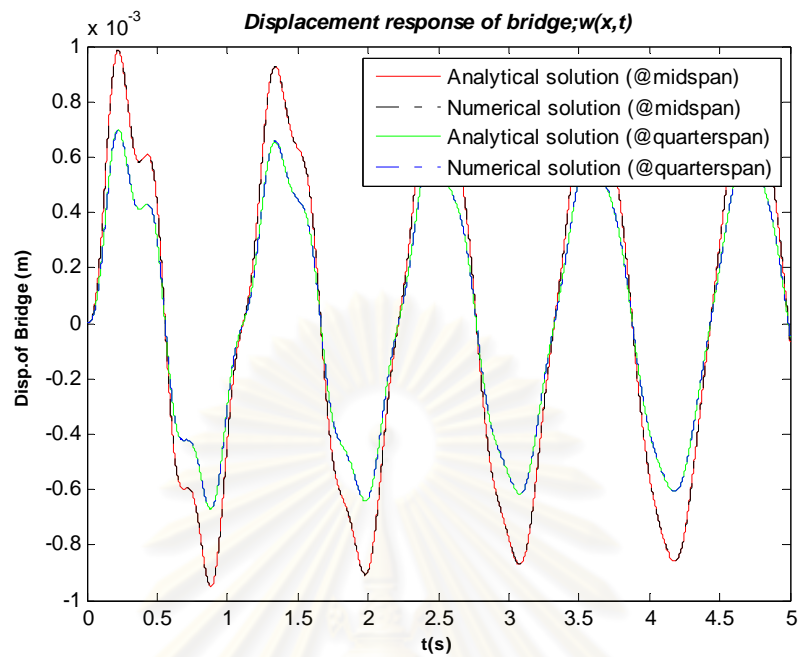
$$q_{sL}(t) = q_{sR}(t) = 0.01 \sin(\Omega t) \quad (3.32)$$

กรณีที่ 3.2.1 ค่า $\Omega = 0.25\omega_1$

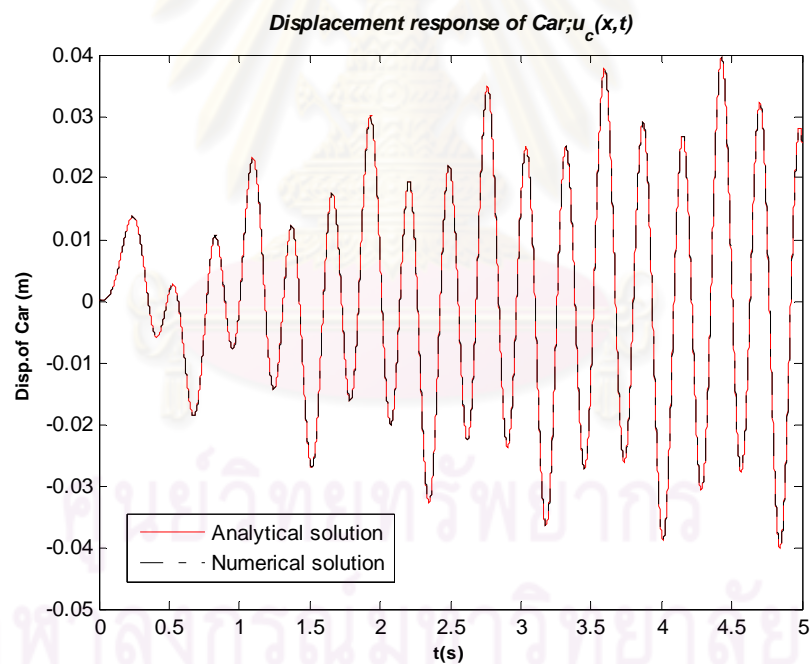
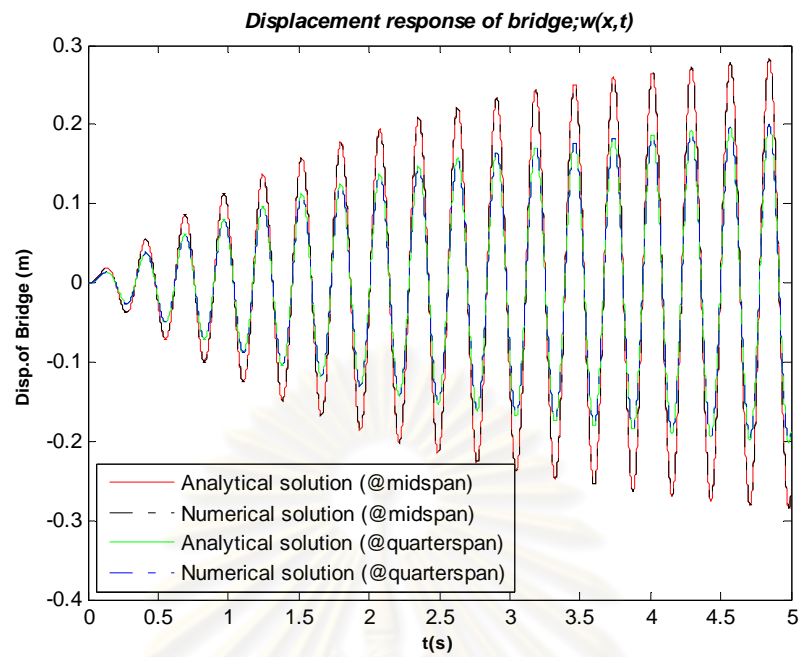
กรณีที่ 3.2.2 ค่า $\Omega = \omega_1$

กรณีที่ 3.2.3 ค่า $\Omega = 4\omega_1$

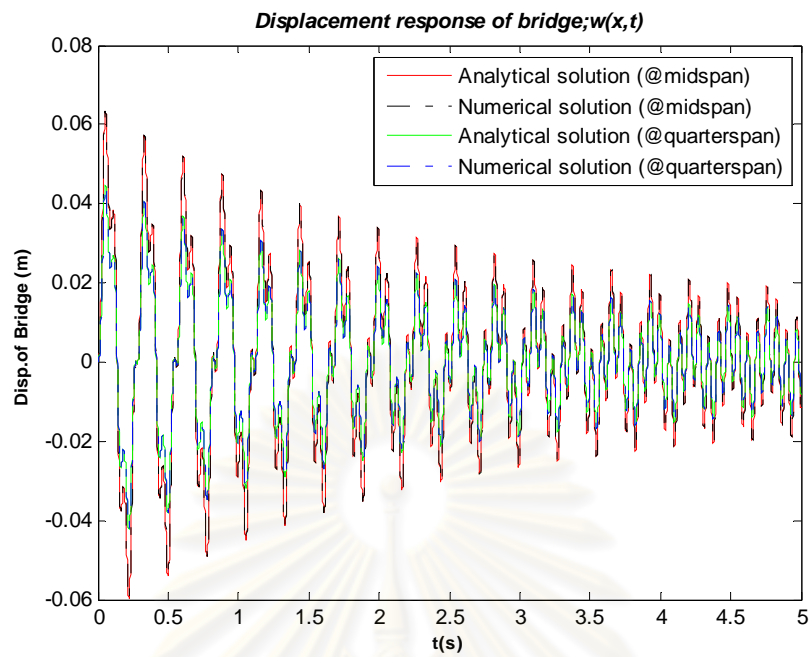
โดยที่ ω_1 คือ ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมโหมดที่ 1



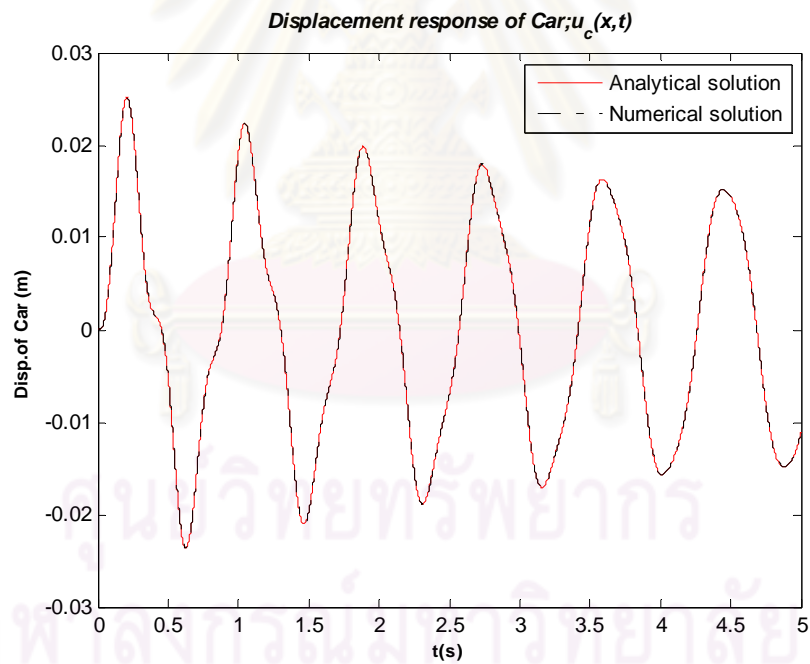
รูปที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลข กับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีนี้ที่ $\Omega = 0.25\omega_1$
 (ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร



รูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลข กับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีนี้ที่ $\Omega = \omega_1$ (ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลข กับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีนี้ที่ $\Omega = 4\omega_1$)
 (ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร

ตาราง 3.4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองระหว่างสะพานและรถยนต์โดยสารที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลข เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ ในกรณีความถี่ของการสั่นไหวที่ฐานแตกต่างกัน

กรณี	ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด (%)		
	สะพาน		รถยนต์โดยสาร
	บริเวณกลางช่วง	บริเวณหนึ่งในสี่ของความยาวช่วง	
2.1 ($\Omega = 0.25\omega_1$)	0.433	0.433	0.333
2.2 ($\Omega = \omega_1$)	1.139	1.139	1.009
2.3 ($\Omega = 4\omega_1$)	1.887	1.887	0.456

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การประเมินผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนโดยมาตรฐาน ISO 2631-1

มาตรฐาน ISO 2631 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ทั้งในส่วนที่เป็นมลภาวะทางความรู้สึก สุขภาพ โดยถูกวางขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1985 ก่อนที่จะมีการนำมาปรับปรุงอีกครั้งในปี ค.ศ. 1997 ในส่วนของมาตรฐาน ISO 2631 มีทั้งหมด 5 ฉบับ ซึ่งในส่วนของมาตรฐาน ISO 2631 (ฉบับที่ 1) นี้ได้ให้ความสำคัญต่อการประเมินผลกระทบจากการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนทั่วไปที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ซึ่งได้แก่ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นภายในยานพาหนะ (ทางบก ทางอากาศ และทางน้ำ) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรกล และการดำเนินกิจกรรมทางอุตสาหกรรม เป็นต้น กิจกรรมทั้งหมดนี้ล้วนส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบาย และสุขภาพของมนุษย์ โดยเนื้อหาของมาตรฐานฉบับนี้ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการและขั้นตอนในการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนพร้อมทั้งเกณฑ์ที่ใช้สำหรับการประเมินความผลกระทบต่อรู้สึกและสุขภาพของมนุษย์

4.1 ขอบเขตของมาตรฐาน ISO 2631

มาตรฐาน ISO 2631 ได้นำเสนอวิธีการในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนทั้งในส่วนที่เป็นการสั่นสะเทือนแบบคาบ (Periodic vibration) สั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random vibration) และการสั่นสะเทือนแบบชั่วคราว (Transient vibration) โดยใช้องค์ประกอบหลักทางตัวแปรเป็นดัชนีในการชี้วัดถึงขีดขั้นของการสั่นสะเทือนที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ทั้งนี้มาตรฐาน ISO 2631 ได้จำแนกผลกระทบที่เกิดจากการสั่นสะเทือนตามช่วงของความถี่ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงความถี่ที่ใช้ประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นต่อร่างกายของมนุษย์

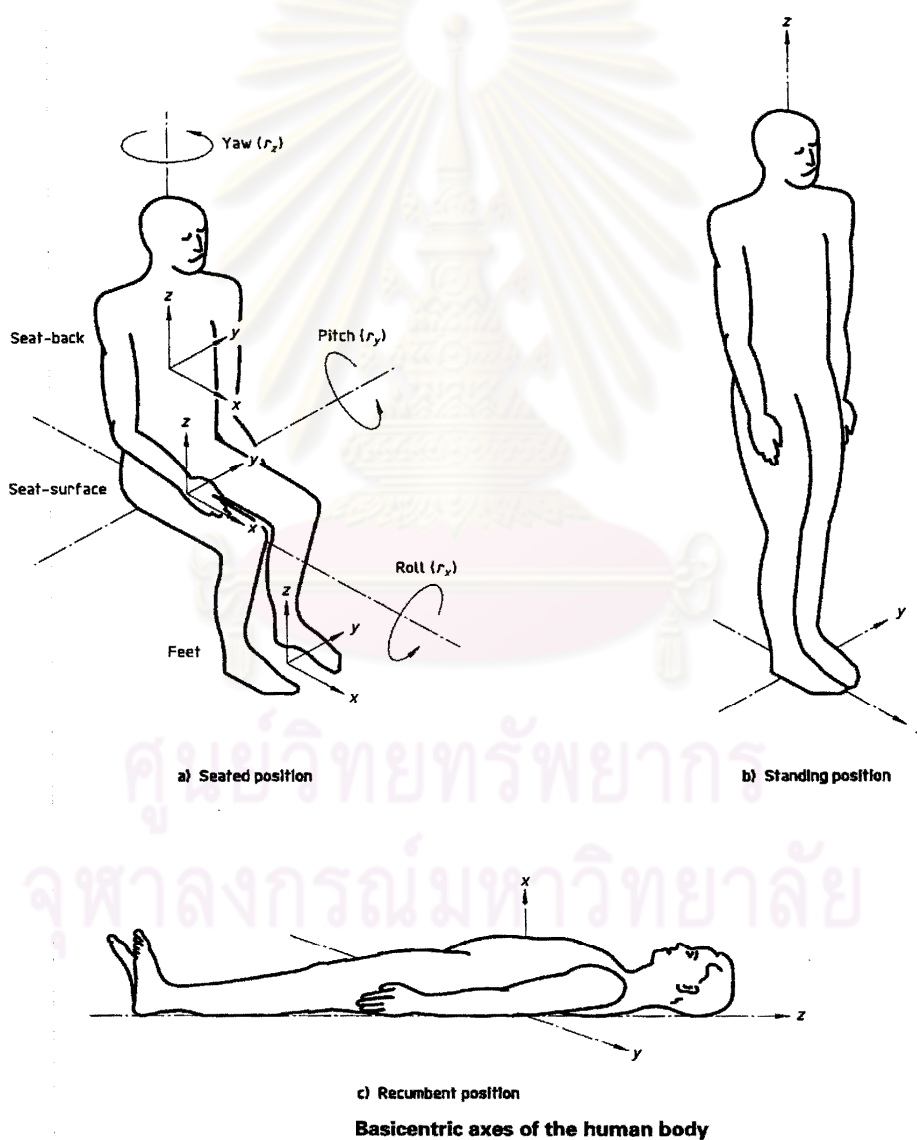
Frequency range	The possible effects of vibration
0.5 Hz to 80 Hz	Health, comfort and perception
0.1 Hz to 0.5 Hz	Motion sickness

มาตรฐาน ISO 2631 ได้พิจารณาช่วงความถี่ในช่วง 0.5 Hz ถึง 80 Hz เพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบาย สุขภาพ และการรับรู้ได้ด้วยความรู้สึก ส่วนในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 0.5 Hz ใช้สำหรับการประเมินถึงผลกระทบต่อสุขภาพที่รุนแรงจนถึงขั้นเจ็บปวดดังตารางที่ 4.1 อย่างไรก็ตามมาตรฐานฉบับนี้ไม่ได้รวมถึงศักยภาพของตัวบุคคลในการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดยเนื้อหาส่วนมากเกือบทั้งหมดจะใช้เกณฑ์โดยรวมในการประเมินมากกว่าการระบุถึงความรู้สึกเป็นรายบุคคล เนื่องจากศักยภาพในการรับรู้และทนต่อการอยู่ภายใต้สภาวะของการสั่นสะเทือนในแต่ละบุคคลไม่เท่าเทียมกัน นอกจากนี้

มาตรฐานยังไม่ครอบคลุมถึงการสั่นสะเทือนที่รุนแรงแบบทันทีทันใด (Extreme magnitude single shocks) ซึ่งได้แก่การเกิดอุบัติเหตุทางยานพาหนะ

4.2 ขั้นตอนและวิธีการประเมินค่าความเร่งจากการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO 2631

มาตรฐาน ISO 2631 ได้จำแนกการสั่นสะเทือนตัวร่างกายมนุษย์ตามทิศทางของการสั่นสะเทือนทั้งสิ้น 6 ทิศทางและ 3 อิริยาบถ โดยในแต่ละทิศทางประกอบไปด้วย การสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยน ตำแหน่ง (Translation) 3 ทิศทางในแนวแกน x y และ z ส่วนทิศทางที่เหลืออีก 3 ทิศทางคือ การสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดการหมุน (Rotation) 3 ทิศทางรอบแกน x y และ z ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงทิศทางและอิริยาบถภายใต้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐาน ISO

ซึ่งในมาตรฐานได้ระบุถึงปัจจัยของทิศทางและอิริยาบถที่แตกต่างกันจะมีผลต่อความรู้สึกที่แตกต่างกันออกไป โดยมีความถี่เป็นตัวแปรในการแบ่งแยกความรู้สึกต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆ ดังนั้นในมาตรฐานจึงได้นำเสนอวิธีการกรองสัญญาณโดยการให้น้ำหนักตามความถี่ (The frequency weighting) เพื่อใช้ในการคัดกรองสัญญาณก่อนจะนำไปวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการสั่นสะเทือนในทิศทางต่างๆ ทั้งนี้การกรองสัญญาณจะขึ้นอยู่กับทิศทางและอิริยาบถของการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือน ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงเกณฑ์ในการเลือกใช้ Frequency-weighting curves ในการกรองสัญญาณตามทิศทางและอิริยาบถภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือน

Guide for the application of frequency-weighting curves for principal weightings

Frequency weighting	Health (see clause 7)	Comfort (see clause 8)	Perception (see clause 8)	Motion sickness (see clause 9)
W_k	z-axis, seat surface	z-axis, seat surface z-axis, standing vertical recumbent (except head) x-, y-, z-axes, feet (sitting)	z-axis, seat surface z-axis, standing vertical recumbent (except head)	—
W_d	x-axis, seat surface y-axis, seat surface	x-axis, seat surface y-axis, seat surface x-, y-axes, standing horizontal recumbent y-, z-axes, seat-back	x-axis, seat surface y-axis, seat surface x-, y-axes, standing horizontal recumbent	—
W_f	—	—	—	vertical

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนของค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์เป็นตัวแปรหลักที่สำคัญสำหรับการประเมินถึงผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดยความเร่งที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ถูกพิจารณาเฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงเกณฑ์ในการเลือกใช้ Frequency-weighting curves ในการกรองสัญญาณตามตารางที่ 4.2 แล้วพบว่า Frequency-weighting, W_k จะถูกนำมาใช้เพื่อกรองสัญญาณความเร่งจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์

4.2.1 ความหมายทางคณิตศาสตร์และการสร้าง Frequency-weighting filters

มาตรฐาน ISO 2631 ได้ระบุถึงความหมายทางคณิตศาสตร์ของ Frequency-weightings ในภาคผนวก A โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ในลักษณะของการให้ค่าถ่วงน้ำหนักตามความถี่เพื่อกรองสัญญาณให้ได้ความถี่ตามที่ระบุไว้ตามเกณฑ์การประเมินในแต่ละส่วนก่อนที่จะนำไปทำการประเมินถึงผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น เช่นในการประเมินถึงผลกระทบด้านสุขภาพจากการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนจะต้องนำความเร่งที่เกิดขึ้นกรองผ่าน Frequency-weighting filters, W_k ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการประเมิน นอกเหนือจากตัวอย่างที่กล่าวมาว่าการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายและการรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับมนุษย์นั้นก็ยังมีหลักการเช่นเดียวกัน ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในการประเมินในภายหลัง สำหรับค่าตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักสำหรับการส่งผ่าน (Parameters of the transfer functions) สำหรับการกรองความถี่ในแต่ละย่านสามารถแสดงค่าได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักสำหรับการส่งผ่าน

Parameters of the transfer functions of the principal frequency weightings

Weighting	Band-limiting		Acceleration-velocity transition (a-v transition)			Upward step			
	f_1 Hz	f_2 Hz	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6
w_k	0,4	100	12,5	12,5	0,63	2,37	0,91	3,35	0,91
w_d	0,4	100	2,0	2,0	0,63	∞	—	∞	—
w_f	0,08	0,63	∞	0,25	0,86	0,062 5	0,80	0,1	0,80

ความหมายทางคณิตศาสตร์ของ Frequency-weighting filters ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรหลัก 4 ชุด ตัวแปรดังสมการที่ 4.1

$$H(p) = H_h(p) \cdot H_l(p) \cdot H_i(p) \cdot H_s(p) \quad (4.1)$$

โดยที่ $H_h(p)$ คือ ซีดจำกัดการให้ผ่านด้วยความถี่สูง (High pass) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2

$$|H_h(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}\omega_1 / p + (\omega_1 / p)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 4.2 ค่า f_1 ถูกเรียกว่าความถี่ที่มุม (corner frequency) ซึ่งมีค่าตามตารางที่ 4.3 ส่วนค่า ω_1 คือความถี่เชิงมุมของความถี่ที่มุม f_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi f_1$

$H_l(p)$ คือ ซีดจำกัดการให้ผ่านด้วยความถี่ต่ำ (Low pass) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3

$$|H_l(p)| = \left| \frac{1}{1 + \sqrt{2}\omega_2 / p + (\omega_2 / p)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 ในทำนองเดียวกันค่า f_2 ถูกเรียกว่าความถี่ที่มุม (corner frequency) ซึ่งมีค่าตามตารางที่ 4.3 ส่วนค่า ω_2 คือความถี่เชิงมุมของความถี่ที่มุม f_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi f_2$ ทั้งนี้ $H_h(p)$ และ $H_l(p)$ ถูกเรียกรวมกันว่า ซีดจำกัดแบน (Band-limiting)

$H_i(p)$ คือ ค่าการแปลงระหว่างความเร่งและความเร็ว (Low pass) มีหน้าที่ในการปรับแปลงสัญญาณให้เป็นสัดส่วนกับความเร่งเมื่อสัญญาณมีความถี่ต่ำ และในขณะเดียวกันจะทำการปรับแปลงสัญญาณให้เป็นสัดส่วนกับความเร็วเมื่อสัญญาณมีความถี่สูง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4

$$|H_t(p)| = \left| \frac{1 + p/\omega_3}{1 + p/(Q_4\omega_4) + (p/\omega_4)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f_4^4 \cdot Q_4^2}{f^4 \cdot Q_4^2 + f^2 \cdot f_4^2(1 - 2Q_4^2) + f_4^4 \cdot Q_4^2}} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 ค่า ω_3 และ ω_4 มีค่าเท่ากับ $2\pi f_3$ และ $2\pi f_4$ ตามลำดับ

$H_s(p)$ คือ ค่าการแปลงสัญญาณกระตุก (Upward step) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.5

$$|H_s(p)| = \left| \frac{1 + p/(Q_5\omega_5) + (p/\omega_5)^2}{1 + p/(Q_6\omega_6) + (p/\omega_6)^2} \cdot \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2 \right| = \left(\frac{Q_5}{Q_6}\right) \cdot \sqrt{\frac{f^4 \cdot Q_5^2 + f^2 \cdot f_5^2(1 - 2Q_5^2) + f_5^4 \cdot Q_5^2}{f^4 \cdot Q_6^2 + f^2 \cdot f_6^2(1 - 2Q_6^2) + f_6^4 \cdot Q_6^2}} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 ค่า ω_5 และ ω_6 มีค่าเท่ากับ $2\pi f_5$ และ $2\pi f_6$ ตามลำดับ

เมื่อทำการสังเคราะห์สมการที่ 4.2 ถึง 4.5 ร่วมกันกับสมการที่ 4.1 จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency weightings) ดังตารางที่ 4.4

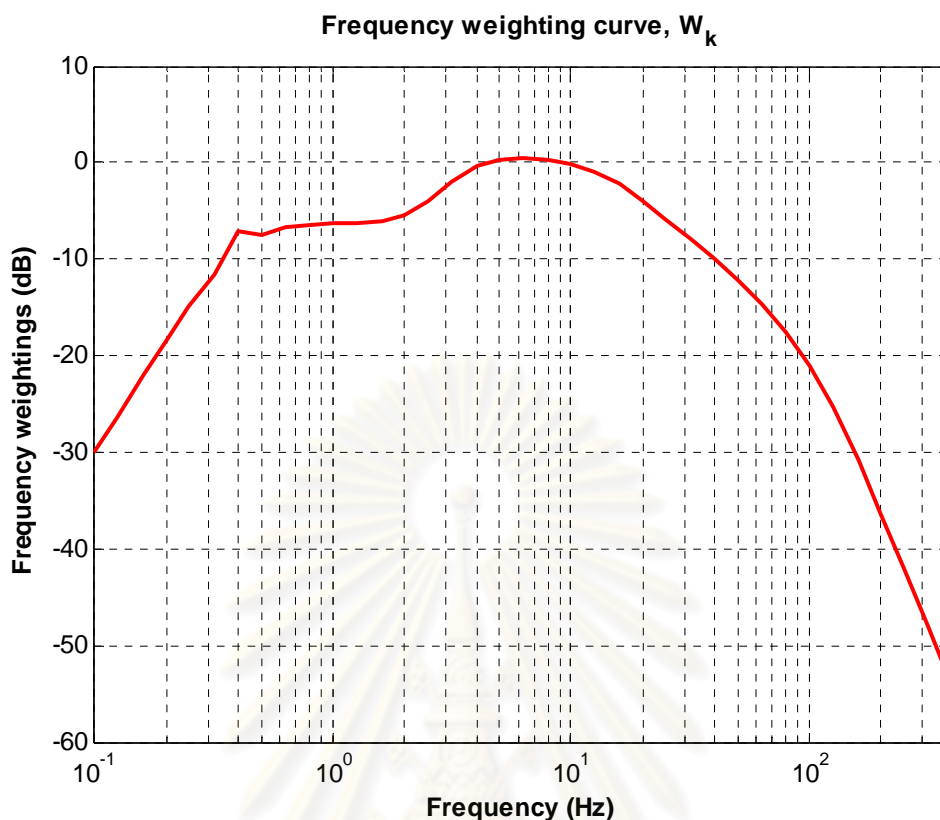
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency weightings)

Frequency (Hz)	W_k		
	factor	factor x 1000	dB
0.100	0.0312	31.2	-30.11
0.125	0.0486	48.6	-26.26
0.160	0.079	79	-22.05
0.200	0.121	121	-18.33
0.250	0.182	182	-14.81
0.315	0.263	263	-11.6
0.400	0.352	352	-7
0.500	0.418	418	-7.57
0.630	0.459	459	-6.77
0.80	0.477	477	-6.43
1.00	0.482	482	-6.33
1.25	0.484	484	-6.29
1.60	0.494	494	-6.12
2.00	0.531	531	-5.49

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่
(Frequency weightings)

Frequency (Hz)	W_k		
	factor	factor x 1000	dB
2.50	0.631	631	-4.01
3.15	0.804	804	-1.9
4.00	0.967	967	-0.29
5.00	1.039	1039	0.33
6.30	1.054	1054	0.46
8.00	1.036	1036	0.31
10.00	0.988	988	-0.1
12.50	0.902	902	-0.89
16.00	0.768	768	-2.28
20.00	0.636	636	-3.93
25.00	0.513	513	-5.8
31.50	0.405	405	-7.86
40	0.314	314	-10.05
50	0.246	246	-12.19
63	0.186	186	-14.61
80	0.132	132	-17.56
100	0.0887	88.7	-21.04
125	0.054	54	-25.35
160	0.0285	28.5	-30.91
200	0.0152	15.2	-36.38
250	0.0079	7.9	-42.04
315	0.00398	3.98	-48
400	0.00195	1.95	-54.2

ค่าที่แสดงในตารางที่ 4.4 เป็นค่าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองสัญญาณ (Filtering design) ตามหลักการที่นำเสนอไว้ในข้างต้น โดย Frequency-weighting filters, W_k จะถูกนำไปใช้สำหรับการประเมินผลกระทบด้านสุขภาพ (Health) ความรู้สึกและการรับรู้ (Comfort and perception) ทั้งนี้ค่าจากตารางที่ 4.4 สามารถแสดงในรูปของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่าการถ่วงน้ำหนักความถี่ (Frequency weighting curve)

4.3 การประเมินการสั่นสะเทือน (Vibration evaluation)

4.3.1 การประเมินโดยวิธีพื้นฐาน (Basic evaluation method)

การประเมินถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในมาตรฐาน ISO 2631 ได้ใช้ตัวแปรหลักคือความเร่ง ซึ่งความเร่งที่ใช้ในการประเมินเป็นความเร่งที่ได้จากระบบการกรองสัญญาณแบบการถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration, $a_w(t)$) โดยนำค่าความเร่งหลังผ่านการกรองสัญญาณไปทำการหาค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted root mean square acceleration; RMS, a_w) ดังสมการที่ 4.6

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

โดยที่ $a_w(t)$ คือ ความเร่งที่ได้จากระบบการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration) ในหน่วย m/s^2

T คือ ช่วงคาบเวลาของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน ในหน่วยวินาที (s)

ทั้งนี้การนำค่าการประเมินโดยวิธีพื้นฐานนี้ไปเข้าสู่กระบวนการประเมินจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของความแม่นยำในการประเมินซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณความเร่งที่จะนำมาทำการประเมินนั้นจะต้องเป็นสัญญาณที่มีค่าสัดส่วนระหว่างค่าความเร่งสูงสุดหลังผ่านการกรองสัญญาณ (แบบถ่วงน้ำหนัก) และค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.6 จะต้องไม่เกิน 9 เนื่องจากสัญญาณความเร่งที่จะนำมาทำการประเมินมีค่าสัดส่วนดังกล่าวสูงกว่า 9 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของสัญญาณมีความแตกต่างกันมาก ทำให้ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองซึ่งมีความไวไม่เพียงพอสำหรับการประเมินสัญญาณในลักษณะเช่นนี้ จึงทำให้ค่าที่ได้จากการประเมินขาดความแม่นยำ ดังนั้นในการเลือกใช้วิธีการประเมินแบบพื้นฐานจะต้องมีการตรวจสอบค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความเร่งสูงสุดหลังผ่านการกรองสัญญาณ (แบบถ่วงน้ำหนัก) และค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักก่อนที่จะทำการประเมิน ซึ่งค่าอัตราส่วนที่ว่านี้ได้ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 2631 ให้มีชื่อเรียกว่า ค่า Crest factor ซึ่งค่า Crest factor นี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นโมดูลัสของสัญญาณที่สามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงดัชนีความคงที่ของสัญญาณได้ กล่าวคือหากสัญญาณที่มีค่า Crest factor ต่ำหมายถึงสัญญาณที่มีลักษณะคงที่เนื่องจากค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน ในทางกลับกันค่า Crest factor ที่มีค่าสูงจะแสดงให้เห็นถึงความไม่คงที่ของสัญญาณเนื่องจากค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ตามมาตรฐาน ISO 2631 นี้ได้ระบุค่าดัชนีความเป็นกลางของค่า Crest factor ไว้เท่ากับ 9

4.3.2 การประเมินการสั่นสะเทือนในกรณีที่ใช้วิธีการประเมินพื้นฐานไม่เพียงพอ (Additional evaluation method)

ในกรณีที่สัญญาณมีลักษณะกระโดดกล่าวคือ มีค่า Crest factor สูงกว่า 9 ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา การประเมินโดยวิธีพื้นฐานไม่เพียงพอดังนั้นเพื่อให้การประเมินมีความแม่นยำและสามารถใช้สำหรับการประเมินสัญญาณในลักษณะนี้ได้ มาตรฐาน ISO 2631 จึงได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ที่ให้ความไวสูงกว่าการใช้ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือ The forth power vibration dose method ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความเร่งสูงกว่า เนื่องจากในการคำนวณค่าเฉลี่ยที่จุดของช่วงเวลาด้วยการใช้กำลังสี่ ซึ่งค่าดังกล่าวถูกเรียกว่า ค่า Vibration Dose หรือ VDV ดังสมการที่ 4.7

$$VDV = \left[\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.7)$$

โดยที่ $a_w(t)$ คือ ความเร่งที่ได้จากกระบวนการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration) ในหน่วย m/s^2

T คือ ช่วงคาบเวลาของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน ในหน่วยวินาที (s)

ในกรณีที่การสั่นสะเทือนมีการกระทำอย่างต่อเนื่องหลายช่วงเวลา ค่า Vibration Dose หรือ VDV สามารถรวมค่าในแต่ละช่วงของเวลาได้โดยการทางคณิตศาสตร์โดยการเฉลี่ยแบบเรขาคณิตด้วยกำลังสี่ดังสมการที่ 4.8

$$VDV_{total} = \left[\sum_i VDV_i^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.8)$$

4.4 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือน

มาตรฐาน ISO 2631 ได้ระบุแนวทางในการประเมินถึงผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดจากการสั่นสะเทือน โดยได้นำเสนอเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ระบุถึงการสั่นสะเทือนที่กระทบต่อสุขภาพซึ่งมีผลมาจากการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนและการสั่นสะเทือนนั้นยังได้กระทำซ้ำๆ อยู่เรื่อยๆ เมื่อระยะเวลายาวนานออกไป ทั้งนี้เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินถึงผลกระทบต่อสุขภาพภายใต้การสั่นสะเทือนที่นำเสนอโดยมาตรฐาน ISO นี้สามารถใช้ได้กับบุคคลที่มีสุขภาพเป็นปกติ และไม่พิจารณาถึงการสั่นสะเทือนที่รุนแรงมากหรือการสั่นสะเทือนที่มีขนาดของสัญญาณสูงในลักษณะชั่วคราวครั้งชั่วคราว (High magnitude single transients) ยกตัวอย่างเช่น การเกิดอุบัติเหตุทางยานพาหนะรวมไปถึงการได้รับบาดเจ็บ

4.4.1 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในกรณีที่ ค่า Crest factor < 9

ในกรณีที่สัญญาณความเร่งมีลักษณะที่ค่อนข้างคงที่กล่าวคือสัญญาณความเร่งมีขนาดสูงสุดไม่ต่างจากค่าความเร่งเฉลี่ยมากนั้น สามารถใช้ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted r.m.s. acceleration value) ซึ่งการตรวจสอบลักษณะของสัญญาณสามารถทำได้โดยการใช้ค่า Crest factor (< 9) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพโดยสัญญาณความเร่งในกรณีที่ใช้ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก (Crest factor < 9) สามารถคำนวณค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักโดยใช้หลักการทางพลังงานเพื่อขยายช่วงเวลาของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนออกปดังสมการที่ 4.9

$$a_{w1} \cdot T_1^{\frac{1}{2}} = a_{w2} \cdot T_2^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

โดยที่ a_{w1} และ a_{w2} คือ ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักในช่วงเวลาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีหน่วยเป็น m/s^2

T_1 และ T_2 คือ ช่วงคาบเวลาของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนในช่วงเวลาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

ในบางกรณีพบว่าสมการที่ 6.9 สามารถพิจารณาให้เป็นรากที่สี่ได้เช่นกัน ดังสมการที่ 4.10

$$a_{w1} \cdot T_1^{\frac{1}{4}} = a_{w2} \cdot T_2^{\frac{1}{4}} \quad (4.10)$$

โดยที่ a_{w1} และ a_{w2} คือ ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักในช่วงเวลาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีหน่วยเป็น $\text{m/s}^{1.75}$

T_1 และ T_2 คือ ช่วงคาบเวลาของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนในช่วงเวลาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

กรณีที่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในหลายช่วงเวลา มาตรฐาน ISO 2631 ได้นำเสนอสมการในการคำนวณค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักเทียบเท่าดังสมการที่ 6.11

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

โดยที่ $a_{w,e}$ คือ ค่าขนาดของความเร่งเทียบเท่า (ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก มีหน่วยเป็น m/s^2)

a_{wi} คือ ค่าขนาดของความเร่ง (ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักมีหน่วยเป็น m/s^2) ในช่วงเวลา T_i

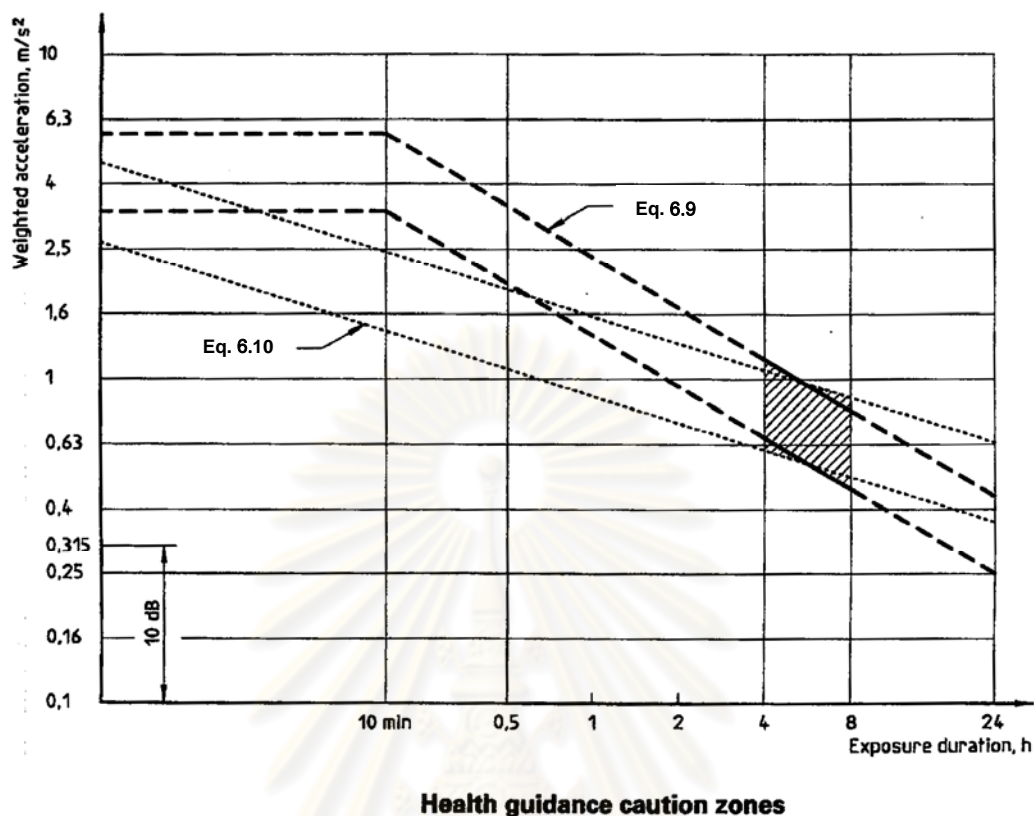
ในทำนองเดียวกันสมการที่ 4.11 สามารถพิจารณาในรูปของรากที่สี่ได้ดังสมการที่ 4.12

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^4 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.12)$$

โดยที่ $a_{w,e}$ คือ ค่าขนาดของความเร่งเทียบเท่า (ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก มีหน่วยเป็น $\text{m/s}^{1.75}$)

a_{wi} คือ ค่าขนาดของความเร่ง (ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักมีหน่วยเป็น m/s^2) ในช่วงเวลา T_i

จากสมการที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งเป็นสมการที่นำเสนอโดยมาตรฐาน ISO 2631 สามารถนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพเกณฑ์มาตรฐานของสุขภาพและขอบเขตที่ไผ่ระวัง ดังรูปที่ 4.3



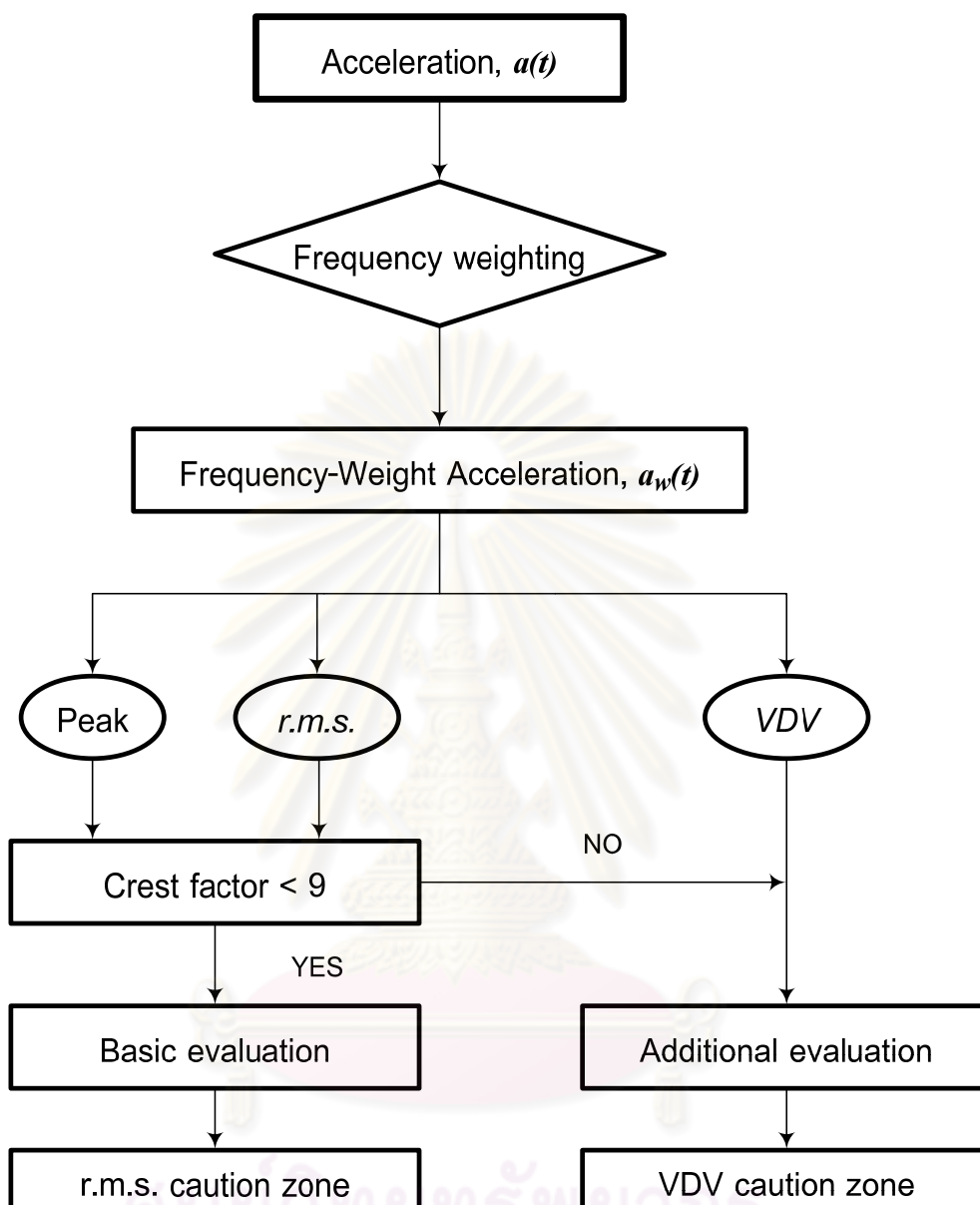
รูปที่ 4.3 แผนภาพเกณฑ์ผลกระทบต่อสุขภาพและขอบเขตเฝ้าระวัง (Health guidance caution zones)

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งแบบถ่วงน้ำหนักและเวลา โดยเกณฑ์มาตรฐานของ ISO 2631 พบว่าความสามารถในการอดทนของมนุษย์ที่อยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนจะลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป และจะเข้าถึงเขตที่ต้องเฝ้าระวังจากผลกระทบด้านสุขภาพเมื่อเวลาผ่านเข้าสู่ช่วง 4 ถึง 8 ชั่วโมง ซึ่งตรงกับส่วนที่แรเงาของแผนภาพในรูปที่ 4.3

4.4.2 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในกรณีที่มีค่า Crest factor > 9

ในกรณีที่สัญญาณความเร่งมีลักษณะกระโดด โดยพบได้จากการตรวจสอบค่า Crest factor ซึ่งมีค่าสูงกว่า 9 นั้นหมายความว่าสัญญาณมีค่าความเร่งสูงสุดต่างจากค่าความเร่งเฉลี่ยมาก ลักษณะของสัญญาณเช่นนี้ไม่สามารถใช้ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted r.m.s. acceleration value) ได้เนื่องจากจะทำให้ค่าที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง (underestimation) ดังนั้นมาตรฐาน ISO 2631 ได้แนะนำให้ใช้หลักการเช่นเดียวกับกับหัวข้อที่ 4.3.2 ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ค่า *VDV* ในการประเมินแทนที่ค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนักจากเดิม

สำหรับเกณฑ์และขั้นตอนในการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถสรุปขั้นตอนได้ในรูปแบบของแผนภาพแสดงขั้นตอน เพื่อให้เกิดความสะดวกในการดำเนินการตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนผังขั้นตอนในการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือน

4.5 การประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายและการรับรู้จากการสั่นสะเทือน

มาตรฐาน ISO 2631 ได้ให้ความสำคัญกับการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกของมนุษย์จากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งเริ่มต้นจากการรู้สึกได้ถึงสั่นสะเทือนเล็กน้อยจนถึงการสั่นสะเทือนที่ทำให้รู้สึกไม่สะดวกสบายอย่างรุนแรง (Extremely uncomfortable) โดยหลักการและวิธีการที่ใช้สำหรับการประเมินถึง

ความรู้สึกสะดวกสบายมีขั้นตอนที่คล้ายกันกับการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพอื่นเนื่องมาจากการสั่นสะเทือน กล่าวคือค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted r.m.s. acceleration value) สามารถถูกนำมาใช้ในการประเมินได้โดยตรงในกรณีี่สัญญาณมีลักษณะที่ค่อนข้างคงที่ (Crest factor < 9) แต่ในกรณีี่สัญญาณมีลักษณะกระโดด (Crest factor > 9) การใช้ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration value) จะมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการประเมิน ในขณะที่การใช้ค่า r.m.s. ในการประเมินจะให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้สำหรับการประเมินผลกระทบต่อความสะดวกสบายจากการสั่นสะเทือน (Guide to the effects of vibration on comfort) แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการประเมินผลกระทบต่อความสะดวกสบายจากการสั่นสะเทือน โดย ISO 2631

Weighted Acceleration Level (m/s ²)	Comfort Reaction of Passenger (ISO 2631-1)
Less than 0.315	not uncomfortable
0.315 to 0.50	a little uncomfortable
0.50 to 0.80	fairly uncomfortable
0.80 to 1.25	uncomfortable
1.25 to 2.00	very uncomfortable
Greater than 2.00	extremely uncomfortable

สำหรับเกณฑ์ในการประเมินถึงผลกระทบต่อการรับรู้ (Perception) จากการสั่นสะเทือน ตามมาตรฐาน ISO 2631 ได้ระบุไว้ว่าบุคคลทั่วไปจะสามารถรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนในแนวตั้งด้วยขนาดความเร่งสูงสุด (peak magnitude) ที่ 0.015 m/s² ซึ่งมาตรฐาน ISO 2631-1 ยังได้ระบุว่าค่าความเร่งสูงสุดตามเกณฑ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะลดลงน้อยมากแม้ช่วงของเวลาในการสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเกณฑ์ในการประเมินผลกระทบต่อการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนที่กล่าวมาจะไม่เพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น แต่ความรู้สึกได้ถึงการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าความเร่งสูงสุดมีค่าสูงกว่า 0.015 m/s²

4.6 การประเมินผลกระทบต่อภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว

ภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว (Motion sickness) คือภาวะที่เกิดจากความไม่สอดคล้องกันของการเคลื่อนไหวที่ได้จากการมองเห็นและการรับรู้ผ่านระบบรับรู้การเคลื่อนไหว (vestibular system's sense of movement) บางครั้งเรียกว่า อาการเมารถ เมาเรือ หรือเมาเครื่องบิน ตามสาเหตุ อาการที่พบบ่อยได้แก่ อาการเวียนศีรษะ อ่อนเพลีย คลื่นไส้ [16] จากตารางที่ 4.1 แสดงช่วงความถี่ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 Hz โดยสามารถทำการประเมินผ่านค่าที่คำนวณได้จากสมการที่

$$MSDV = \left[\int_0^T [a_w(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

โดยที่ $a_w(t)$ คือ ความเร่งที่ได้จากกระบวนการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนักในทิศทางตามแนวแกน z
(Weighted acceleration) ในหน่วย m/s^2
 T คือ ช่วงคาบเวลาของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน ในหน่วยวินาที (s)

ทั้งนี้ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.13 จะถูกนำไปประเมินตามเกณฑ์มาตรฐานที่นำเสนอโดย ISO 2631-1 ในรูปแบบของร้อยละความเป็นไปได้ที่จะเกิดภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว ซึ่งค่า $MSDV$ จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปร้อยละด้วยการคูณค่าสัมประสิทธิ์ K_m โดยค่าสัมประสิทธิ์ K_m จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน เช่น สภาพทางร่างกายของมนุษย์ที่แตกต่างระหว่างเพศและวัย เนื่องจากความสามารถในการอยู่ภายใต้มลภาวะทางความรู้สึกจากการสั่นสะเทือนของมนุษย์มีความแตกต่างกันระหว่างเพศชายและหญิงรวมถึงวัยที่ต่างกันระหว่างวัยเด็ก ผู้ใหญ่ และคนชรา อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีทั่วไปที่ไม่คำนึงถึงความแตกต่างทางเพศและวัยค่าสัมประสิทธิ์ K_m สามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1/3 ได้ เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการประเมิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดสอบสะพานในภาคสนาม

ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปัญหาสะพานและรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน โดยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาถูกแทนด้วยรถยนต์ระบบของศาสตร์เดี่ยวที่ติดอยู่บนสะพานซึ่งแทนด้วยคันช่วงเดี่ยวซึ่งมีการสั่นไหวที่จุดรองรับของคาน ทั้งนี้สัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของคานในแบบจำลองจะต้องถูกป้อนเข้าสู่แบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ผ่านสมการการเคลื่อนที่ที่เกิดปฏิกิริยากระทำร่วมกันระหว่างรถยนต์และสะพาน (Vehicle-Bridge Interaction) ในแบบจำลอง เพื่อให้การจำลองสถานการณ์มีความใกล้เคียงความเป็นจริงที่เกิดขึ้นกับจุดรองรับของสะพานมากที่สุดจำเป็นต้องมีการหาสัญญาณที่มีความสอดคล้องกับปัญหาจริงอันส่งผลถึงการสั่นสะเทือนกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ซึ่งการจำลองสถานการณ์ขึ้นด้วยการสังเคราะห์สัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับในคอมพิวเตอร์นั้นทำได้ยากลำบากยิ่งอีกทั้งยังไม่สามารถรับรู้ถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของสะพานได้อย่างแท้จริง ดังนั้นการที่จะให้ได้มาซึ่งสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานและรับทราบถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบสะพานในภาคสนาม (Bridge Test)

สัญญาณการสั่นไหวที่เป็นตัวแปรสำคัญเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงประกอบไปด้วยสัญญาณความเร่งและสัญญาณการกระจัดซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.17) กล่าวคือในสมการที่ (2.17) ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ประกอบด้วยพิกัดทั่วไปของสะพานและรถยนต์คือ $\ddot{q}(t)$ $\dot{q}(t)$ และ $q(t)$ ส่วนชุดที่ 2 คือสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานประกอบด้วยความเร่ง $\ddot{q}_s(t)$ และการกระจัด $q_s(t)$ แต่ในส่วนของสัญญาณการสั่นไหวที่ปลายจุดรองรับของสะพานสามารถหาค่าได้เมื่อทำการทดสอบสะพานจริงซึ่งสัญญาณความเร่งและการกระจัดที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานจากการทดสอบจะถูกนำไปป้อนเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถคำนวณค่าพิกัดทั่วไปของสะพานและรถยนต์ได้ตามขั้นตอนการแก้สมการที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

การทดสอบสะพานในภาคสนามสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกสะพานข้ามทางแยกแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร เป็นสะพานที่ใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบจะแยกออกเป็น 2 กรณี กรณีแรกเป็นการศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจำลองสถานการณ์ด้วยการเคลื่อนที่ผ่านโดยรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้สำหรับการทดสอบในทิศทางตรงข้าม ในกรณีนี้จะทำการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์และประเมินในขั้นต้นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานก่อนที่จะขยายผลจากการวิเคราะห์ไปสู่การทดสอบในกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลการสั่นไหวที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานในสภาวะการใช้งานจริงของสะพานภายใต้การจราจรปกติ ทั้งนี้รายละเอียดของการทดสอบสะพานจริงในสนามทั้ง 2 กรณีนี้จะได้กล่าวในหัวข้อที่ 5.2 และ 5.3 ต่อไป

5.1 ลักษณะทั่วไปของสะพานข้ามทางแยก

สะพานข้ามทางแยกซึ่งเป็นโครงสร้างหลักประกอบด้วย โครงสร้างหลักที่อยู่เหนือพื้นดิน (Super structure) ได้แก่ เสาเหล็กกลมแบบเชื่อมประกอบ (Pier) คานเหล็กประกอบทางขวาง (Cross beam) คานเหล็กประกอบแบบ I-Girder พื้นสะพานคอนกรีตแบบสำเร็จรูป โดยคานเหล็กประกอบจะทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากพื้นสะพานลงสู่ปลายทั้งสองข้างของคานขวางในแต่ละด้านที่มีทิศทางจราจรสวนทางกัน ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างสะพานเหล็กข้ามทางแยกแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 5.2 สภาพการจราจรบนสะพานข้ามทางแยกในกรุงเทพมหานครที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก

ปัญหาจากสภาพการจราจรที่แตกต่างกันอย่างมากในแต่ละทิศทางการจราจรดังรูปที่ 4.2 ส่งผลให้เมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัวจะเกิดการสั่นไหวส่งผ่านไปยังฝั่งตรงข้ามที่มียานพาหนะจอดติดอยู่บนสะพาน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในห้องโดยสารรู้สึกได้อย่างรุนแรง โดยคานขวางเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่เป็นจุดรองรับของสะพานหลักในแต่ละทิศทางการจราจรจึงเป็นสาเหตุของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพานเมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัว

5.1.1 สะพานข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบ

สะพานข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบเพื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นไหวสำหรับงานวิจัยนี้มีความยาวช่วงสะพานทั่วไปช่วงละ 25 เมตร และมีระยะทางรวม 2100 เมตร สะพานข้ามทางแยกแห่งนี้มีรูปแบบเป็นโครงสร้างเหล็กขนาด 2 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) พื้นสะพานเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีคานสะพานเหล็กเป็นโครงสร้างรองรับ และคานสะพานเหล็กได้ถ่ายน้ำหนักด้วยการวางตัวอยู่บนคานขวางในแต่ละข้างเช่นเดียวกับสะพานข้ามทางแยกทั่วไป



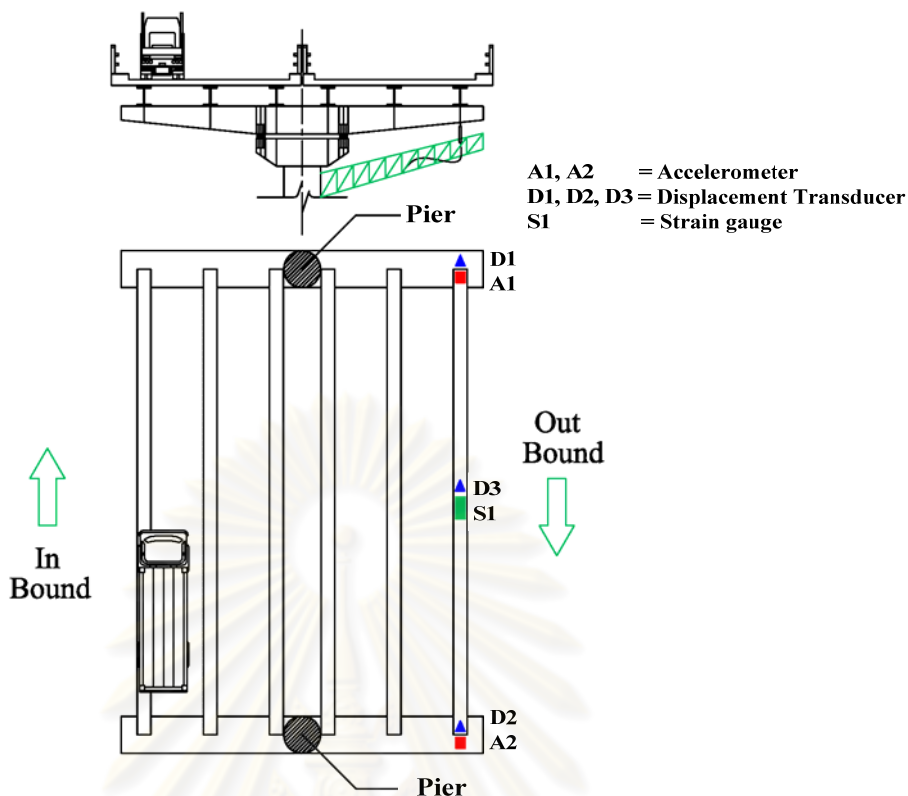
รูปที่ 5.3 สะพานเหล็กข้ามทางแยกที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5.4 ภาพสำนักงานชั่วคราวที่ใช้สำหรับการทดสอบสะพาน

5.2 การทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นเพื่อให้ทราบถึงปัญหาตลอดจนถึงการประเมินความรุนแรงในการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์พาดนะโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบสะพานเพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณความเร่งและการกระจัดที่ปลายของคานขวางซึ่งเป็นจุดรองรับทั้งสองข้างของคานสะพานที่ถูกใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองสถานการณ์โดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกซึ่งเป็นการสร้างสัญญาณขึ้นกับตัวสะพานโดยมีตำแหน่งบนสะพานที่สำคัญและเป็นตำแหน่งที่ต้องการทราบถึงข้อมูลสัญญาณคือที่ปลายคานขวาง การจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (sensor) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (Displacement Transducer; DT) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร่ง (Acceleration transducers หรือ Accelerometer; AS) โดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (D1 D2) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร่ง (A1 A2) ที่ตำแหน่งปลายของคานขวางเป็นไปตามแผนผังการติดตั้งในรูปที่ 4.5 ส่วนค่าการแอมพลิจูดและความเครียดที่ตรวจวัดได้บริเวณกึ่งกลางคานสะพาน (D3, S1) จะถูกใช้เพื่อประกอบการประเมินหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองคานสะพานเพื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 5.5 แสดงผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน

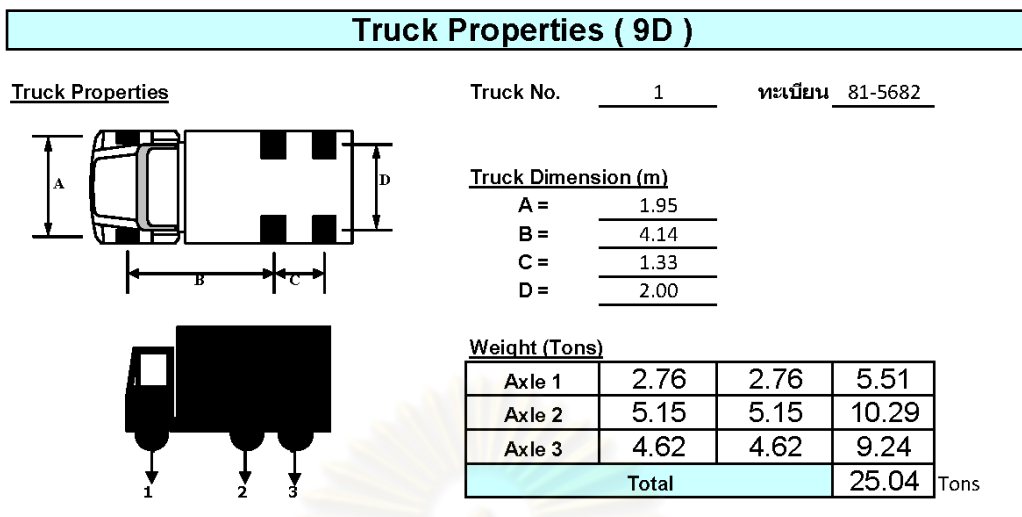


รูปที่ 5.6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่สะพานทดสอบจริงในสนาม



รูปที่ 5.7 ภาพขยายการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ปลายคานขวาง

ในการทดสอบสะพานด้วยการเคลื่อนที่ผ่านโดยรถบรรทุกนั้นได้เลือกใช้รถบรรทุกชนิดสิบล้อ (3 เพลา) ที่มีน้ำหนักบรรทุกไม่เกินค่าตามที่กฎหมายกำหนดเท่ากับ 25 ตัน เพื่อมิให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างสะพาน โดยการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกจะแบ่งการทดสอบออกเป็นความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกทั้งหมด 3 ระดับคือ 5, 30 และ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 5.8 แสดงขนาดและน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

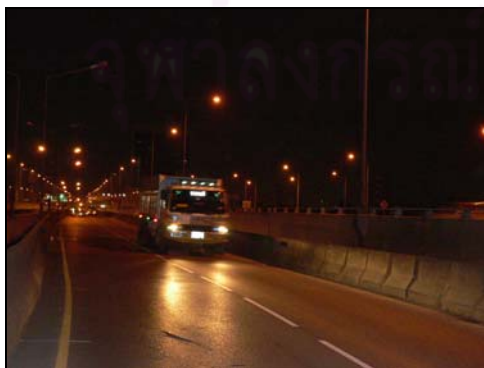
ทั้งนี้รถบรรทุกวิ่งผ่านยังฝั่งตรงข้ามของสะพานที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณในช่องทางจราจรซ้ายสุด (ใกล้ที่ปลายของคานขวางในฝั่งตรงข้าม) เนื่องจากเป็นกรณีที่เกิดค่าวิกฤติ



รูปที่ 5.9 ภาพแสดงการชั่งน้ำหนัก
รถบรรทุกที่ด้านชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ



รูปที่ 5.10 แสดงผลการชั่งน้ำหนักของ
รถบรรทุกที่ด้านชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 5.11 ภาพแสดงการวิ่งผ่านของ
รถบรรทุกทดสอบบนสะพาน



รูปที่ 5.12 ภาพแสดงเครื่องบันทึกข้อมูลที่
วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ

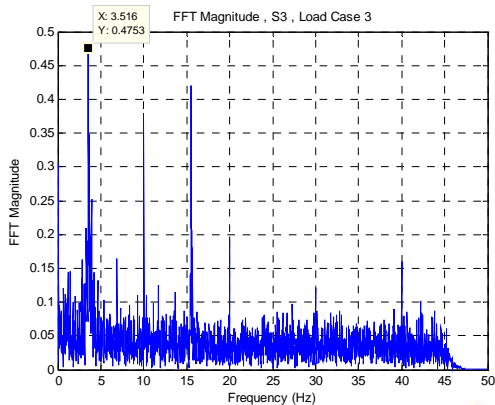
5.2.1 ผลการตรวจวัดสะพานจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

ผลการตรวจวัดจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกสามารถทำให้ทราบถึงการสั่นไหวที่ปลายของคานขวางสะพานทั้งในส่วนของค่าความเร่งและการกระจัด เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปนําเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นผ่านตัวแปร $\ddot{q}_s(t)$ และ $q_s(t)$ จนนำไปสู่ผลการวิเคราะห์โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 โดยข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของตัวเลขดิจิทัลที่ยังไม่ผ่านการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ประจำเครื่องมือแต่ละชิ้น (Calibration coefficient number) จึงต้องทำการแปลงค่าจากข้อมูลดิบที่ได้จากการตรวจวัดเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบของหน่วยการวัดสากล เช่นค่าความเร่งที่วัดได้โดยอุปกรณ์ Accelerometer จะอยู่ในรูปของหน่วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก g (มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2) ส่วนค่าการกระจัดที่วัดได้โดยอุปกรณ์ DT จะอยู่ในรูปของหน่วยระยะการกระจัดซึ่งในที่นี้ใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) นอกจากนี้ค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจวัดเหล่านี้แล้วยังสามารถนำสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดมาหาค่าความถี่ธรรมชาติของตัวคานสะพานที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณทั้งในส่วนของการกระจัดและความเครียด จากรูปที่ 5.5 ที่กลางช่วงของคานสะพานมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจัด (DT) และ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเครียด (Strain gauge) ทั้งนี้ อุปกรณ์ทั้งสองอย่างถูกติดตั้งเข้ากับคานสะพานโดยตรงจึงสามารถนำมาหาค่าความถี่ธรรมชาติของคานสะพานได้ซึ่งมีความแตกต่างจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณความเร่งและการกระจัดที่ปลายคานขวางที่ถูกติดตั้งเข้ากับปลายคานขวางซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันเนื่องจากเป็นส่วนโครงสร้างที่แตกต่างกันทั้งในส่วนของความแข็งและมวลของแต่ละโครงสร้างที่ไม่เท่ากัน

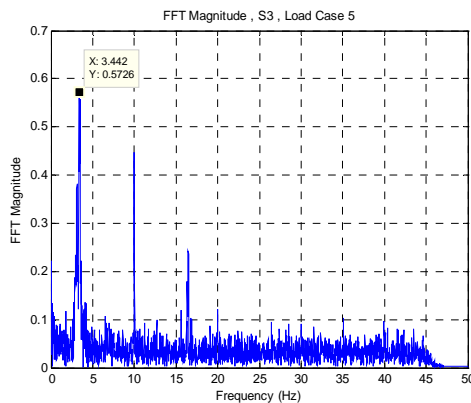
5.2.1.1 การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้

การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้โดยตรงสามารถทำได้โดยการใช้หลักการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform; FFT) ซึ่งเป็นหลักการวิเคราะห์สัญญาณแบบผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency response) ที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความถี่ (Magnitude-Frequency) โดยค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะแสดงออกมาในรูปแบบของขนาดที่โดดเด่น ณ ตำแหน่งที่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติบนแกนความถี่ ซึ่งวิธีการนี้เป็นผลจากการประมาณแต่ให้ค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



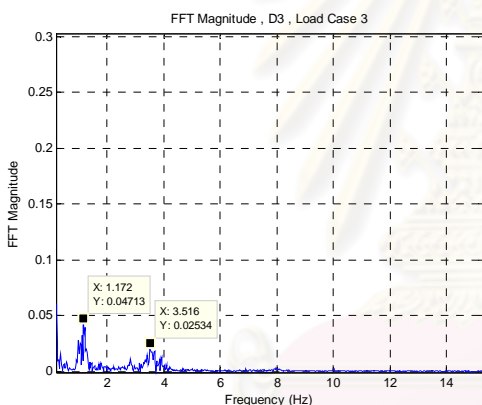
(ก)



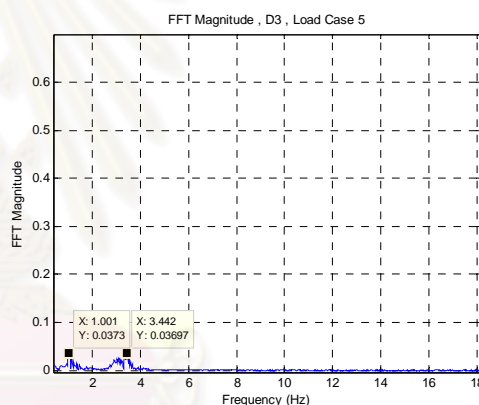
(ข)

รูปที่ 5.13 ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณความเครียด (ก) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr

(ข) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.14 ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของสัญญาณการกระจัด (ก) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr

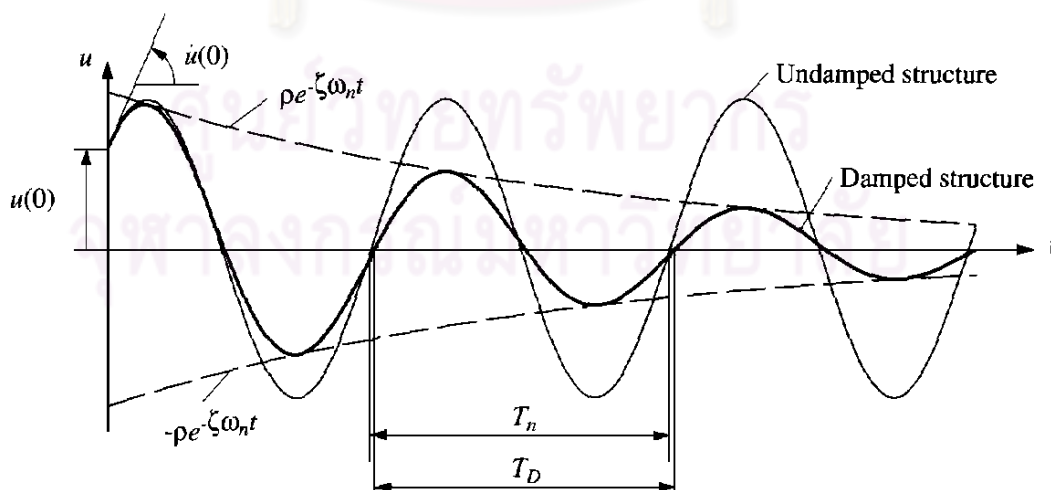
(ข) กรณีที่รถบรรทุกทดสอบวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่าค่าขนาดการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT Magnitude) มีค่าที่โดดเด่นอยู่สองย่านความถี่ โดยกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วในการวิ่งผ่านเท่ากับ 30 km/hr นั้นขนาดที่โดดเด่นปรากฏอยู่ในย่านความถี่ที่มีค่าเท่ากับ 1.172 และ 3.516 Hz ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วในการวิ่งผ่านเท่ากับ 60 km/hr นั้นขนาดที่โดดเด่นปรากฏอยู่ในย่านความถี่ที่มีค่าเท่ากับ 1.00 และ 3.442 Hz ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าความถี่ทั้งสองย่านในแต่ละกรณีมีย่านความถี่ที่ใกล้เคียงกัน โดยขนาดที่โดดเด่นปรากฏในย่านความถี่แรกเป็นความถี่ที่ต่ำกว่าซึ่งความถี่ย่านนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสะพานในช่วงแรกของการเคลื่อนตัวตามการสั่นไหวของจตุรองรับสะพานโดยปราศจากการดัด (Rigid body motion)

ดังนั้นความถี่ในย่านนี้จึงยังไม่ใช่ค่าความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของสะพาน ทั้งนี้เมื่อเวลาผ่านไปการเคลื่อนตัวของสะพานอันเกิดขึ้นมาจากการตัดจะปรากฏให้เห็นได้ด้วยขนาดที่โดดเด่นในภายหลังซึ่งจากรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่าตรงกับย่านความถี่ที่มีค่าเท่ากับ 3.516 และ 3.442 Hz เมื่อมีการวิ่งผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 30 และ 60 km/hr ตามลำดับซึ่งความถี่ดังกล่าวนี้คือความถี่ธรรมชาติของสะพานอันเนื่องมาจากการตัดในโหมดที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดหลักเนื่องจากปรากฏขนาดที่เด่นชัดเพียงโหมดเดียว ดังสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 5.14 (ก) และ (ข) ที่ไม่ปรากฏขนาดที่โดดเด่นภายหลังจากผ่านความถี่ในย่านดังกล่าว และเมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยความถี่จะทำให้ทราบได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานมีค่าเท่ากับ 3.51 Hz ดังที่ได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานในบทที่ 3 ดังตารางที่ 3.2 พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.58 Hz ซึ่งค่าที่ใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดสะพานโดยการทดสอบเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติของคาน ค่า EI และมวลต่อหน่วยความยาวดังสมการที่ 3.2 ทำให้สามารถหาค่า EI ได้เมื่อทราบค่าความถี่ธรรมชาติของคานและค่ามวลต่อหน่วยความยาว ส่วนค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio; ζ) สามารถหาค่าได้จากสัญญาณโดยใช้หลักการทดสอบแบบการสั่นไหวอิสระ (Free Vibration Tests) หลักการนี้เป็นการนำสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้มาพิจารณาเพื่อหาช่วงที่สัญญาณมีการสั่นไหวในลักษณะแบบการสั่นไหวอิสระหรือใกล้เคียงที่สุด จากนั้นจะใช้หลักการการสั่นไหวแบบอิสระเพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากขนาดที่ลดลงจากผลกระทบของความหน่วงหรือที่เรียกว่า ขนาดการสั่นไหวที่เสื่อมถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential decrement) ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.15 โดยขนาดการสั่นไหวสูงสุดของแต่ละลูกคลื่นจะมีค่าที่ลดลงเรื่อยๆตามสมการความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล $\delta(t)$

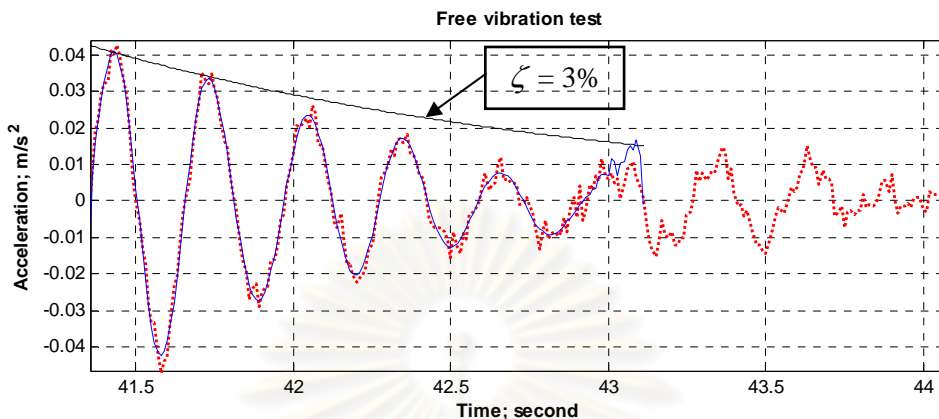
$$\delta(t) = \rho e^{-\zeta\omega_n t} \tag{4.1}$$

โดยที่
$$\rho = \sqrt{[u(0)]^2 + \left[\frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \right]^2} \tag{4.2}$$



รูปที่ 5.15 ผลกระทบของความหน่วงต่อการสั่นไหวแบบอิสระ

ทั้งนี้การหาสัญญาณการสั่นไหวในช่วงที่มีการสั่นแบบอิสระอาจจะทำได้ง่ายกว่าในสัญญาณความเร่งเนื่องจากสัญญาณความเร่งจะมีการแสดงช่วงการสั่นไหวแบบอิสระที่ชัดเจนกว่า โดยผลการทดสอบจากการสั่นไหวแบบอิสระที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถประมาณค่าอัตราส่วนความหน่วง ζ ได้เท่ากับ 0.03



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบสัญญาณความเร่งในช่วงที่มีการสั่นไหวแบบอิสระ

จากการสมมติค่าความหน่วงมีค่าเท่ากับ 0.02 สำหรับโครงสร้างเหล็กที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เป็นการใช้อัตราส่วนความหน่วงทั่วไปตามชนิดของวัสดุที่ใช้กับโครงสร้าง อย่างไรก็ตามแม้ว่าโครงสร้างสะพานที่มีส่วนของโครงสร้างหลักเป็นโครงสร้างเหล็กซึ่งมีค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยทั่วไปเท่ากับ 0.02 (2%) แต่จากผลการวิเคราะห์สัญญาณพบว่าค่าความหน่วงมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ถูกสมมติขึ้นสำหรับโครงสร้างเหล็ก ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรมเป็นแบบคอมโพสิตเนื่องจากพื้นสะพานเป็นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดเทพื้นหน้า จึงทำให้ค่าอัตราส่วนมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กทั่วไป สำหรับ ค่าคุณสมบัติของคานสะพานที่ได้มาจากการทดสอบสะพานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติของสะพานที่ได้จากการทดสอบสะพานจริง

ω_1 (Hz)	EI (N-sq.m)	ζ
3.51	4.64×10^9	0.03

ค่าที่ได้จากการทดสอบในตารางที่ 5.1 เป็นค่าที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบ แต่มีความใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากสภาพที่แท้จริงของสะพานจึงมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับความเป็นจริง

5.3 การทดสอบสะพานจริงเมื่อสะพานอยู่ในสภาวะการใช้งานภายใต้การจราจรปกติ

จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ทำให้สามารถนำค่าสัมมูลญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของคานสะพานซึ่งเป็นปลายคานขวางของสะพานตลอดจนการหาค่าคุณสมบัติของสะพานจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้จริง จะถูกนำไปประเมินผลกระทบต่อการสั่นไหวที่เกิดขึ้นกับรถยนต์เมื่อจุดรองรับของสะพานเกิดการสั่นไหว ทั้งนี้การวิเคราะห์และประเมินผลที่เกิดจากการทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ขึ้นนี้เป็นเพียงแค่การประเมินถึงผลกระทบขั้นต้นเพื่อให้เห็นถึงปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นเท่านั้น เนื่องจากในสภาพการจราจรจริงของสะพานนั้นไม่อนุญาตให้รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานเหล็กข้ามทางแยก อีกทั้งสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกภายในกรุงเทพมหานครส่วนมากจะวิ่งผ่านสะพานข้ามทางแยกด้วยความเร็วสูงในทิศทางที่การจราจรคล่องตัว ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกมีความเร็วสูงสุดที่ 60 km/hr แต่ในความเป็นจริงรถยนต์วิ่งผ่านสะพานข้ามทางแยกด้วยความเร็วที่สูงกว่านั้น เมื่อการจราจรมีความคล่องตัวมาก ทำให้สภาพของปัญหาที่มีความแตกต่างออกไปจากการจำลองสถานการณ์ขึ้นเพื่อทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องและใกล้เคียงสภาวะการจราจรจริงมากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอรายละเอียดของการทดสอบภายใต้สภาพการจราจรปกติบนสะพานข้ามทางแยก

5.3.1 การเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวของสะพานแบบระยะยาวภายใต้สภาพการจราจรปกติ

การเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวของสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติจะกระทำต่อเนื่องมาจากการทดสอบสะพานจากการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก โดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณยังคงถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งเดิมแต่มีการบันทึกภาพเหตุการณ์ต่างๆบนสะพานผ่านกล้องวงจรปิดเพื่อสังเกตสภาพการจราจรให้เกิดความสอดคล้องกับสัญญาณ เมื่อสะพานมีการเปิดให้บริการตามปกติอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณจะมีการส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลภายในสำนักงานชั่วคราวที่อยู่บริเวณใต้สะพาน เช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 5.2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนสะพานซึ่งถูกบันทึกโดยกล้องวงจรปิดพบว่าเหตุการณ์ที่การจราจรในแต่ละทิศทางมีความแตกต่างกันมากจะเกิดขึ้นใน 2 ช่วงเวลากล่าวคือในช่วงเวลาเข้าการจราจรในฝั่งขาเข้า (In Bound) จะมีการจราจรที่ติดขัดในขณะที่การจราจรในฝั่งขาออก (Out Bound) จะมีสภาพการจราจรที่คล่องตัวมากเนื่องจากเนื่องรูปแบบการดำเนินชีวิตของประชากรในเมืองหลวงที่พักอาศัยอยู่บริเวณรอบนอกแต่มักจะเดินทางเข้ามายังใจกลางกรุงเทพมหานครเพื่อประกอบธุรกิจหรือแม้แต่การเดินทางเข้ามายังสถานศึกษาของนักเรียนและนักศึกษา ทำให้เกิดการจราจรที่หนาแน่นบนสะพานข้ามทางแยกในขาเข้าในทางกลับกันเมื่อถึงช่วงเวลาเย็นการจราจรจะเกิดความหนาแน่นอย่างมากในทิศทางที่สลับกับช่วงเวลาเช้าเนื่องจากประชากรต่างเดินทางกลับไปยังที่พักอาศัยที่ตั้งอยู่บริเวณรอบนอกกรุงเทพมหานครทำให้เกิดการจราจรที่หนาแน่นบนสะพานข้ามทางแยกในขาออก ดังนั้นเหตุการณ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นคือเหตุการณ์ที่กล่าวไว้ข้างต้นทั้ง 2 ช่วงเวลา แต่ในที่นี้จะพิจารณาเพียงช่วงเวลาเย็นเนื่องจากได้มีติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณไว้ในทิศทางขาออก (Out Bound) ซึ่งมีความหนาแน่นอย่างมากของการจราจรในช่วงเย็นในขณะที่ฝั่งกลับกันมีการจราจรที่คล่องตัว

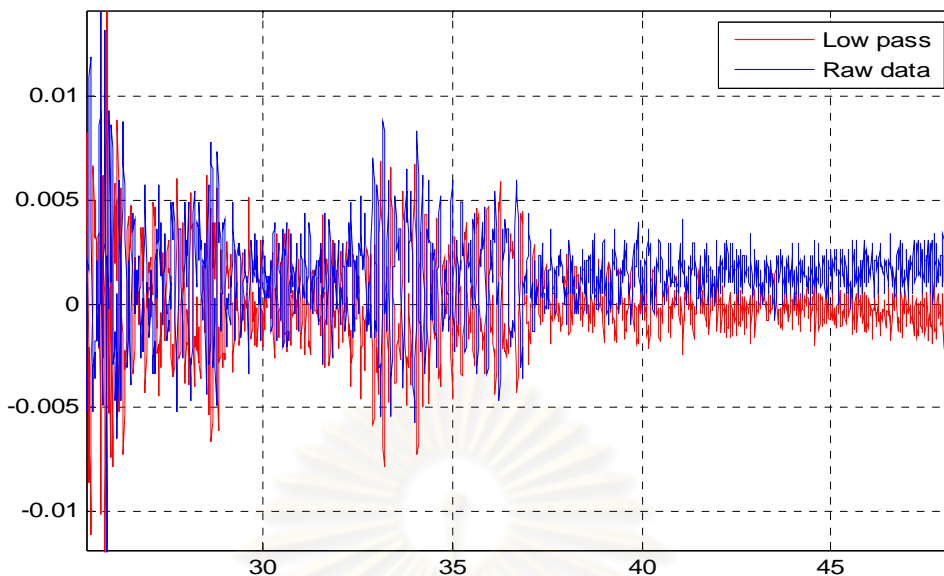


รูปที่ 5.17 การจราจรบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกในช่วงเวลาเย็นที่จับภาพโดยกล้องวงจรปิด

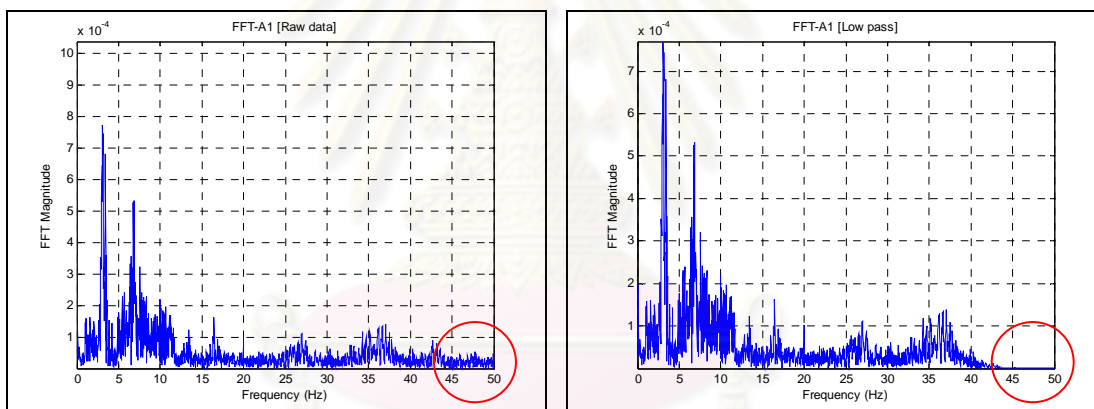
5.4 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริง

5.4.1 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบสะพานจะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (sensor) และจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณดังรูปที่ 5.9 เมื่อการบันทึกข้อมูลเสร็จสิ้นจะมีการนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้ดังกล่าวมาทำการแปลงค่าด้วยค่าคงที่ประจำเครื่องมือแต่ละชิ้น (Calibration coefficient number) ให้อยู่ในรูปแบบของหน่วยการวัดสากลตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1 นอกจากนี้ข้อมูลดิบของสัญญาณที่ตรวจวัดได้อาจจะต้องผ่านกระบวนการกรองความถี่แบบดิจิตอล (Digital filter) เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณทุกชนิดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดสัญญาณรบกวนความถี่สูงจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาในระหว่างการทดสอบ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกรองสัญญาณด้วยกระบวนการกรองความถี่แบบดิจิตอลเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว โดยความถี่ที่ใช้ในการกรองเป็นค่าความถี่ที่สูงดังนั้นในกระบวนการคัดกรองความถี่นี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดหลักที่ใช้ในการพิจารณา ซึ่งค่าความถี่ที่พบเห็นได้ทั่วไปจากอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีค่าความถี่ที่สูงกว่า 40 Hz



รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความถี่ที่วัดได้ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการกรองความถี่



(ก)

(ข)

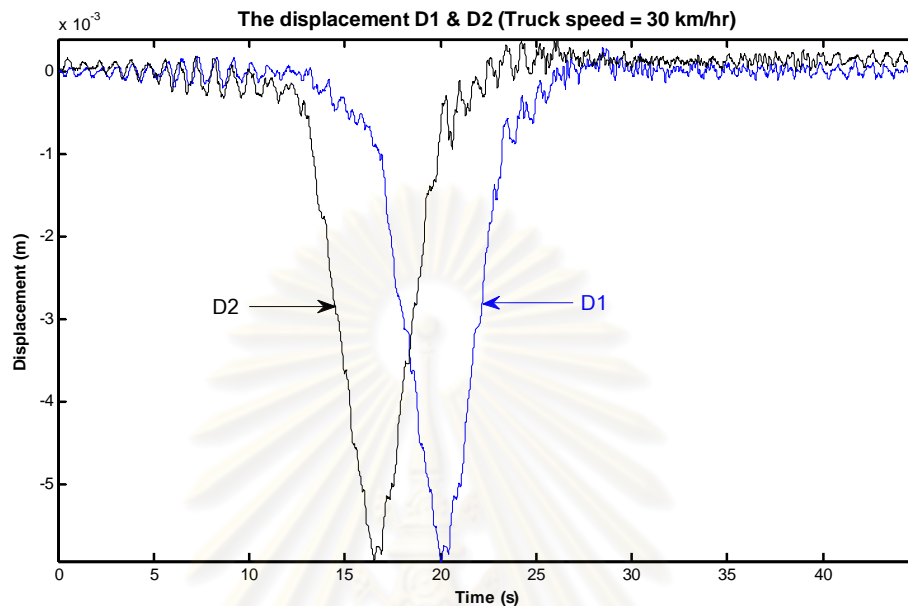
รูปที่ 5.19 การวิเคราะห์ค่าความถี่ของตัวอย่างสัญญาณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

(ก) ความถี่ของตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้ก่อนผ่านกระบวนการกรองความถี่

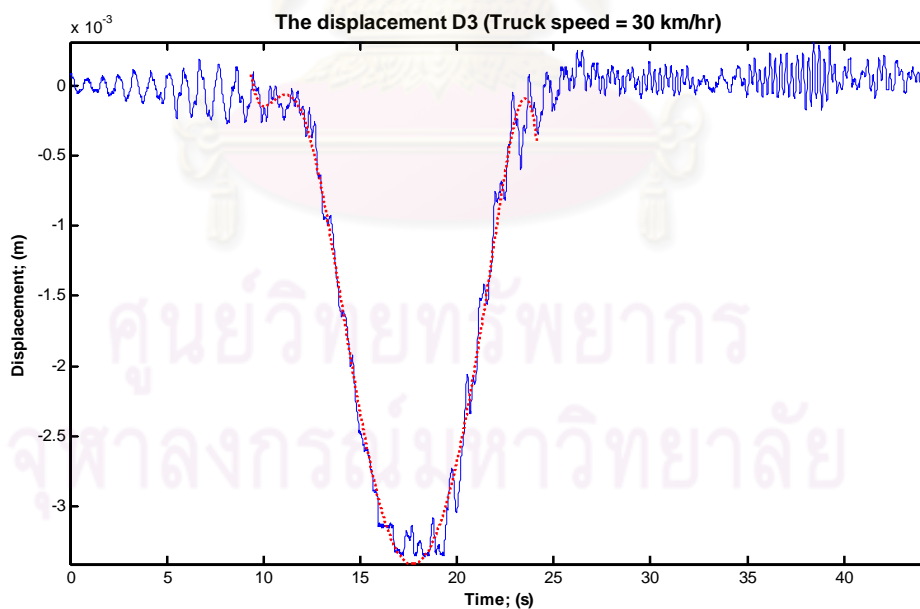
(ข) ความถี่ของตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้หลังผ่านกระบวนการกรองความถี่

จากรูปที่ 5.18 พบว่าสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดโดยที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกรองความถี่จะมีลักษณะของสัญญาณที่ไม่ผ่านรอบแกนศูนย์ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ใช้หรือขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำสัญญาณดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองจะต้องทำการปรับแก้สัญญาณให้มีรูปแบบที่อยู่ในลักษณะที่ต้องการ ทั้งนี้วิธีการที่ง่ายต่อการปรับแก้และทำได้อย่างรวดเร็วคือการปรับค่าเฉลี่ยของสัญญาณทีละช่วงเพื่อให้สัญญาณมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่รอบแกนศูนย์ในแนวนอนได้จากรูปที่ 5.19 พบว่าหลังจากที่สัญญาณผ่านกระบวนการกรองความถี่แล้วความถี่ในช่วงที่สูงกว่า 40 Hz จะมีความถี่สัญญาณที่เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่าความถี่ในช่วงดังกล่าวถูกคัดกรองออกไปแล้ว ทำให้สัญญาณที่

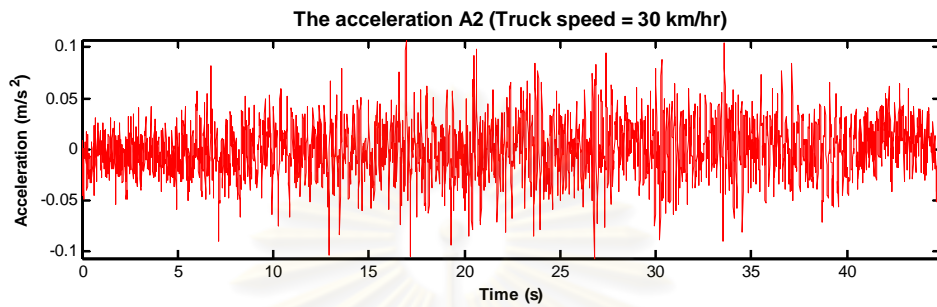
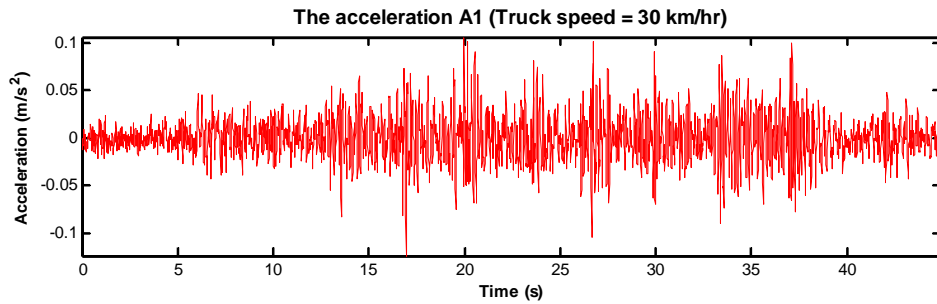
ได้เป็นสัญญาณที่ไม่ถูกรบกวนด้วยความถี่สูงของกระแสไฟฟ้าซึ่งหลังจากการปรับแก้ค่าเฉลี่ยและผ่านกระบวนการคัดกรองความถี่แบบดิจิทัลแล้วสัญญาณจะมีลักษณะเป็นดังสัญญาณเส้นสีแดงในรูปที่ 5.18 จึงสามารถนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



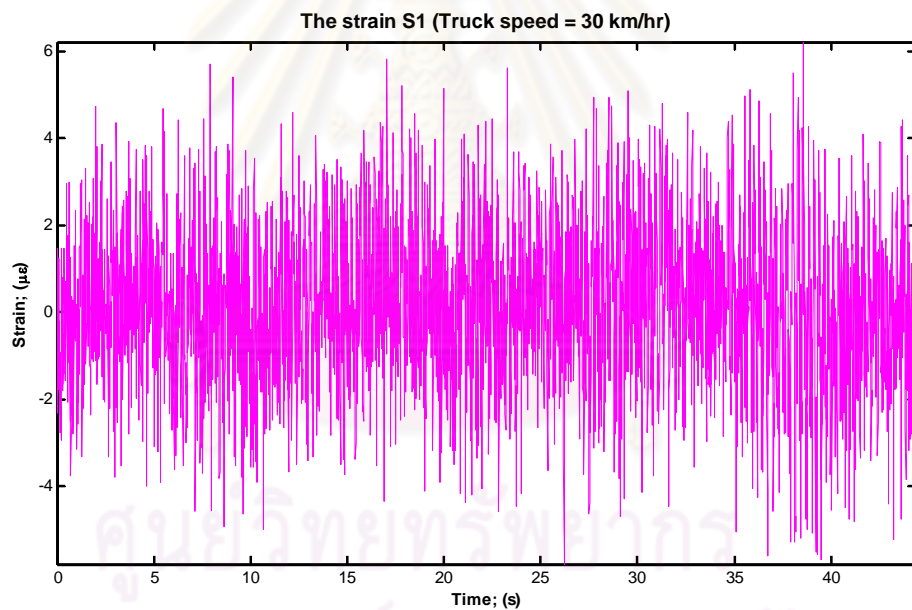
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.20 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 30 km/hr (ก) สัญญาณการกระจัด (ข) สัญญาณการกระจัดที่กลางช่วงของสะพาน

(ค) สัญญาณความเร่ง (ง) สัญญาณความเครียดที่กลางช่วงของสะพาน

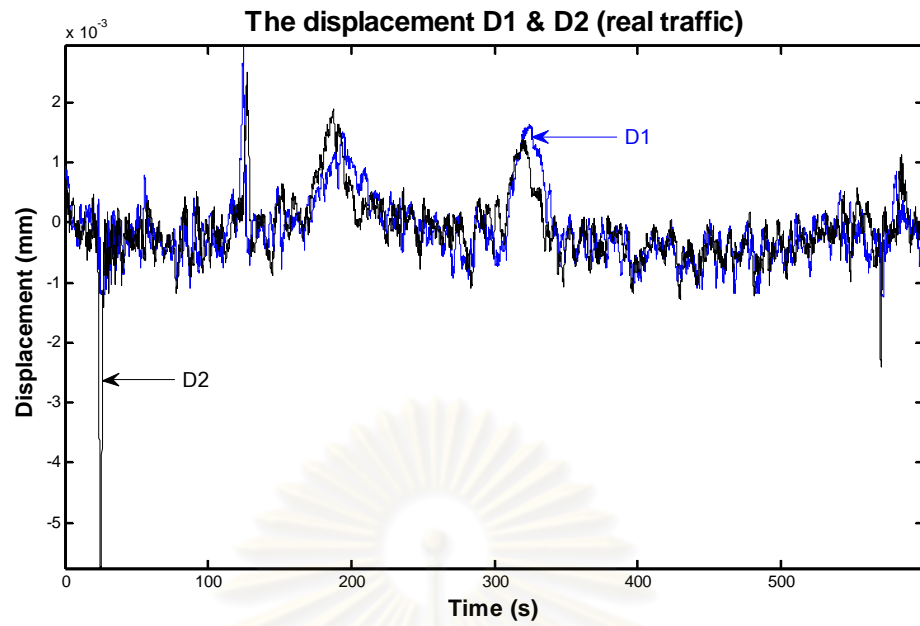
ผลการทดสอบสะพานจริงจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกสามารถสรุปค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

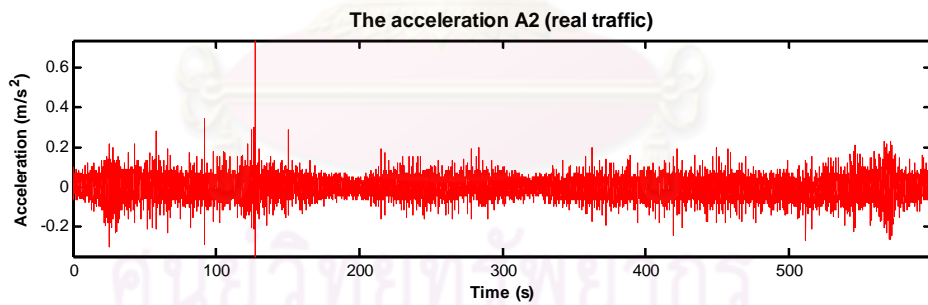
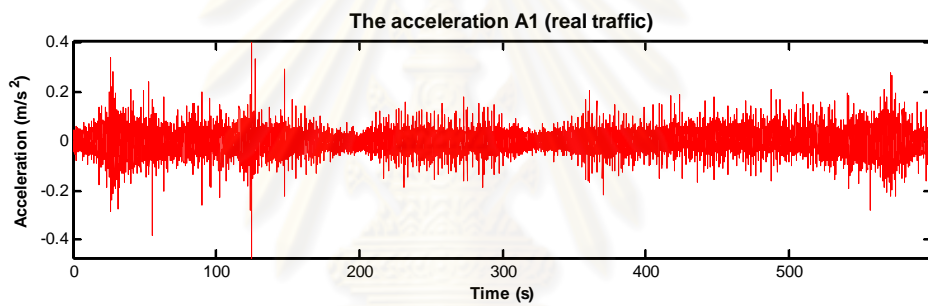
sensor	5 km/hr		30 km/hr		60 km/hr	
	peak	rms	peak	rms	peak	rms
A1	0.107	0.025	0.124	0.023	0.258	0.031
A2	0.103	0.024	0.107	0.027	0.185	0.028
D1	0.006	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001
D2	0.006	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001
D3	0.003	0.002	0.003	0.001	0.003	0.001
S3	10.308	2.253	6.207	1.756	9.224	2.190

5.4.2 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติ

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากสะพานข้ามทางแยกในกรณีที่มีสภาพการจราจรตามปกติเป็นสัญญาณที่เก็บรวบรวมเป็นระยะเวลาต่อเนื่องที่ยาวนาน โดยเก็บรวบรวมทั้งหมดเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้ได้ทราบถึงลักษณะของการจราจรที่แตกต่างออกไปตามช่วงเวลา ซึ่งเมื่อสังเกตเหตุการณ์ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บสัญญาณจากกล้องบันทึกวงจรปิดพบว่า พฤติกรรมทางการจราจรบนสะพานหลักข้ามทางแยกมีความสอดคล้องกับเหตุการณ์ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3.1 กล่าวคือ การจราจรทั้งสองทิศทางจะมีความหนาแน่นทางการจราจรที่แตกต่างกันมากในช่วงเวลาเช้าและช่วงเวลาเย็นของแต่ละวัน ซึ่งทำให้ช่วงเวลาที่ทำการพิจารณาสัญญาณถูกจำกัดด้วยเหตุการณ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่ทำการวิจัยอยู่ นอกจากนี้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณได้ถูกติดตั้งอยู่ในทิศทางจราจรฝั่งขาออก (Out bound) ด้วยเหตุนี้จึงทำการพิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ที่อยู่ในช่วงเวลาตอนเย็นของแต่ละวันเท่านั้น ทั้งนี้การพิจารณาสัญญาณตลอดช่วงเวลาที่รถยนต์จอดติดอยู่บนสะพานข้ามทางแยกอาจทำให้ต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานอย่างมากในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เนื่องจากข้อมูลสัญญาณที่เก็บบันทึกได้ตลอดช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นทางการจราจรในแต่ละทิศทางแตกต่างกันนั้น มีช่วงสัญญาณที่ยาวนานพอสมควร และเพื่อให้สอดคล้องกับการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตามมาตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ที่นำเสนอเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินในส่วนของคุณภาพอนามัยด้วยการพิจารณาการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนที่เวลา 10 นาทีเป็นช่วงเวลาเริ่มต้น ดังนั้นจึงทำการค้นหาสัญญาณในช่วงเวลา 10 นาทีที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเป็นตัวแทนสัญญาณสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยมีหลักการพิจารณาถึงค่าสูงสุด (Peak response) และค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS) ของสัญญาณประกอบกับกล้องวงจรปิดที่บันทึกได้ เนื่องจากต้องการพิจารณาเพียงเหตุการณ์ที่การจราจรหนาแน่นเพียงข้างใดข้างหนึ่งเท่านั้นซึ่งอาจมีบางเหตุการณ์ที่การจราจรมีความคล่องตัวทั้งสองทิศทางพาหนะที่วิ่งอยู่บนสะพานจึงใช้ความเร็วสูงในการวิ่งผ่านด้วยกันทั้งสองทิศทางจึงจำเป็นต้องใช้กล้องวงจรปิดที่บันทึกได้เป็นเครื่องมือในการพิจารณาพร้อมในการคัดเลือกสัญญาณที่เหมาะสม



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.21 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติ
(ก) สัญญาณการกระจัด (ข) สัญญาณความเร่ง

จากรูปที่ 5.21 (ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณที่ใช้เป็นตัวอย่างเป็นระยะเวลา 10 นาที สามารถสรุปค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสูงสุด (Peak) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square; r.m.s.) ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติ

sensor	peak	rms
A1	0.474	0.033
A2	0.739	0.037
D1	0.003	0.001
D2	0.006	0.001

ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติพบว่ามีค่าแตกต่างจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้โดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้าม โดยในรูปที่ 5.21 (ก) ค่าการกระจัดสูงสุดในบางช่วงของเวลาที่มีการกลับทิศทางของสัญญาณ ซึ่งหากพิจารณาตามรูปที่ 5.5 พบว่าทิศทางการวิ่งผ่านของรถยนต์ในฝั่งขาเข้าเมืองจะผ่านตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการกระจัดหรือ DT หมายเลข D2 ก่อนดังนั้นสัญญาณการกระจัดที่ตำแหน่งนี้จะมีการกลับทิศทางนั้นหมายความว่าเมื่อรถยนต์วิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามของการจราจรซึ่งในที่นี้คือฝั่งขาเข้าเมืองจะเกิดการกดทับที่ปลายคานขวางในทิศทางดังกล่าวในขณะที่เดียวกันนี้ปลายคานขวางที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณก็จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งสวนทางกับฝั่งตรงข้าม แต่เนื่องจากการจราจรในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณนั้นมีความคล่องตัวมากจึงเกิดลักษณะดังกล่าวไม่บ่อยครั้งนักในช่วงสัญญาณที่เลือกใช้เป็นตัวแทนในช่วง 10 นาที ซึ่งจากการคัดเลือกสัญญาณตัวแทนในช่วงเวลา 10 นาทีที่เหมาะสมพบว่าสัญญาณที่เลือกใช้นี้จะต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับปัญหาที่กำลังทำการศึกษาอยู่ กล่าวคือสัญญาณดังกล่าวจะต้องเป็นสัญญาณที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาที่มีการจราจรหนาแน่นจนถึงขั้นติดขัดในทิศทางที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณในขณะที่ทิศทางฝั่งตรงกันข้ามก็จะต้องมีสภาพการจราจรที่คล่องตัวอย่างมากในเวลาเดียวกันนี้ ซึ่งจากการพิจารณาร่วมกับสัญญาณภาพจากกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งไว้ในมุมสูงบนสะพานพบว่าสัญญาณที่เลือกใช้เป็นตัวแทนนี้เกิดขึ้นในสถานการณ์ดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าสูงสุดและค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณที่เลือกใช้ซึ่งพบว่าค่าสูงกว่าสัญญาณในช่วงเวลาอื่นๆ ดังนั้นสัญญาณที่เลือกใช้นี้จึงเป็นสัญญาณที่มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับปัญหาของการศึกษาในครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การวิเคราะห์หาค่าการสั่นสะเทือนของรถยนต์

การวิเคราะห์ถึงการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงออกในรูปของผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ซึ่งกันและกันระหว่างสะพานและรถยนต์ที่ประกอบไปด้วย การกระจัด ความเร็วและความเร่ง โดยขึ้นอยู่กับว่าการนำผลตอบสนองชนิดใดมาทำการวิเคราะห์จึงจะเกิดความเหมาะสม ยกตัวอย่างเช่นเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จนได้มาซึ่งผลตอบสนองทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาในข้างต้นแล้ว หากต้องการวิเคราะห์ถึงความสามารถในการให้บริการของสะพานซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ผลตอบสนองเชิงการกระจัดของสะพานในการวิเคราะห์ แต่หากจะทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นการนำผลตอบสนองเชิงการกระจัดของรถยนต์นั้นอาจไม่สามารถระบุถึงผลกระทบและความรู้สึกของอิทธิพลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นได้ ซึ่งการประเมินผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนนั้นจำเป็นต้องใช้ผลตอบสนองที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงดังนั้นในการประเมินผลกระทบที่มีต่อความรู้สึกจากการสั่นสะเทือนจึงควรนำค่าผลตอบสนองเชิงความเร่งมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อความรู้สึกอันเนื่องมาจากการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO 2631

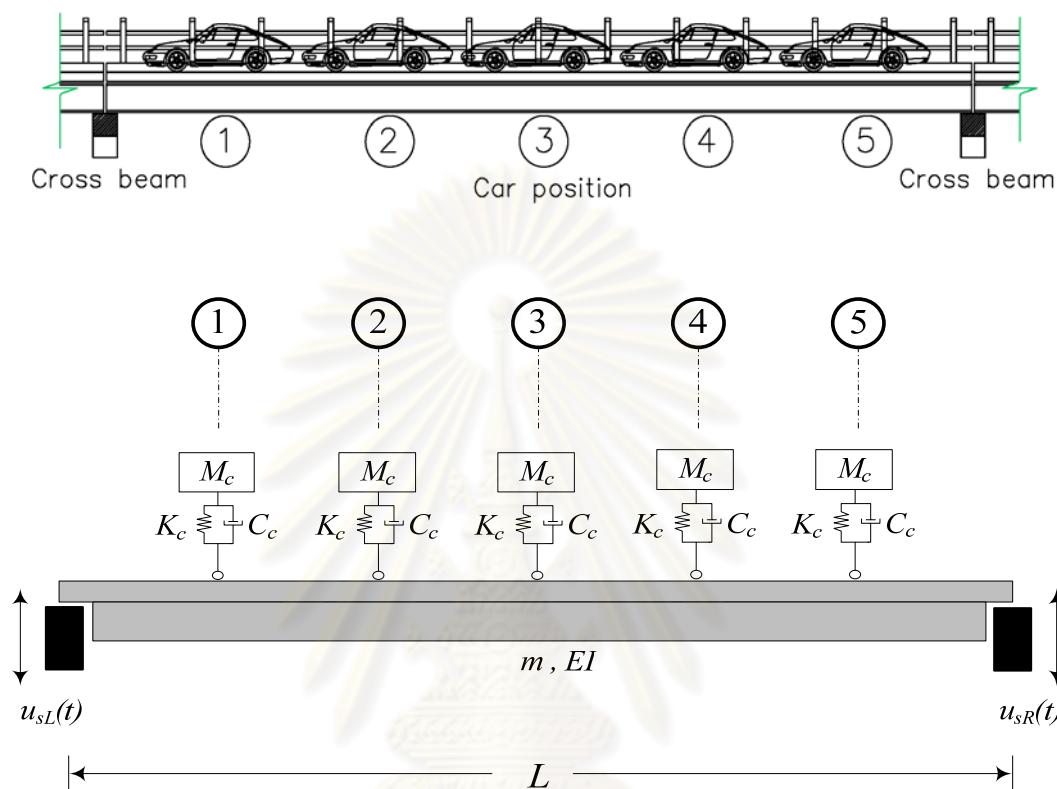
เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการทางทฤษฎีทางพลศาสตร์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งการวิเคราะห์จะมีการเปลี่ยนตัวแปรไปตามคุณสมบัติช่วงล่างของแบบจำลองรถยนต์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 โดยมีคุณสมบัติครอบคลุมถึงคุณสมบัติที่เป็นไปได้ของช่วงล่างรถยนต์ ซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งในส่วนของมวลและคุณสมบัติช่วงล่างรถยนต์ซึ่งมีแหล่งที่มาจากแบบจำลองรถยนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในต่างประเทศระหว่างปี พ.ศ. 2538-2552 จำนวนกว่า 30 บทความ แล้วนำมาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของค่าคุณสมบัติของแบบจำลองรถ ซึ่งจะได้ช่วงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่คาดว่าจะครอบคลุมรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทุกรุ่น ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้สะดวกขึ้นจะสมมติให้รถยนต์ทุกคันมีคุณสมบัติด้านการสลายพลังงานคิดเป็นค่าอัตราส่วนความหน่วง (ζ) เท่ากับ 0.10 ซึ่งถือเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ในเชิงอนุรักษ์ ทั้งนี้คุณสมบัติด้านมวลและช่วงล่างของรถยนต์ที่เก็บรวบรวมได้นี้มีความสอดคล้องตามทฤษฎีที่นำเสนอไว้โดย Thomas D.Gillespie (1999) [1] ที่กล่าวว่าค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ทั่วไปจะมีช่วงความถี่อยู่ในช่วง 1.00 ถึง 1.50 Hz และสำหรับรถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างพิเศษจะมีช่วงความถี่อยู่ในช่วง 2.00 ถึง 2.50 Hz แต่เพื่อให้การวิเคราะห์เกิดภาพรวมที่ชัดเจนในส่วนของพฤติกรรมได้มากขึ้นจึงได้มีการขยายช่วงคุณสมบัติช่วงล่างของรถยนต์ให้กว้างออกไปจนเกินค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 ของสะพาน โดยได้เปลี่ยนช่วงความถี่ช่วงล่างที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือออกไปเป็นช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5.0 Hz ส่วนคุณสมบัติของคานสะพานในแบบจำลองมีค่าคงที่และเป็นไปตามคุณสมบัติในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงคุณสมบัติของคานสะพานและรถยนต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Bridges					Cars		
L (m)	ω_1 (Hz)	ρA (kg/m)	EI (N-sq.m)	ζ	M_c (kg)	C_c (Ns/m)	K_c (N/m)
25	3.51	2380	4.64x10 ⁹	0.03	600-2600	377-1336	5922-256100

6.1 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์บนสะพาน

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นปฏิริยาร่วมกันระหว่างสะพานและรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานเพื่อวิเคราะห์ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ได้จากผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์จากการแกว่งการการเคลื่อนที่ และนำผลตอบสนองจากการแกว่งการการเคลื่อนที่ที่ได้มาวิเคราะห์พร้อมทั้งประเมินถึงความรุนแรงต่อความรู้สึกตามเกณฑ์มาตรฐานสากลที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินในขั้นตอนต่อไป การแกว่งการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 ด้วยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) นั้นกระทำยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในขั้นตอนของการแกว่งการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงควรนำวิธีการดำเนินการทางตัวเลข (Numerical method) มาใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วขึ้นในขั้นตอนการดำเนินการเนื่องจากสามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลได้ อีกทั้งยังให้ผลที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงอย่างมากกับผลเฉลยจากการวิเคราะห์ซึ่งจะเห็นได้จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยในที่นี้การดำเนินการทางตัวเลขดังกล่าวได้เลือกใช้วิธีเสตทสเปซ (state-space) ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดพร้อมระเบียบวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อที่ 2.2 จากรูปที่ 6.1 แสดงแบบจำลองที่สอดคล้องกันระหว่างสภาพความเป็นจริงของรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพาน ซึ่งจากสภาพความเป็นจริงจำนวนรถยนต์ที่สามารถจอดบนสะพานได้นั้นมีจำนวนจำกัดที่ขึ้นกับความยาวของสะพาน โดยในที่นี้ได้มีการพิจารณาสะพานในช่วงทั่วไป (Typical span) ที่มีความยาว 25 เมตรและหากเทียบกับขนาดความยาวของรถยนต์โดยสารส่วนบุคคลที่มีอยู่ทั่วไปบนท้องถนนแล้วพบว่าจำนวนรถยนต์โดยสารที่สามารถจอดบนสะพานในแบบจำลองได้นั้นมีจำนวนไม่เกิน 5 คัน



รูปที่ 6.1 แบบจำลองสะพานและรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานทั้ง 5 คัน

ในสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสมการที่ 2.16 พบว่าตัวแปรที่ต้องการทราบค่าจากการแก้สมการโดยวิธีเสถียรแบบชานในขั้นต้นจะทำให้ได้ค่าเวกเตอร์ของตัวแปร (state variables) \mathbf{X} ที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์ของพิกัดเชิงโหมด $\mathbf{q}(t)$ และเวกเตอร์ของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพิกัดเชิงโหมด $\dot{\mathbf{q}}(t)$ ซึ่งในแต่ละเวกเตอร์ที่กล่าวมานี้จะประกอบไปด้วยพิกัดของสะพานและรถยนต์หรือเขียนในรูปเวกเตอร์ได้คือ $\{q_b(t) \quad q_c(t)\}^T$ โดยเวกเตอร์ $q_b(t)$ และ $q_c(t)$ โดยเวกเตอร์ $q_b(t)$ คือค่าพิกัดทั่วไปของสะพานเท่านั้น หากต้องการจะทราบถึงการกระจัดที่แท้จริงของสะพานจะต้องนำเวกเตอร์ $q_b(t)$ กลับไปแทนในสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นสมการการกระจัดแบบรวมผลของแต่ละโหมดเข้าไว้ด้วยกันจึงจะทราบค่าการแอ่นตัวของสะพาน $w(x,t)$ แต่หากว่าต้องการจะทราบการกระจัดรวมทั้งหมดของสะพานที่มีการรวมผลของการสั่นไหวที่จุดรองรับสะพาน $u'(x,t)$ จะต้องรวมพจน์ $w(x,t)$ เข้ากับพจน์ $u_s(x,t)$ ส่วนเวกเตอร์พิกัดของรถยนต์ $q_c(t)$ เป็นค่าการกระจัดสัมบูรณ์ของรถยนต์ (Absolute displacement) เนื่องจากมีโหมดการสั่นสะเทือนในแนวตั้งเพียงโหมดเดียว จากนั้นจะต้องทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับสองของพิกัดเชิงโหมดของรถยนต์ $q_c(t)$ ซึ่งเป็นค่าที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จากการสั่นสะเทือน ซึ่งมีขั้นตอนในการหาต่อเนื่องมาจาก

การหาเวกเตอร์ของตัวแปร \mathbf{X} โดยนำเวกเตอร์ \mathbf{X} กลับเข้าไปแทนค่าในสมการที่ 2.21 เพื่อหาค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเวกเตอร์ของตัวแปร \mathbf{X} ที่เรียกว่า $\dot{\mathbf{X}}$ โดยที่เวกเตอร์ $\dot{\mathbf{X}}$ จะประกอบไปด้วยเวกเตอร์ของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพิกัดเชิงโหมด $\dot{\mathbf{q}}(t)$ และเวกเตอร์อนุพันธ์อันดับสองของพิกัดเชิงโหมด $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ ซึ่งเวกเตอร์ $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ ประกอบไปด้วยพิกัดของสะพานและรถยนต์หรือเขียนในรูปเวกเตอร์ได้คือ $\{\ddot{q}_b(t) \quad \ddot{q}_c(t)\}^T$ ในทำนองเดียวกันกับการหาค่าการแอ่นตัวของสะพาน ค่า $\ddot{q}_b(t)$ เป็นเพียงอนุพันธ์อันดับสองของพิกัดเชิงโหมดของสะพานเท่านั้น ดังนั้นจะต้องนำเวกเตอร์ $\ddot{q}_b(t)$ คูณเข้ากับเวกเตอร์ของฟังก์ชันฐาน Φ^T จึงจะได้ค่าความเร่งจากการแอ่นตัวของสะพาน เช่นเดียวกันกับค่าการหาค่าความเร่งรวมของสะพาน $\ddot{u}'(x,t)$ จะต้องรวมพจน์ $\ddot{w}(x,t)$ เข้ากับพจน์ $\ddot{u}_s(x,t)$ ส่วนเวกเตอร์พิกัดของรถยนต์ $\ddot{q}_c(t)$ เป็นค่าความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ (Absolute acceleration) เนื่องจากมีโหมดการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์เพียงโหมดเดียว จากผลการแก้สมการพบว่าตัวแปรสำคัญที่จะนำไปวิเคราะห์ถึงปัญหาของผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์คือค่าความเร่ง $\ddot{q}_c(t)$ ดังนั้นในภายหลังจากนี้จะใช้ค่าความเร่ง $\ddot{q}_c(t)$ ในการเป็นตัวแทนอธิบายถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ต่อไป

6.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์บนสะพาน

6.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวที่ฐานรองรับโดย

การจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

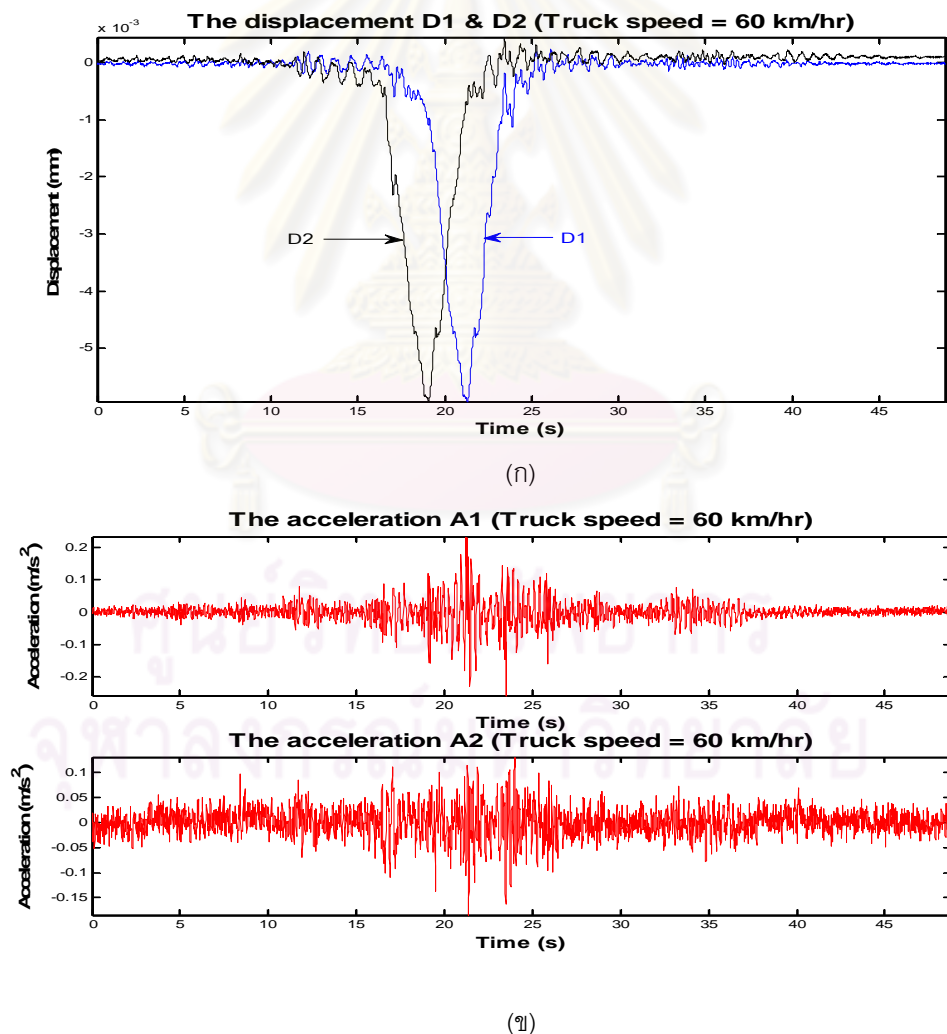
การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลสัญญาณที่ฐานรองรับสะพานจากการทดสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกและข้อมูลคุณสมบัติของสะพานที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองรถยนต์ก่อนที่จะนำไปสู่การประเมินความรุนแรงต่อความรู้สึกต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน ISO 2631 ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของแบบจำลองสะพานถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติคงที่ และในส่วนของรถยนต์ได้สมมติให้มีรถยนต์จอดติดบนสะพานเต็มช่วงความยาวสะพานตามตำแหน่งต่างๆ จำนวน 5 คัน โดยที่ทุกคันมีคุณสมบัติเหมือนกัน และแปรเปลี่ยนค่าอยู่ในช่วงค่าคุณสมบัติซึ่งมีรายละเอียดดังตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงคุณสมบัติของรถยนต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีต่างๆ

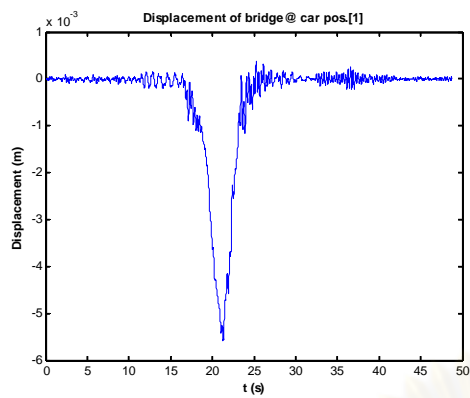
Mass; M_c (kg)	600 , 800 , 1000 , 1200 , 1400 , 1600 , 1800 , 2000 , 2200 , 2400 , 2600
Suspension frequency; f (Hz)	0.5 , 0.75 , 1.00 , 1.25 , 1.50 , 1.75 , 2.00 , 2.25 , 2.50 , 2.75 , 3.00 , 3.25 , 3.50 , 3.75 , 4.00 , 4.25 , 4.50 , 4.75 , 5.00

จากแผนผังข้างต้นมีจำนวนกรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 209 กรณีต่อการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นไหวของสะพานในแต่ละสัญญาณ ทั้งนี้การวิเคราะห์ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในกรณีที่ใช้ข้อมูลสัญญาณที่จุดรองรับสะพานจากการทดสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกเป็นการทดสอบขั้นต้นเนื่องจากในการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกไปด้วยความเร็ว 5, 30 และ 60 km/hr และมีการบันทึกสัญญาณในแต่ละกรณีของความเร็วที่วิ่งผ่านของรถบรรทุก โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ตามกรณีต่างๆตามตารางที่ 6.2 ทำให้จำนวนกรณีการวิเคราะห์จากสัญญาณการสั่นไหวของสะพานที่ตรวจวัดได้รวมทั้งสิ้น 627 กรณี

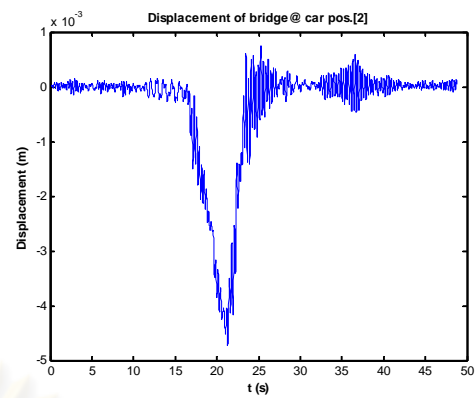
ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีต่างๆตามแผนภาพที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 ทำให้ทราบถึงผลเฉลยจากสมการการเคลื่อนที่ในรูปแบบของสัญญาณทั้งในส่วนของการกระจัดรวมของสะพาน การแอ่นตัวของสะพาน ณ ตำแหน่งต่างๆบนสะพาน และความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งต่างๆตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.1



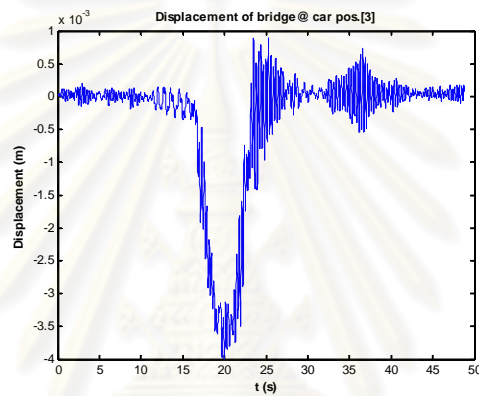
รูปที่ 6.2 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับทั้งสองข้างของคานสะพานกรณีที่มีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 60 km/hr (ก) การกระจัดที่จุดรองรับ (ข) ความเร่งที่จุดรองรับ



(ก)



(ข)



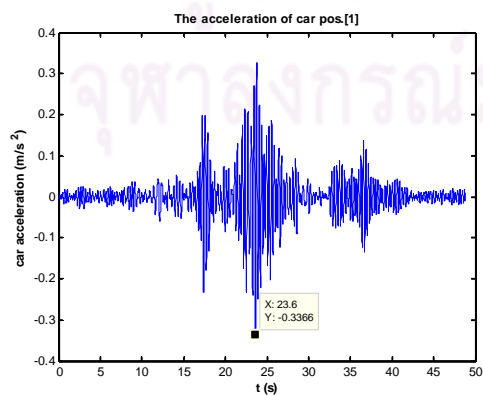
(ค)

รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการกระจัดรวมของสะพาน ณ ตำแหน่งที่มีรถยนต์จอดอยู่จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz

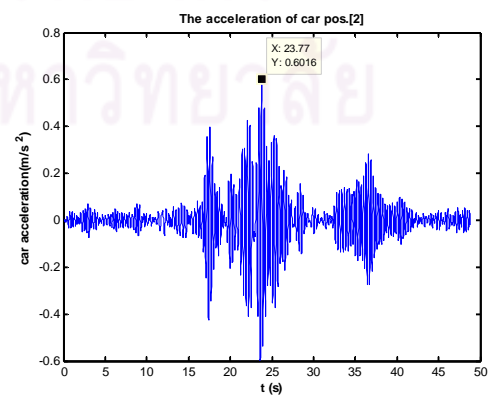
(ก) การกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งรถยนต์คันที่ 1

(ข) การกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งรถยนต์คันที่ 2

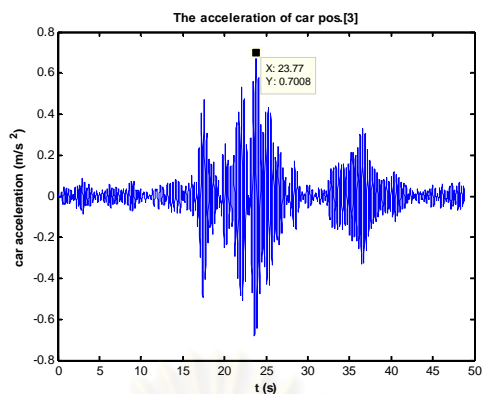
(ค) การกระจัดของสะพาน ณ ตำแหน่งรถยนต์คันที่ 3



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.4 ตัวอย่างความเร่งของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz

(ก) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1

(ข) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 2

(ค) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 3

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่ใช้รถบรรทุกเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณสามารถหาค่าความเร่งสูงสุดในแต่ละกรณี แต่เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะได้ผลจากการวิเคราะห์จำนวนมากดังที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 6.2 ถึงจำนวนกรณีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 627 กรณีจึงไม่สามารถนำผลในการวิเคราะห์มาแสดงได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มและพฤติกรรมของรถยนต์จากการวิเคราะห์จึงได้นำผลการวิเคราะห์บางส่วนที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมโดยภาพรวมของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 6.3 สำหรับ 144 กรณีที่รถยนต์มีคุณสมบัติด้านมวลและความถี่ช่วงล่างต่ำสุด ปานกลาง และสูงสุด

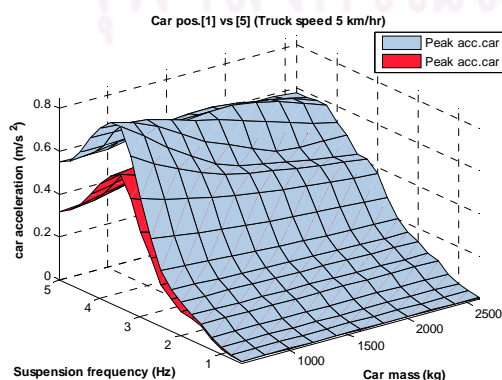
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.3 แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2)
ภายใต้การทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่มีความเร็วต่างๆ

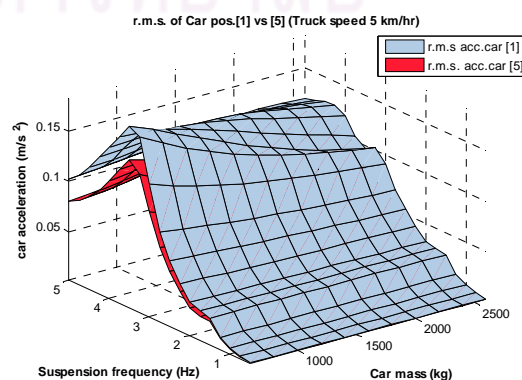
Truck Speed (km/hr)	Car mass (kg)	Suspension frequency (Hz)											
		Car position 1				Car position 2				Car position 3			
		1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
5	800	0.032	0.095	0.154	0.252	0.059	0.140	0.257	0.469	0.067	0.153	0.286	0.545
	1400	0.032	0.095	0.149	0.231	0.058	0.138	0.241	0.409	0.066	0.152	0.265	0.496
	2000	0.031	0.094	0.144	0.215	0.057	0.137	0.227	0.365	0.064	0.150	0.246	0.451
	2600	0.031	0.094	0.139	0.205	0.056	0.135	0.214	0.335	0.063	0.148	0.230	0.413
30	800	0.028	0.056	0.110	0.218	0.062	0.131	0.257	0.481	0.074	0.158	0.308	0.570
	1400	0.028	0.055	0.103	0.194	0.061	0.126	0.239	0.411	0.073	0.152	0.291	0.492
	2000	0.028	0.053	0.097	0.175	0.060	0.122	0.224	0.358	0.072	0.147	0.272	0.425
	2600	0.028	0.051	0.092	0.158	0.059	0.117	0.208	0.315	0.070	0.142	0.253	0.369
60	800	0.070	0.107	0.187	0.356	0.105	0.170	0.355	0.691	0.118	0.196	0.412	0.813
	1400	0.069	0.106	0.184	0.337	0.103	0.163	0.333	0.602	0.117	0.190	0.384	0.701
	2000	0.068	0.104	0.180	0.317	0.101	0.156	0.315	0.535	0.116	0.185	0.356	0.606
	2600	0.068	0.103	0.176	0.300	0.100	0.149	0.300	0.483	0.114	0.179	0.336	0.540

เพื่อให้เห็นอิทธิพลของมวลและความถี่ช่วงล่างที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์ได้ชัดเจนขึ้นจากการวิเคราะห์แบบจำลองในกรณีที่ใช้รถบรรทุกทดสอบในการสร้างสัญญาณจะนำเสนอแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างของรถยนต์และค่าความเร่งสูงสุด (Peak response) หรือค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square; RMS) ที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองรถยนต์ทั้ง 5 คันที่จอดติดอยู่บนคานดังต่อไปนี้

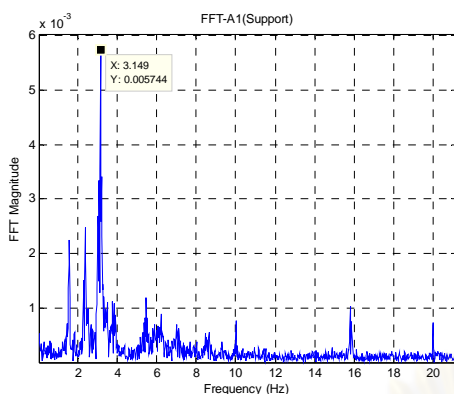
6.2.1.1 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 5 km/hr



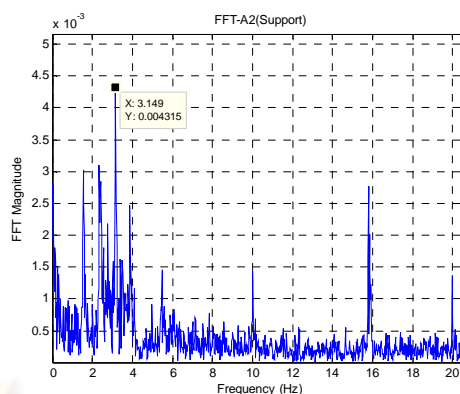
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6.5 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 1 และ 5 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 5 km/hr

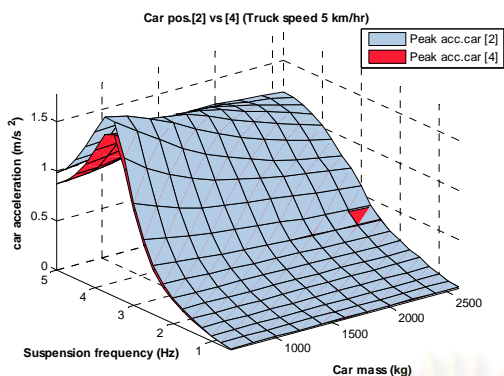
(ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)

(ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)

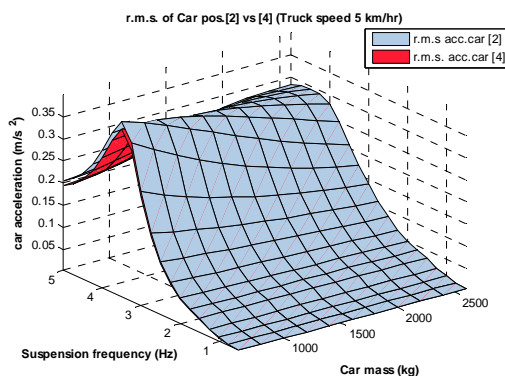
(ค) ค่าความถี่ธรรมชาติที่ปลายคานขวางของสะพานจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ (A1)

(ง) ค่าความถี่ธรรมชาติที่ปลายคานขวางของสะพานจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ (A2)

จากการสังเกตการวางตัวของรถยนต์บนคานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในภาพที่ 6.1 พบว่ารถยนต์คันที่ 1 และคันที่ 5 อยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปที่ 5.5 ได้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างตำแหน่งของแบบจำลองรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนคานกล่าวคือ ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์คันที่ 1 และคันที่ 5 มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งใกล้กับจุดรองรับเช่นเดียวกันและมีระยะห่างจากจุดรองรับในแต่ละข้างที่เท่ากัน เมื่อทำการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติที่ของคานขวางซึ่งเป็นจุดรองรับในแต่ละข้างของสะพานจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ปลายคานขวางซึ่งเป็นจุดรองรับในแต่ละข้างของคานสะพานมีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ค) และ (ง) จึงทำให้ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์คันที่ 1 และคันที่ 5 แสดงผลของการสั่นพ้องที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากคานขวาง กล่าวคือการสั่นสะเทือนของรถยนต์ทั้งค่าความเร่งสูงสุดและค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าสูงสุดหากช่วงล่างของรถยนต์มีค่าความถี่เข้าใกล้ 3.15 Hz



(ก)



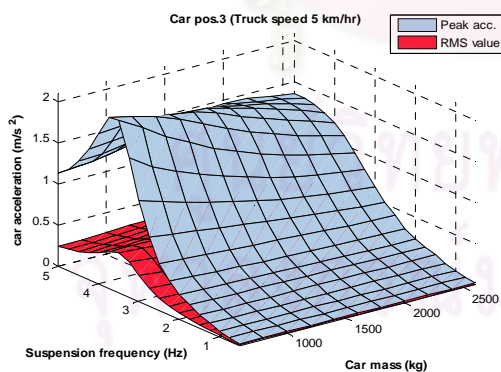
(ข)

รูปที่ 6.6 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 2 และ 4 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 5 km/hr

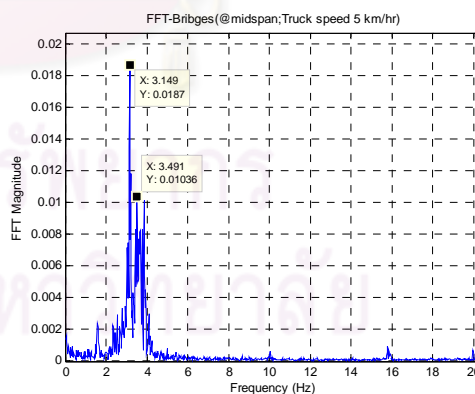
(ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)

(ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)

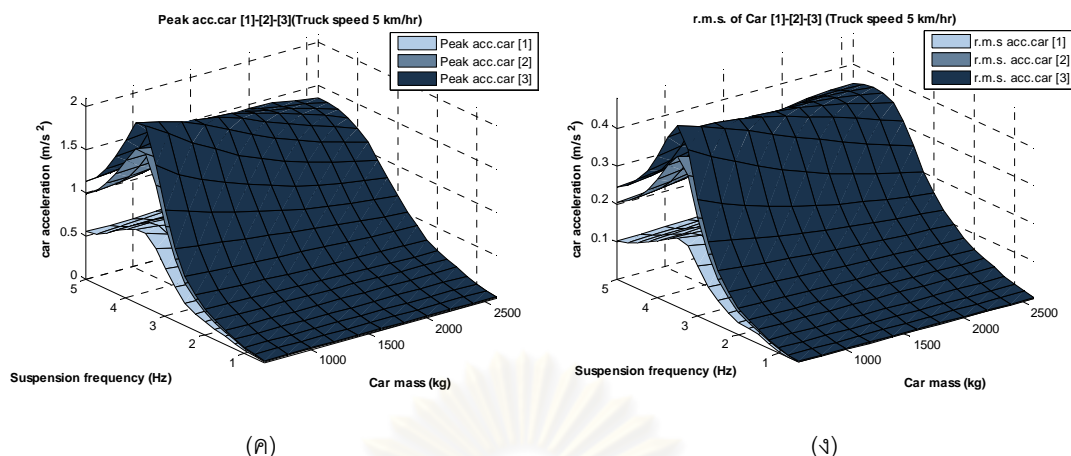
ในทำนองเดียวกันรถยนต์คันที่ 2 และคันที่ 4 อยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากตำแหน่งที่จอดบนคานสะพานในแบบจำลองอยู่ห่างจากจุดรองรับทั้งสองข้างถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากจุดรองรับที่เท่ากันก็ตาม ซึ่งแตกต่างจากกรณีของรถยนต์คันที่ 1 และ 5 ที่จอดอยู่ใกล้จุดรองรับมากกว่า อย่างไรก็ตามด้วยความสมมาตรทางตำแหน่งทำให้ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์คันที่ 2 และคันที่ 4 มีผลที่เทียบเคียงกันดังจะสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองในรูปที่ 6.6



(ก)



(ข)



รูปที่ 6.7 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 5 km/hr

(ก) ค่าความเร่งและค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของรถยนต์คันที่ 3

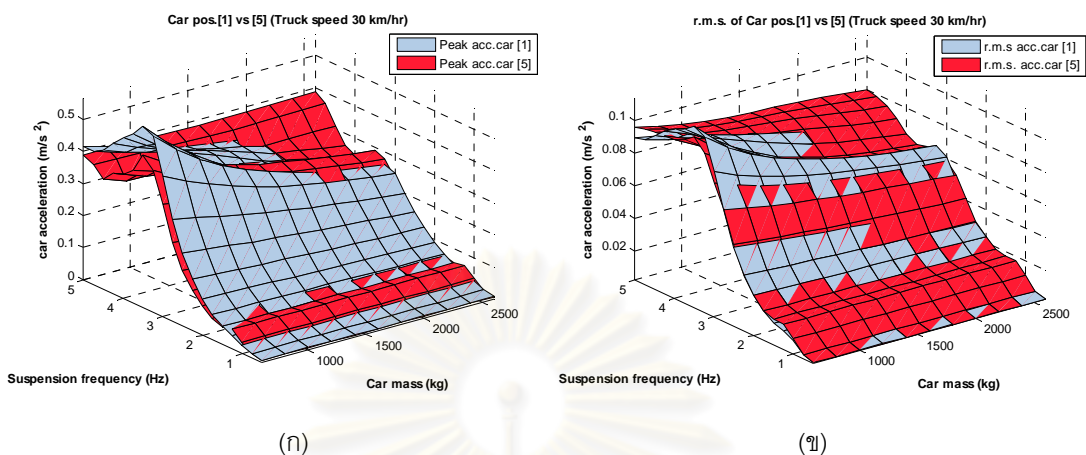
(ข) ค่าความถี่ของสะพานที่บริเวณกลางช่วงจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(ค) แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดของรถยนต์คันที่ 1,2 และ 3 ตามลำดับ

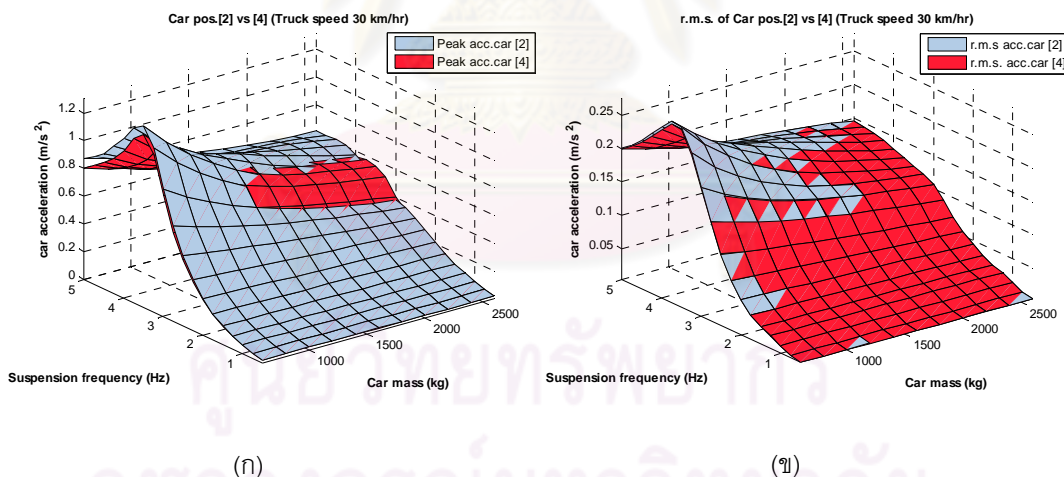
(ง) แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของรถยนต์คันที่ 1,2 และ 3 ตามลำดับ

ในส่วนของรถยนต์คันที่ 3 ที่จอดอยู่บริเวณกลางช่วงของสะพานมีการสั่นสะเทือนสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ ทั้งนี้เกิดจากการที่ตัวสะพานเกิดการสั่นไหวร่วมด้วย โดยมีรูปแบบการสั่นไหวในโหมดที่ 1 เป็นหลัก (Fundamental mode) ทำให้บริเวณกึ่งกลางช่วงสะพานมีระดับการสั่นไหวที่มากกว่าบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้รถที่จอดติดบริเวณดังกล่าวเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงกว่า จากรูปที่ 6.7 (ข) พบว่าค่าความถี่ที่ได้จากการสังเคราะห์สัญญาณความเร่งบริเวณกลางช่วงของสะพานโดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ได้แสดงค่าขนาด (FFT Magnitude) ที่โดดเด่นในช่วงที่ตรงกับความถี่เท่ากับ 3.15 Hz ซึ่งมีค่าตรงกับความถี่ของสัญญาณความเร่งที่จุดรองรับของสะพานจากการตรวจวัดด้วยการทดสอบสะพานจริงดังรูปที่ 6.5 (ค) และ (ง) อย่างไรก็ตามความถี่ธรรมชาติของสะพานยังคงปรากฏอยู่ในสัญญาณความเร่งที่บริเวณกลางช่วงของสะพานแต่มีค่าขนาด (FFT Magnitude) ที่โดดเด่นน้อยกว่าบริเวณจุดรองรับทั้งสองข้างที่เป็นเสมือนเป็นแรงกระทำต่อสะพานจึงมีความเป็นไปได้ว่าความถี่ของแรงกระทำบนสะพานจะแสดงออกอย่างโดดเด่นกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

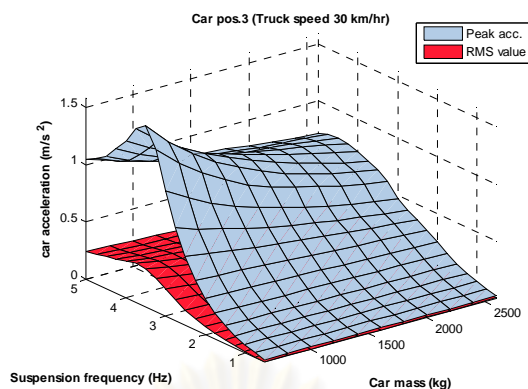
6.2.1.2 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 30 km/hr



รูปที่ 6.8 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 1 และ 5 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr
 (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)
 (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)

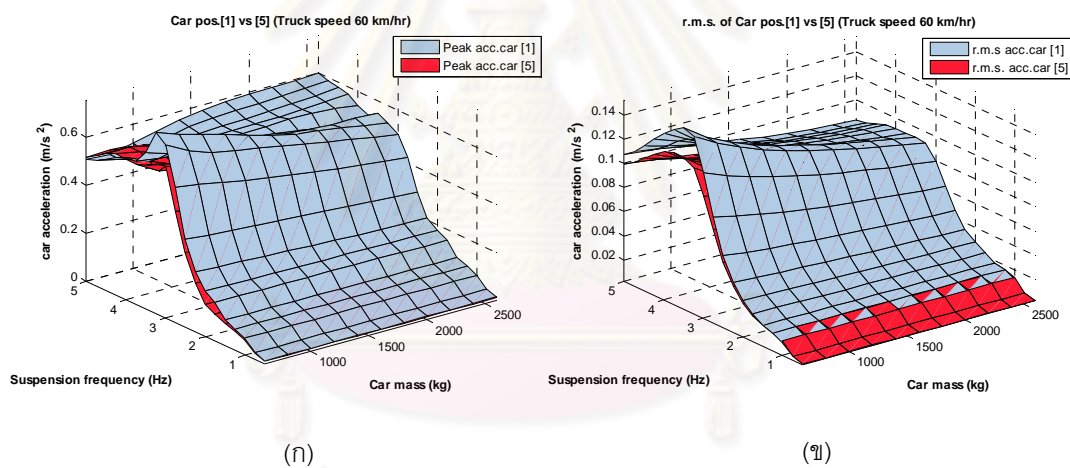


รูปที่ 6.9 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 2 และ 4 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr
 (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)
 (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)



รูปที่ 6.10 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์คันที่ 3 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 30 km/hr

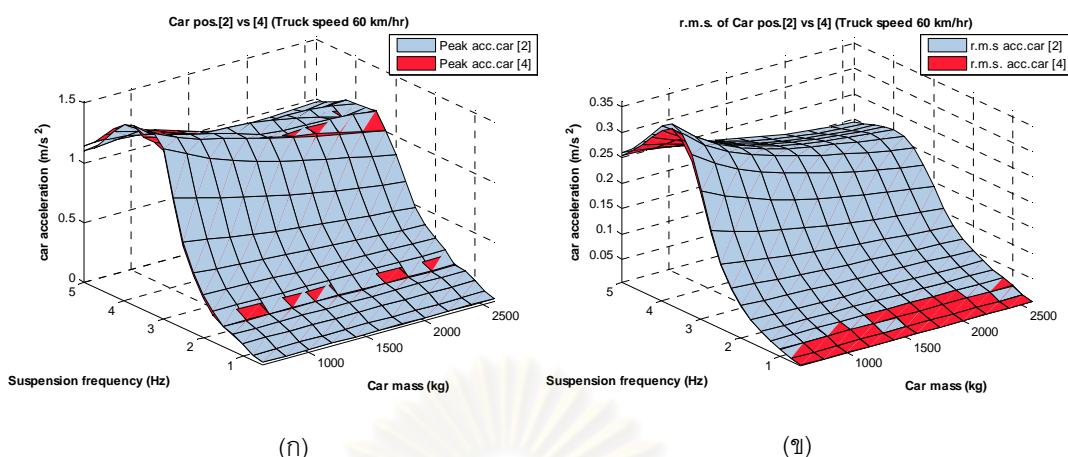
6.2.1.3 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 60 km/hr



รูปที่ 6.11 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 1 และ 5 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

(ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)

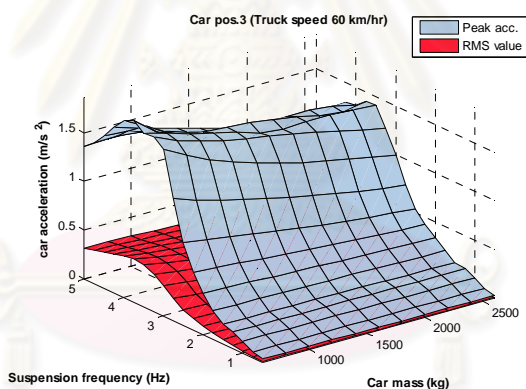
(ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)



รูปที่ 6.12 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นคันที่ 2 และ 4 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

(ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)

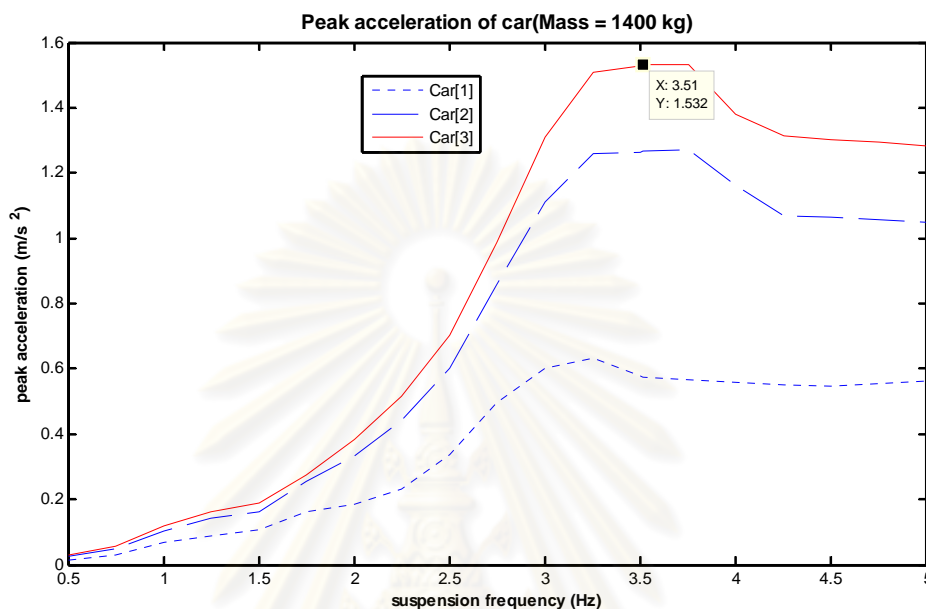
(ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)



รูปที่ 6.13 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์คันที่ 3 กรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

จากตารางที่ 6.3 พบว่าการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดอยู่บริเวณกลางช่วงของสะพานมีการสั่นสะเทือนสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ ทั้งนี้เกิดจากการที่ตัวสะพานเกิดการสั่นไหวร่วมด้วย โดยมีรูปแบบการสั่นไหวในโหมดที่ 1 เป็นหลัก (Fundamental mode) ทำให้บริเวณกึ่งกลางช่วงสะพานมีระดับการสั่นไหวที่มากกว่าบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้รถที่จอดติดบริเวณดังกล่าวเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงกว่า และเมื่อพิจารณารถยนต์ที่จอดติดอยู่บริเวณกลางช่วงพบว่าระดับการสั่นสะเทือนของรถจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความถี่ช่วงล่างของรถมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากตารางที่ 6.3 ซึ่งพบว่าในกรณีที่ความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านในฝั่งตรงข้ามของสะพานด้วยความเร็ว 60 km/hr ขนาดความเร่งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 61.2% เมื่อความถี่ช่วงล่างของรถยนต์เพิ่มขึ้นจาก 1.0 Hz เป็น 1.5 Hz และจะมีขนาดความเร่งสูงสุดเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 98.1% เมื่อความถี่ช่วงล่างของรถยนต์

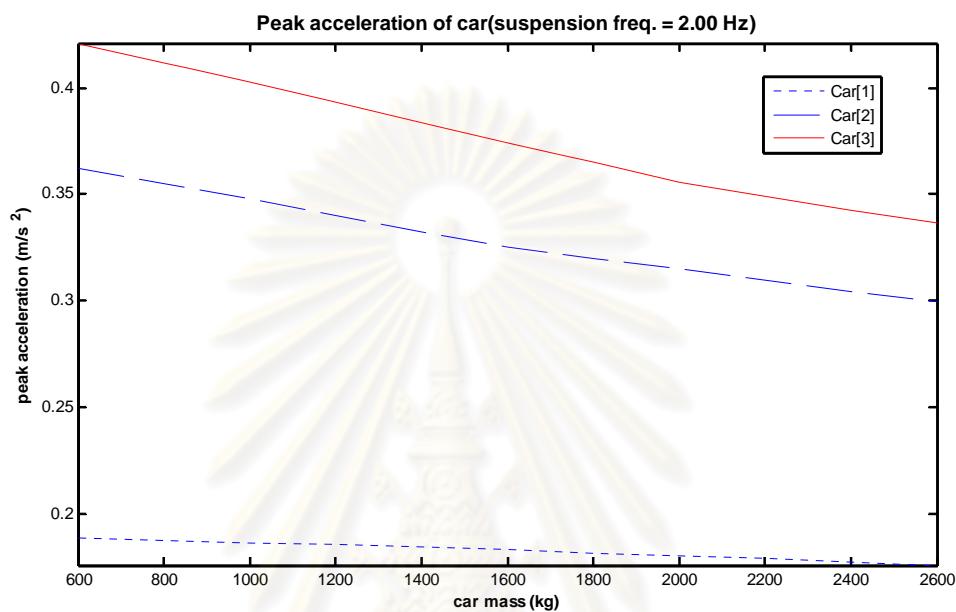
เพิ่มขึ้นจาก 1.5 Hz เป็น 2.0 Hz และเมื่อความถี่ช่วงล่างของรถยนต์เพิ่มขึ้นจาก 2.0 Hz เป็น 2.5 Hz ขนาดความเร่งสูงสุดของรถยนต์จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 77.7 % ซึ่งในที่นี้สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 ในกรณีที่รถยนต์มีมวล 1400 kg

ซึ่งจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์จะมีค่าสูงสุดเมื่อมีความถี่ช่วงล่างของรถยนต์เท่ากับ 3.51 Hz ซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 ของสะพานและจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจนกับรถยนต์คันที่จอดติดอยู่บริเวณกลางช่วงของสะพานนั้นคือตำแหน่งที่ 3 ที่เกิดการสั่นสะเทือนร่วมกับการสั่นไหวของตัวสะพานตามรูปแบบการสั่นไหวในโหมดที่ 1 เป็นหลัก โดยค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์มีค่าต่ำกว่า 3.51 Hz และจะมีอัตราลดลงเมื่อค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์มีค่าสูงกว่า 3.51 Hz ตามหลักการของการสั่นพ้อง (Resonance) ในขณะที่ค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานในตำแหน่งที่ 1 จะเกิดค่าสูงสุดเมื่อรถยนต์มีความถี่ช่วงล่างเข้าใกล้ค่าความถี่ของปลายคานขวางซึ่งเป็นจุดรองรับของสะพานเนื่องจากอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับจุดรองรับของสะพาน ซึ่งจากรูปที่ 6.5 (ค) พบว่าค่าความถี่ที่ปลายคานขวางมีค่าประมาณ 3.15 Hz ซึ่งมีความสอดคล้องกับเส้นโค้งที่แสดงดังรูปที่ 6.14 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1 จะเกิดค่าสูงสุดเมื่อรถยนต์มีความถี่ช่วงล่างอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 3.0 ถึง 3.5 Hz ในทำนองเดียวกันกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่ในตำแหน่งที่ 2 จะแสดงพฤติกรรมของการสั่นพ้องในช่วงความถี่ระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสะพานและคานขวางนั้นคือความถี่ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 3.0 ถึง 3.51 Hz ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ทั้งนี้ค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าความถี่ของรถยนต์มีค่าสูงขึ้นจากการสังเกตได้ดังตารางที่ 6.3 ยกตัวอย่างในกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็ว 60

km/hr ซึ่งพบว่าค่าความเร่งสูงสุดมีค่าที่ลดลง 6.12 % เมื่อมวลของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 800 kg เป็น 1400 kg และลดลง 6.08 % เมื่อรถยนต์มีมวลเพิ่มขึ้นจาก 1400 kg เป็น 2000 kg และจะมีค่าที่ลดลง 5.37 % เมื่อมวลของรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1400 kg เป็น 2000 kg โดยสามารถสังเกตถึงอิทธิพลของมวลรถยนต์ที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดได้จากรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและมวลของรถยนต์ที่ตำแหน่ง 1, 2, 3 ในกรณีที่รถยนต์มีความถี่ช่วงล่าง 2.0 Hz

นอกจากนี้ความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานในทิศทางตรงข้ามก็มีอิทธิพลต่อค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานเนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานในการทดสอบ จากตารางที่ 6.3 พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดอยู่ในตำแหน่งที่ 3 มีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น และรถยนต์ที่มีค่าน้อยแต่มีค่าความถี่ช่วงล่างที่สูงจะมีค่าความเร่งสูงสุดที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งจากกรณีดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบอิทธิพลของความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามของการจราจรซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่มีมวล 800 kg และมีค่าความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 2.5 Hz จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 50 % เมื่อความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นจาก 5 km/hr เป็น 60 km/hr ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณความเร่งที่ปลายคานขวางซึ่งเป็นจุดรองรับทั้งสองข้างของสะพานจากการทดสอบสะพานจริงโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 5 km/hr และ 60 km/hr มีลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างกันโดยสังเกตได้จากตารางที่ 5.2 ซึ่งค่าความเร่งสูงสุดของสัญญาณที่ปลายคานขวางเท่ากับ 0.107 m/s^2 ในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 5 km/hr และมีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.258 m/s^2 ในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 60 km/hr ซึ่งพบว่าค่าความเร่งสูงสุดทั้งสองกรณีนี้มีความแตกต่างกัน 140 % หรือ 1.4 เท่า แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณความเร่งที่บริเวณปลายคานขวางพบว่าในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 60 km/hr กลับมีค่ารากที่สอง

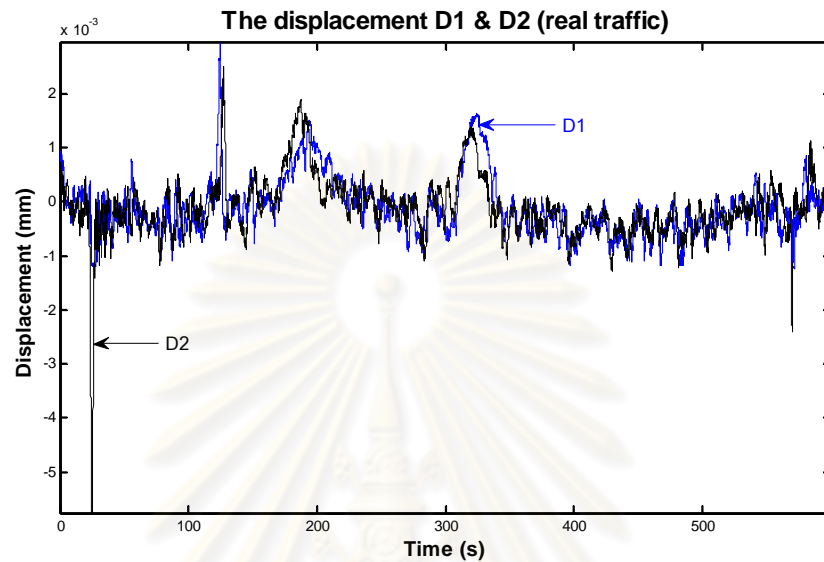
ของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณความเร่งที่สูงกว่าเพียง 24% หรือ 0.24 เท่า ซึ่งทำให้สามารถประเมินพฤติกรรมและแนวโน้มของความเร็วในการวิ่งผ่านของยานพาหนะในฝั่งตรงข้ามกับการจราจรที่สูงกว่าจะทำให้เกิดค่าความเร่งสูงสุดของสัญญาณบริเวณจุดรองรับสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันนี้ความเร็วในการวิ่งผ่านของยานพาหนะจะมีผลกระทบต่อค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณความเร่งที่บริเวณปลายคานขวางซึ่งสามารถประเมินลักษณะของสัญญาณโดยภาพรวมได้ ดังนั้นความเร็วของยานพาหนะที่วิ่งในทิศทางตรงข้ามของการจราจรซึ่งในที่นี่คือรถบรรทุกจะส่งผลต่อค่าความเร่งสูงสุดที่ปลายคานขวางของสะพานจึงทำให้เกิดค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานสูงกว่ากรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามของการจราจรด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีขนาดสูงสุดของแรงกระทำ (แรงอันเนื่องมาจากการสั่นไหวของจุดรองรับ) ที่สูงกว่าจึงให้ได้ค่าผลตอบสนองที่สูงกว่า

ทั้งนี้ในสภาพความเป็นจริงรถบรรทุกไม่สามารถโดยสารผ่านสะพานข้ามทางแยกได้เนื่องจากไม่ได้รับการอนุญาต อีกทั้งสภาพการจราจรที่แท้จริงการจราจรในทิศทางที่คลองตัวจะมีรถยนต์โดยสารหรือแม้แต่รถโดยสารประจำทางสาธารณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยรถบรรทุกนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในฝั่งตรงข้ามได้ และสามารถขยายผลการศึกษาไปสู่การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ใช้ข้อมูลสัญญาณที่จุดรองรับสะพานจากการทดสอบสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติซึ่งจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

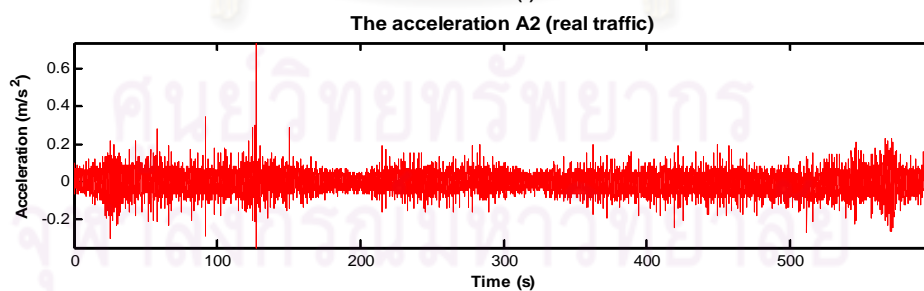
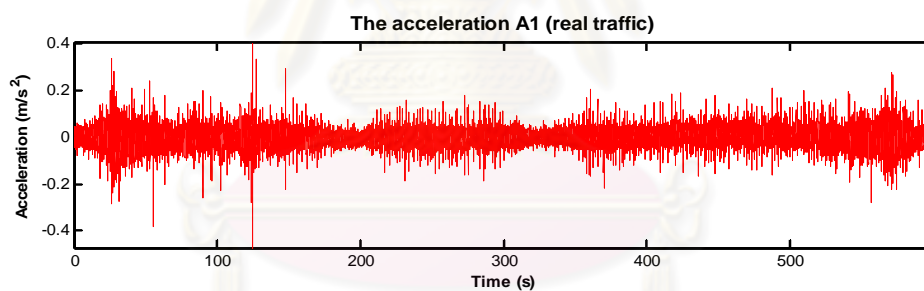
6.2.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลสัญญาณการสั่นไหวที่ฐานรองรับภายใต้การจราจรปกติ

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลการสั่นไหวของสะพานภายใต้การจราจรปกติ เพื่อขยายผลการศึกษาจากการทดสอบโดยการจำลองเหตุการณ์การวิ่งผ่านของรถบรรทุกในฝั่งตรงข้ามเพื่อสร้างสัญญาณการสั่นไหวให้กับสะพาน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาถึงสภาพความเป็นจริงที่ว่า สะพานเหล็กข้ามทางแยกจะมีการให้บริการแก่ยานพาหนะทั่วไปที่ไม่รวมถึงรถบรรทุกหนัก นอกจากนี้การวิ่งผ่านของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบสะพานจริงในการจำลองสถานการณ์นั้นเป็นการวิ่งผ่านด้วยความเร็วคงที่ในแต่ละกรณีและทดสอบแต่ละกรณีด้วยการวิ่งผ่านสะพานเพียง 1 ครั้งต่อการทดสอบในแต่ละกรณี ซึ่งในสภาพการจราจรปกติรถยนต์ในทิศทางจราจรที่คลองตัวมีรถยนต์เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในการทดสอบและมีการเคลื่อนที่ผ่านอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในการวิเคราะห์แบบจำลองที่ผ่านมากในหัวข้อที่แล้วจึงมีเงื่อนไขที่แตกต่างจากสภาพการจราจรที่แท้จริงอยู่พอสมควร แต่ผลจากการศึกษาในหัวข้อที่แล้วสามารถแสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับความสามารถในการให้บริการของสะพานได้ในเบื้องต้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดสะพานภายใต้การจราจรปกติดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 ถึงขั้นตอนและลักษณะของสัญญาณการสั่นไหวที่เหมาะสมกับการเป็นสัญญาณตัวแทนซึ่งคัดเลือกไว้ในช่วงเวลา 10 นาที เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนของหลักการและขั้นตอนในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อนี้เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับหัวข้อที่แล้วกล่าวคือวิธีการวิเคราะห์รวมถึงคุณสมบัติต่างๆทั้งในส่วนของแบบจำลองสะพาน

และรถยนต์ยังคงมีค่าเท่าเดิม แต่มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของสัญญาณการสั่นไหวที่ฐานรองรับทั้งสองข้างของสะพานที่ใช้สัญญาณจากการตรวจวัดสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติซึ่งมีการคัดเลือกสัญญาณที่เหมาะสมไว้ก่อนหน้านี้อแล้วในบทที่ 5



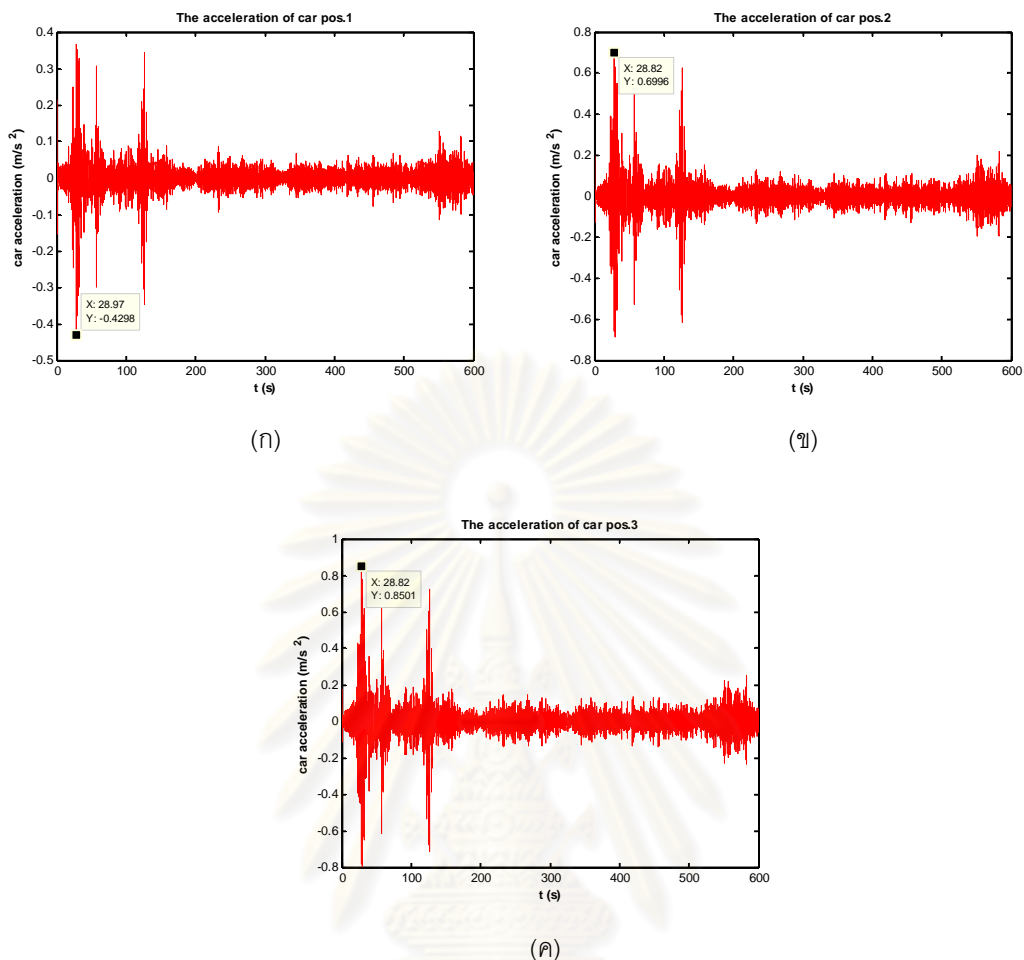
(ก)



(ข)

รูปที่ 6.16 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับทั้งสองข้างของคานสะพานภายใต้การจราจรปกติ

(ก) การกระจัดที่จุดรองรับ (ข) ความเร่งที่จุดรองรับ

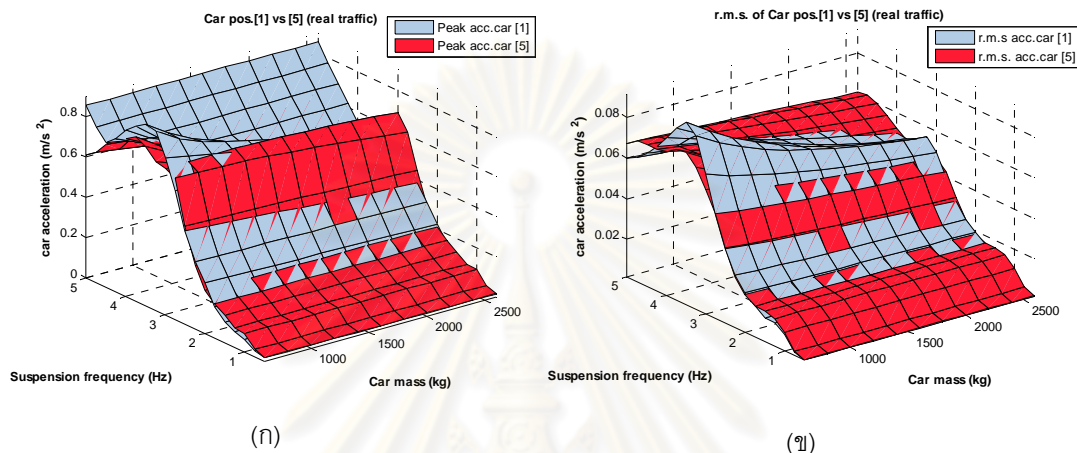


รูปที่ 6.17 ตัวอย่างความเร่งของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
 กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz
 (ก) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1
 (ข) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 2
 (ค) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 3

ตารางที่ 6.4 แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2)
 ภายใต้สภาพการจราจรปกติ

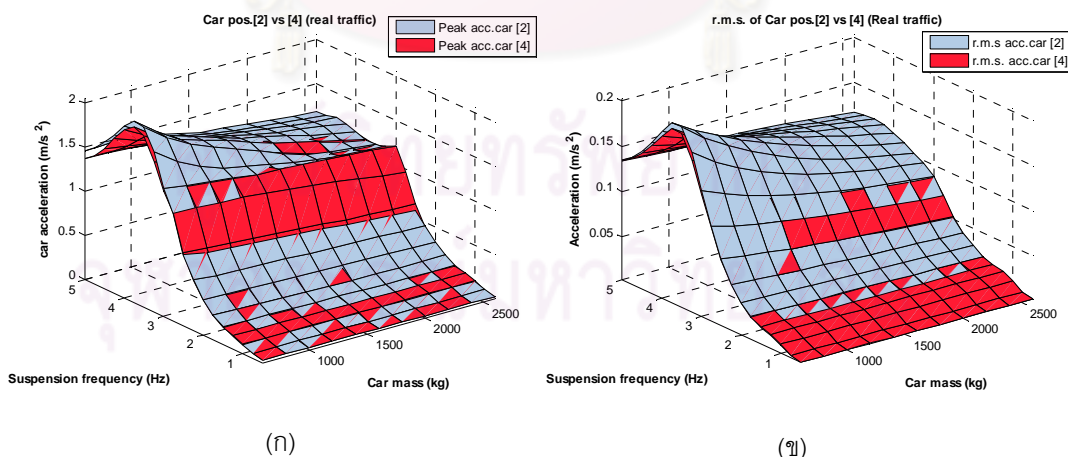
Car mass (kg)	Suspension frequency (Hz)											
	Car position 1				Car position 2				Car position 3			
	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
800	0.064	0.101	0.247	0.456	0.101	0.197	0.388	0.754	0.114	0.232	0.461	0.919
1400	0.063	0.100	0.241	0.430	0.099	0.186	0.370	0.700	0.112	0.219	0.410	0.850
2000	0.063	0.099	0.234	0.406	0.097	0.176	0.352	0.643	0.111	0.207	0.374	0.779
2600	0.063	0.099	0.228	0.383	0.094	0.170	0.333	0.585	0.109	0.198	0.350	0.706

จากตารางที่ 6.4 พบว่าผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลการสั่นไหวของสะพานภายใต้การจราจรปรกติมีค่าที่สูงกว่ากรณีที่ใช้รถบรรทุกในการสร้างสัญญาณในหัวข้อที่แล้วเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับค่าความเร่งในตารางที่ 6.1 โดยผลการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของรถยนต์ที่จอดอยู่ในแต่ละตำแหน่งสามารถแสดงได้ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยแผนภาพพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่าง และค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์



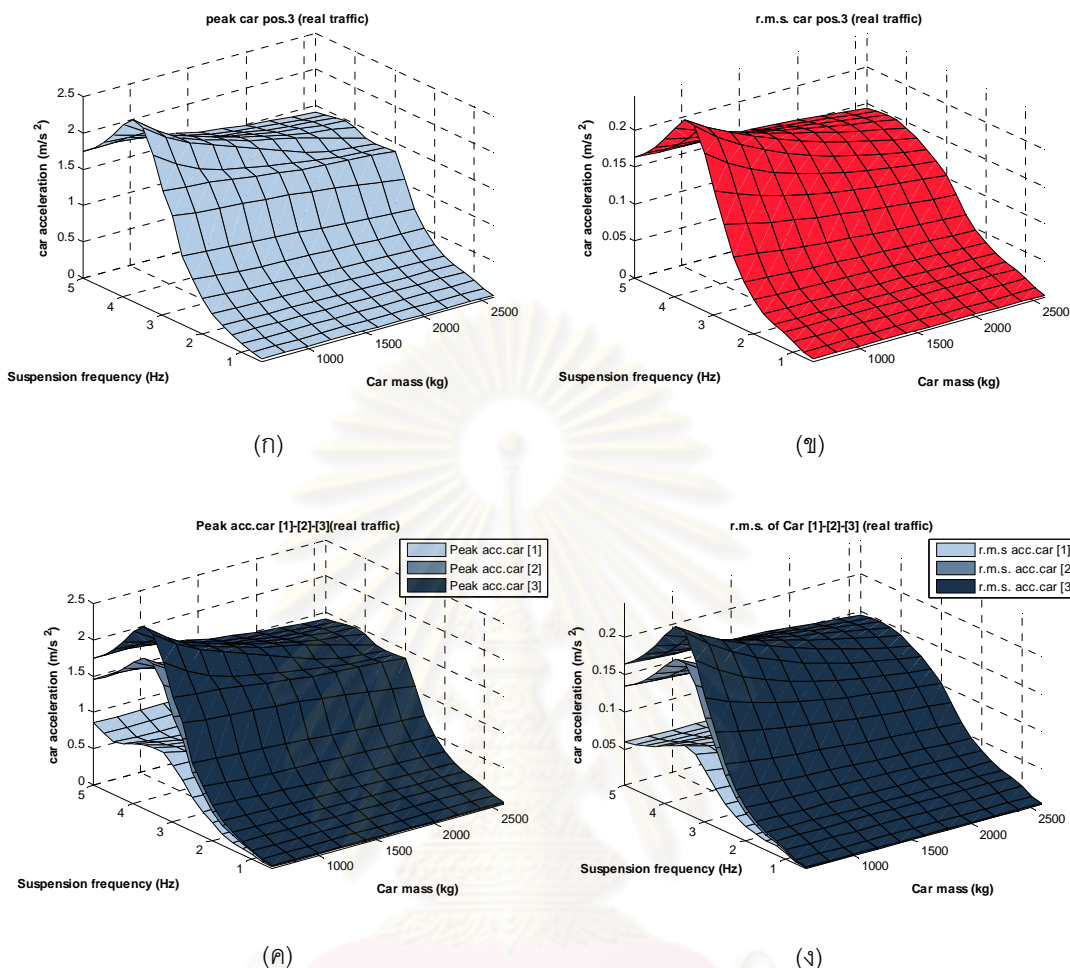
รูปที่ 6.18 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในรถยนต์คันที่ 1 และ 5 ภายใต้สภาพการจราจรปรกติ

- (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)
- (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)



รูปที่ 6.19 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในรถยนต์คันที่ 2 และ 4 ภายใต้สภาพการจราจรปรกติ

- (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)
- (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)



รูปที่ 6.20 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ภายใต้การจราจรปกติ

- (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)
- (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)
- (ค) ค่าความเร่งสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1,2 และ 3
- (ง) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1,2 และ 3

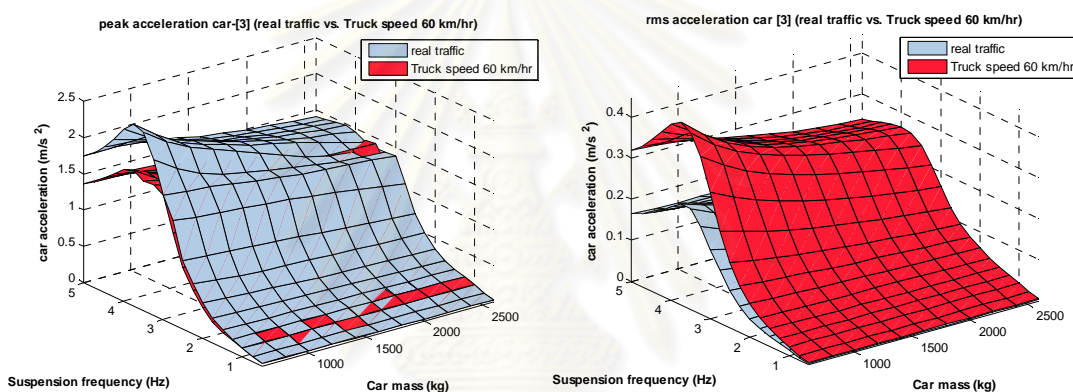
ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากภาพที่ 6.20 พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 มีค่าสูงกว่ารถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ตัวสะพานเกิดการสั่นไหวร่วมด้วย โดยมีรูปแบบการสั่นไหวในโหมดที่ 1 เป็นหลัก (Fundamental mode) ทำให้บริเวณกึ่งกลางช่วงสะพานมีระดับการสั่นไหวที่มากกว่าบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้รถที่จอดติดบริเวณดังกล่าวเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงกว่ารถยนต์ที่จอดอยู่ในตำแหน่งอื่น

จากตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาร่วมกับแผนภาพในรูปที่ 6.18 ถึง 6.20 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเร่งสูงสุดและค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของรถยนต์ประกอบไปด้วยค่ามวล ค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ และ ความเร็วในการวิ่งผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้ามของการจราจร โดยในส่วนของอิทธิพลจากมวลที่มีต่อค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับกรณีของการทดสอบสะพานจริงด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก กล่าวคือรถยนต์ที่มีค่ามวลสูงกว่าจะเกิดค่าความเร่งสูงสุดน้อยกว่ารถยนต์ที่มีค่ามวลน้อยกว่าเล็กน้อย โดยสามารถสังเกตค่าความเร่งสูงสุดในตารางที่ 6.4 พบว่าในกรณีที่รถยนต์มีค่ามวลเท่ากับ 800 kg และมีค่าความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 2.5 Hz จะเกิดค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.919 m/s^2 ส่วนในกรณีที่รถยนต์มีค่ามวลเท่ากับ 2600 kg และมีค่าความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 2.5 Hz จะเกิดค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.706 m/s^2 ซึ่งคิดเป็นเพียง 23.2 % ของค่าความเร่งสูงสุดที่ลดลงด้วยค่ามวลที่เพิ่มขึ้นถึง 1800 kg หรือคิดเป็น 3.25 เท่า แต่ทั้งนี้ในส่วนของอิทธิพลจากค่าความถี่ช่วงล่างนั้นกลับมีผลต่อค่าความเร่งสูงสุดอย่างมากซึ่งมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ที่ได้สัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับจากการทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก โดยค่าความเร่งสูงสุดจากตารางที่ 6.4 ในกรณีที่รถยนต์มีค่ามวลเท่ากับ 800 kg และมีค่าความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 1.0 Hz จะเกิดค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.114 m/s^2 แต่เมื่อรถยนต์ที่มีค่ามวลเท่ากันนี้มีค่าความถี่ช่วงล่างที่เพิ่มขึ้นเป็น 2.5 Hz กลับพบว่าค่าความเร่งสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.919 m/s^2 ซึ่งคิดเป็นความเร่งสูงสุดที่เพิ่มขึ้นถึง 700 % หรือคิดเป็น 8 เท่าด้วยความถี่ช่วงล่างที่เพิ่มขึ้นเพียง 1.5 Hz ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของลักษณะการวิ่งผ่านของพาหนะในฝั่งตรงข้ามของการจราจรในกรณีของการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ ซึ่งจากการสังเกตถึงพฤติกรรมโดยสัญญาณภาพที่ถูกบันทึกด้วยกล้องวงจรปิดในขณะที่ทำการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติพบว่าค่าความเร็วในการวิ่งผ่านของยานพาหนะในทิศทางที่การจราจรคล่องตัวอาจมีค่าสูงตั้งแต่ 90 km/hr จนถึง 120 km/hr เนื่องจากลักษณะของสะพานเหล็กข้ามทางแยกมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตรงที่ปราศจากทางโค้งประกอบกับสภาพการจราจรที่คล่องตัวทำให้ผู้ขับขี่ยานพาหนะที่ใช้บริการของสะพานเหล็กข้ามทางแยกสามารถขับชี่ยานพาหนะด้วยความเร็วสูง ซึ่งหากพิจารณาค่าความเร่งสูงสุดที่ปลายคานขวางดังตารางที่ 6.5 พบว่าค่าความเร่งสูงสุดในกรณีของการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติมีค่าเท่ากับ 0.74 m/s^2 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าความเร่งสูงสุดที่ปลายคานขวางในกรณีที่ทดสอบสะพานจริงด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

ตารางที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบสะพานจริงระหว่างกรณีการทดสอบภายใต้การจราจรปกติและการทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr

sensor	Real traffic		Truck (speed 60 km/hr)	
	peak	r.m.s.	peak	r.m.s.
A1	0.474	0.033	0.258	0.031
A2	0.739	0.037	0.185	0.028
D1	0.003	0.001	0.006	0.001
D2	0.006	0.001	0.006	0.001

นอกจากนี้สภาพการจราจรที่แท้จริงการวิ่งผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้ามของการจราจรยังมียานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านมากกว่าหนึ่งคันซึ่งแตกต่างจากกรณีการทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงกันข้ามที่มีการวิ่งผ่านเพียงครั้งเดียวสำหรับการทดสอบในแต่ละกรณีความเร็ว ถึงแม้ว่าจากการสังเกตสัญญาณภาพที่บันทึกได้จากกล้องวงจรปิดที่พบว่ามียานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะวิ่งผ่านความยาวช่วงสะพานในทิศทางที่การจราจรคล่องตัวเพียงหนึ่งคันแต่ในเวลาใกล้เคียงกันก็จะมีรถเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะตามมาอยู่ตลอดเวลาทำให้สะพานเกิดการสะสมพลังงานจากการสั่นไหวเมื่อมียานพาหนะวิ่งผ่านด้วยความเร็วสูงในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สะพานจึงยังไม่สามารถสลายพลังงานจากการสั่นไหวที่เกิดขึ้นนี้ได้ทันโดยการเข้าสู่การสั่นไหวแบบอิสระได้ (Free vibration) เนื่องจากมีแรงกระทำที่ตัวสะพานอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นค่าความเร่งสูงสุดที่วัดได้นี้จึงมีค่าสูงกว่าค่าความเร่งที่วัดได้โดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามซึ่งมีสาเหตุมาจากการวิ่งผ่านด้วยความเร็วที่สูงกว่าและมีแรงกระทำอยู่อย่างต่อเนื่อง



(ก)

(ข)

รูปที่ 6.21 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ระหว่างกรณีการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ และการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

(ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response)

(ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS)

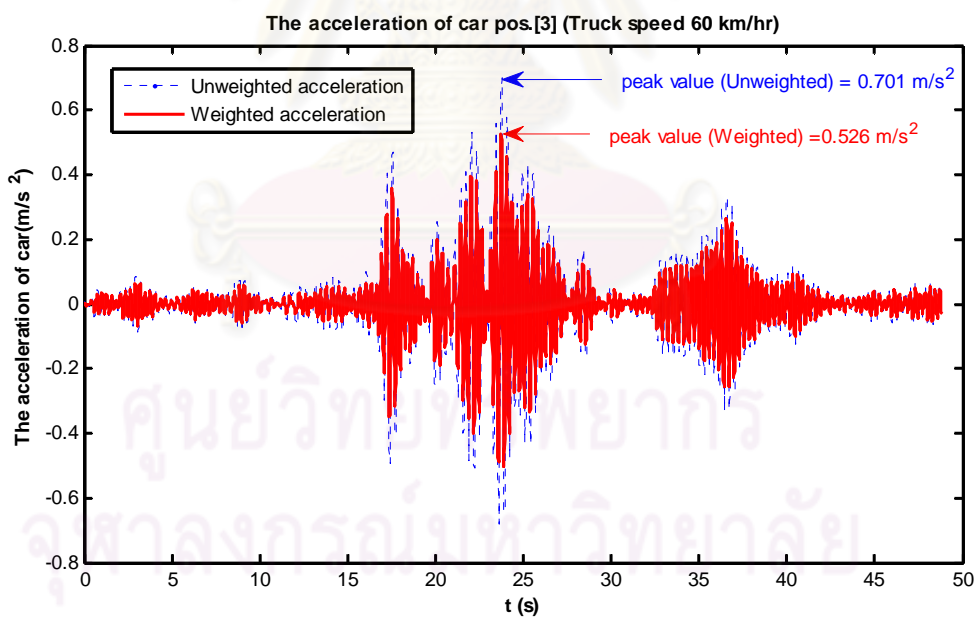
จากแผนภาพพื้นผิวในรูปที่ 6.21 พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดอยู่ในตำแหน่งที่ 3 ในกรณีที่ใช้สัญญาณที่จุดรองรับของสะพานจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกจะเกิดค่าความเร่งสูงสุดต่ำกว่าค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ แต่ในส่วนของความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ใช้สัญญาณที่จุดรองรับของสะพานจากการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกกลับมีค่าที่สูงกว่ากรณีการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกัน กล่าวคือยานพาหนะวิ่งผ่านสะพานในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็วสูงส่งผลให้เกิดผลตอบสนองกับสะพานที่สูงตามไปด้วย โดยความเร็วในการวิ่งผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้ามนั้นสูงกว่าความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกทำให้ปรากฏค่าความเร่งสูงสุดที่จุดรองรับในกรณี

การทดสอบภายใต้การจราจรปกติสูงกว่ากรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน แต่จากสภาพความเป็นจริงภายใต้การจราจรปกติการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้ามนั้นมียานพาหนะน้อยมากเนื่องจากการจราจรมีความคล่องตัวจึงไม่เกิดการสะสม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสัญญาณภาพโดยกล้องวงจรปิด ทำให้ช่วงเวลาที่เราปราศจากการวิ่งผ่านของยานพาหนะตลอดในช่วงระยะเวลา 10 นาทีของสัญญาณมีสัดส่วนที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับช่วงสัญญาณที่มีการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะ ดังนั้นสัญญาณที่ตรวจวัดได้โดยทั่วไปนอกเหนือจากช่วงที่มีการวิ่งผ่านของยานพาหนะจึงมีค่าที่ต่ำเนื่องจากไม่มีการวิ่งผ่านของยานพาหนะบนสะพาน แต่การหาค่าเฉลี่ยของความเร่งเป็นการเฉลี่ยรวมทั้งช่วงสัญญาณ 10 นาที ส่งผลให้ค่าความเร่งเฉลี่ยสูงกว่ากรณีการวิ่งผ่านของรถบรรทุกดังตารางที่ 6.5 ทั้งนี้ในส่วนของกรณีการวิ่งผ่านโดยรถบรรทุกมีช่วงสัญญาณที่สั้นกว่ามากเมื่อเทียบกับกรณีของสัญญาณการตรวจวัดภายใต้การจราจรอื่นทั้งค่าความเร่งสูงสุดยังมีค่าที่ต่ำกว่าจึงปรากฏค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่าดังตารางที่ 6.5 แต่สัญญาณโดยทั่วไปมีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากเป็นการเก็บข้อมูลเพียงในช่วงที่รถบรรทุกวิ่งอยู่บนสะพานเท่านั้น

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยข้อมูลการตรวจวัดสะพานจริงทั้งในส่วนของการทดสอบโดยการจำลองเหตุการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในฝั่งตรงข้ามและการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของรถยนต์เมื่อจอดติดอยู่บนสะพานจากผลตอบสนองของรถยนต์ในแต่ละตำแหน่ง โดยรถยนต์ในกลุ่มที่มีมวลน้อยและมีความถี่ช่วงล่างสูงจะเกิดผลกระทบที่รุนแรงจากการสั่นไหวของสะพานอันเนื่องมาจากการเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติในโหมดการสั่นไหวหลักของสะพาน และรถยนต์ที่จอดอยู่บริเวณกลางช่วงของสะพานจะมีการสั่นสะเทือนที่รุนแรงกว่าในตำแหน่งอื่นๆ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยข้อมูลการตรวจวัดสะพานจริงจากการทดสอบโดยการจำลองเหตุการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในฝั่งตรงข้ามนั้นทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานทั้งในส่วนของแต่ละตำแหน่งและกลุ่มคุณสมบัติของรถยนต์ที่จะเกิดผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนที่รุนแรงจากการสั่นไหวของสะพาน ทั้งนี้นอกจากพฤติกรรมที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นเพียงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากขนาดของความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ แต่ยังไม่สามารถระบุได้ถึงระดับความรุนแรงจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ดังนั้นผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะถูกนำไปใช้เพื่อประเมินถึงระดับความรุนแรงจากการสั่นสะเทือนโดยมาตรฐาน ISO 2631-1 ที่ได้กำหนดเกณฑ์ในการประเมินความรุนแรงจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถประเมินได้ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ทั้งผลกระทบต่อความรู้สึกและสุขภาพของผู้โดยสารภายในรถยนต์จากเกณฑ์ที่มาตรฐานได้ระบุไว้ ทั้งนี้การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนสำหรับการประเมินตามมาตรฐาน ISO 2631-1 จะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

6.3 ผลการประเมินการรับรู้ได้จากการสั่นสะเทือน (Perception evaluation)

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยสัญญาณจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในฝั่งตรงข้ามสามารถนำมาประเมินความสามารถในการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนของรถยนต์ได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการวิ่งผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้ามที่มีต่อรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งมีได้พิจารณาถึงผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยขั้นตอนและวิธีการประเมินเป็นไปตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ทั้งนี้ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนการสั่นสะเทือนของรถยนต์ถูกพิจารณาเพียงแค่นั้นในแนวตั้ง ดังนั้นการผ่านขั้นตอนถ่วงน้ำหนักตามความถี่ (Frequency weighting) จึงใช้ระบบการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ W_k ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามเส้นโค้งความสัมพัทธ์ในรูปที่ 4.2 เมื่อนำสัญญาณผ่านขั้นตอนการกรองโดยการถ่วงน้ำหนักตามความถี่จะทำให้ได้สัญญาณที่มีความถี่เหมาะสมสำหรับการประเมินตามเกณฑ์ต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นทั้งในส่วนของเกณฑ์ผลกระทบจากการสั่นสะเทือนต่อสุขภาพ ความรู้สึกสะอึกสะอวด ความสามารถในการรับรู้ได้ เป็นต้น ในส่วนของการประเมินถึงความสามารถในการรับรู้ได้ในหัวข้อนี้จะทำการประเมินจากขนาดความเร่งสูงสุดหลังจากกระบวนการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ ซึ่งผลการวิเคราะห์ขนาดความเร่งสูงสุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการถ่วงน้ำหนักสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.22 แสดงสัญญาณความเร่งทั้งก่อนและหลังผ่านการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 60 km/hr (มวลรถยนต์ 1400 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz)

ในการทำงานเดียวกันนี้ เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้สัญญาณการสั่นไหวที่จู่รองรับของสะพานที่เกิดจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 5, 30 และ 60 km/hr จะได้ผลการวิเคราะห์ที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 ตารางที่ 6.6 แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนหลังการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้การทดสอบด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก

Truck Speed (km/hr)	Car mass (kg)	Suspension frequency (Hz)											
		Car position 1				Car position 2				Car position 3			
		1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
5	800	0.024	0.057	0.104	0.192	0.045	0.103	0.196	0.364	0.052	0.116	0.225	0.423
	1400	0.023	0.056	0.100	0.175	0.045	0.100	0.183	0.318	0.051	0.112	0.209	0.386
	2000	0.023	0.056	0.096	0.163	0.044	0.097	0.172	0.287	0.050	0.108	0.195	0.355
	2600	0.023	0.056	0.093	0.154	0.043	0.093	0.161	0.261	0.049	0.107	0.181	0.321
30	800	0.021	0.044	0.089	0.172	0.048	0.105	0.205	0.382	0.057	0.126	0.247	0.457
	1400	0.021	0.043	0.084	0.154	0.047	0.101	0.192	0.330	0.056	0.122	0.231	0.388
	2000	0.020	0.042	0.079	0.136	0.046	0.098	0.180	0.286	0.055	0.118	0.216	0.337
	2600	0.020	0.041	0.074	0.123	0.046	0.094	0.168	0.250	0.054	0.114	0.201	0.292
60	800	0.043	0.070	0.138	0.267	0.073	0.125	0.265	0.515	0.083	0.150	0.311	0.606
	1400	0.043	0.067	0.133	0.246	0.072	0.119	0.249	0.452	0.082	0.146	0.291	0.526
	2000	0.043	0.065	0.128	0.228	0.070	0.114	0.234	0.399	0.080	0.141	0.270	0.458
	2600	0.042	0.064	0.123	0.214	0.069	0.110	0.220	0.355	0.079	0.136	0.253	0.404

จากตารางที่ 6.6 พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์หลังผ่านการถ่วงน้ำหนัก (Frequency weighting) มีค่าที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานการรับรู้ได้ถึงสั่นสะเทือนของ ISO 2631 ที่ระบุไว้เท่ากับ $0.015 m/s^2$ ซึ่งหมายความว่าอิทธิพลจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามของการจราจรส่งผลกระทบต่อสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจนเกิดความรู้สึกได้ในทุกรูปแบบของรถยนต์และทุกตำแหน่งของรถยนต์บนสะพาน ดังนั้นการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ภายใต้สั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในสภาวะปกติของการจราจรจึงมีความหมายและสำคัญอย่างยิ่งกับปัญหาที่เกิดขึ้นบนสะพานข้ามทางแยก เนื่องจากผลกระทบระยะยาวต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานอาจมีความรุนแรงจนทำให้ผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ในห้องโดยสารของรถยนต์ดังกล่าวเมื่ออยู่ภายใต้การจราจรที่ติดขัด ซึ่งในความเป็นจริงพบว่าการจราจรในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจนเกิดการติดขัดอย่างมากนั้นโดยเฉลี่ยอาจจะต้องใช้เวลานานถึงหนึ่งชั่วโมง จากการศึกษาสภาพการจราจรบนสะพานข้ามทางแยกแห่งหนึ่งโดยหน่วยงานสังกัดกรุงเทพมหานคร ทั้งนี้เมื่อนำกรณีของการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จู่รองรับจากการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อ

สั่นสะเทือนที่สามารถรับรู้ได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์หลังผ่านการถ่วงน้ำหนัก (Frequency weighting) มีค่าที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานการรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนของ ISO 2631-1 ที่ระบุไว้เท่ากับ 0.015 m/s^2 เช่นกัน โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.7 ดังนั้นทำให้เกิดความชัดเจนว่าการจากรบนสะพานข้ามแยกมีกระทบต่อการรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์เมื่อจอดติดอยู่บนสะพานซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการให้บริการของสะพานหลักข้ามทางแยก นอกจากผลกระทบในส่วนของ การรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นยังคงต้องประเมินถึงเกณฑ์อื่นๆตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ในหัวข้อถัดไป

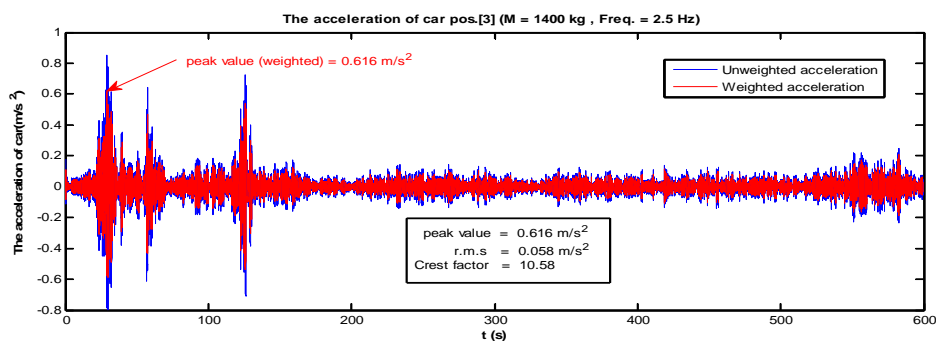
ตารางที่ 6.7 แสดงความเร่งสูงสุดของการสั่นสะเทือนหลังการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ของรถยนต์ที่จอดติดในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s^2) ภายใต้การจราจรปกติ

Car mass (kg)	Suspension frequency (Hz)											
	Car position 1				Car position 2				Car position 3			
	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
800	0.039	0.074	0.154	0.315	0.073	0.149	0.296	0.558	0.085	0.175	0.351	0.657
1400	0.038	0.071	0.151	0.299	0.071	0.141	0.266	0.503	0.083	0.165	0.312	0.616
2000	0.038	0.068	0.149	0.283	0.069	0.133	0.248	0.458	0.081	0.156	0.285	0.572
2600	0.037	0.066	0.146	0.267	0.068	0.126	0.237	0.423	0.079	0.148	0.263	0.524

ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบค่าในตารางที่ 6.6 และ 6.7 พบว่าค่าความเร่งสูงสุดจากการทดสอบที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอยู่ เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่จุดรองรับของสะพานมีลักษณะที่ต่างกัน กล่าวคือ ภายใต้การจราจรปกติสะพานข้ามทางแยกมีเพียงพาดหน้าที่ใช้โดยสารถ่วงน้ำหนักเท่านั้น ดังนั้นน้ำหนักของพาดหน้าและความเร็วในการวิ่งผ่านที่แตกต่างกันทำให้ค่าสัญญาณมีความแตกต่างกัน แต่เพื่อให้ผลการประเมินสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงจึงได้เลือกใช้สัญญาณที่ตรวจวัดได้ภายใต้การจราจรปกติ

6.4 ผลการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ (Comfort evaluation)

การประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ซึ่งมิได้พิจารณาถึงผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์สามารถนำผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำการประเมินตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631 โดยนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านเข้าสู่กระบวนการถ่วงน้ำหนักตามความถี่เพื่อให้ได้สัญญาณความเร่งแบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ (Frequency weighted acceleration, $a_w(t)$) และทำการคำนวณค่าความเร่งรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted r.m.s. acceleration value) ซึ่งในการประเมินจะต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีที่ใช้ในการประเมินจากค่า Crest factor ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.3 สำหรับผลการวิเคราะห์ค่า Crest factor สามารถแสดงได้ในตารางที่ 6.8



รูปที่ 6.23 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเร่งของรถยนต์สำหรับการคำนวณค่า r.m.s. และ Crest





ตารางที่ 6.8 แสดงค่า Crest factor ของสัญญาณความเร่งรถยนต์ที่จอดติดในที่ 1, 2 และ 3 ภายใต้การจราจรปกติ

Car mass (kg)	Suspension frequency (Hz)											
	Car position 1				Car position 2				Car position 3			
	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
800	7.651	9.205	10.804	11.662	9.353	9.939	10.307	10.068	9.480	9.729	10.196	9.870
1400	7.568	8.988	11.032	12.045	9.259	9.742	9.964	10.327	9.380	9.523	9.789	10.582
2000	7.487	8.790	11.225	12.232	9.166	9.526	9.894	10.518	9.282	9.295	9.554	11.048
2600	7.409	8.605	11.364	12.266	9.073	9.298	10.043	10.732	9.186	9.078	9.401	11.255

จากตารางที่ 6.8 พบว่าค่า Crest factor ที่คำนวณได้จากสัญญาณความเร่งของรถยนต์มีค่าที่สูงกว่า 9 เป็นส่วนมาก ซึ่งการใช้วิธีพื้นฐานในการประเมิน (Basic evaluation) อาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ดังนั้นควรใช้วิธีการประเมินที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.5 สำหรับการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบาย นั่นคือการใช้ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration value) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 แสดงความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดอยู่ในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (m/s²) ภายใต้การจราจรปกติ

Car mass (kg)	Suspension frequency (Hz)											
	Car position 1				Car position 2				Car position 3			
	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
800	0.064	0.101	0.247	0.456	0.101	0.197	0.388	0.754	0.114	0.232	0.461	0.919
1400	0.063	0.100	0.241	0.430	0.099	0.186	0.370	0.700	0.112	0.219	0.410	0.850
2000	0.063	0.099	0.234	0.406	0.097	0.176	0.352	0.643	0.111	0.207	0.374	0.779
2600	0.063	0.099	0.228	0.383	0.094	0.170	0.333	0.585	0.109	0.198	0.350	0.706

	not uncomfortable
	a little uncomfortable
	fairly uncomfortable
	uncomfortable

ค่าที่แสดงในตารางที่ 6.9 สามารถนำไปประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายที่นำเสนอโดยมาตรฐาน ISO 2631 ตามตารางที่ 4.5 โดยผลการประเมินสามารถจำแนกได้เป็นแถบสีที่แรงงาในตาราง ซึ่งผลการประเมินพบว่ารถยนต์ที่จอดติดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานเกิดการสั่นสะเทือนจนทำให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบาย โดยเฉพาะรถยนต์ที่มีมวลน้อยแต่มีความถี่ช่วงล่างสูง อย่างไรก็ตามเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายนี้ไม่ได้คำนึงถึงระยะเวลาในการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน ซึ่งไม่สามารถบอกได้ว่าผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายจะส่งผลต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ในห้องโดยสารหรือไม่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนกระทั่งรถยนต์เคลื่อนตัวลงจากสะพาน

6.5 ผลการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ (The effect of vibration on health)

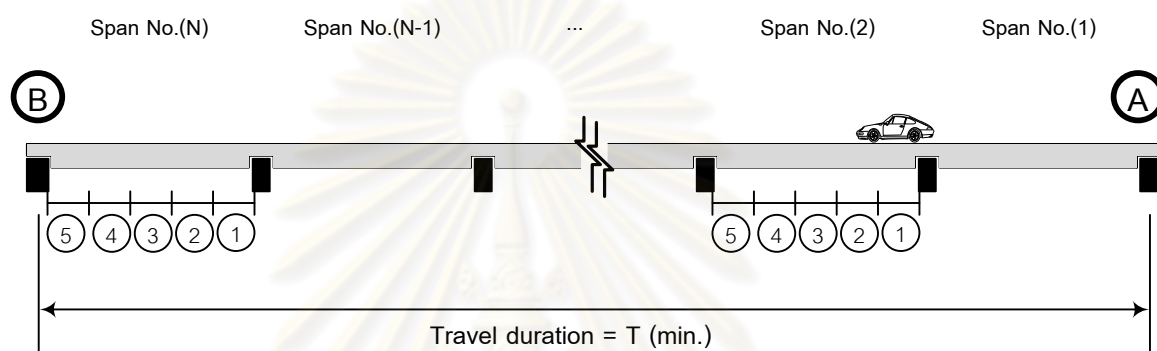
การจราจรที่หนาแน่นบนสะพานข้ามทางแยกเพียงในทิศทางหนึ่งทำให้สามารถรับรู้ได้ถึง การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นกับผู้โดยสารในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานเมื่อในทิศทางตรงข้ามของการจราจรมียานพาหนะวิ่งผ่านด้วยความเร็วอันเนื่องมาจากการจราจรในทิศทางนั้นมีความคล่องตัว นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายขึ้นจากการประเมินตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1 ซึ่งผลกระทบดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพขึ้นได้ในระยะยาว เนื่องจากสภาพการจราจรที่ติดขัดบนสะพานเหล็กข้ามทางแยก อาจต้องใช้ระยะเวลายาวนานถึงหนึ่งชั่วโมง ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 6.3 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ทำการนำเสนอการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพของผู้โดยสารที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งมิได้พิจารณาถึงผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ โดยหลักการและขั้นตอนของการประเมินตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1 ที่ได้นำเสนอด้วยแผนภาพในรูปที่ 4.4

จากตารางที่ 6.8 แสดงให้เห็นได้ว่าค่า Crest factor ตามตารางมีค่าที่สูงกว่า 9 เป็นส่วนมากดังนั้น เพื่อให้การประเมินเกิดความแม่นยำมากขึ้น จึงเลือกใช้ Additional method สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพของผู้โดยสารในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานเหล็กข้ามทางแยก ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ค่า Vibration Dose หรือ *VDV*

6.5.1 การประยุกต์เพื่อคำนวณค่า Vibration Dose (*VDV*) ของสัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่รวมผลของเวลาและการเปลี่ยนตำแหน่ง

สัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีช่วงเวลาทั้งสิ้น 10 นาทีจากการใช้สัญญาณการสั่นไหวบริเวณจุดรองรับที่เลือกใช้เป็นตัวแทนสัญญาณทั้งหมดเป็นเวลา 10

นาที แต่ในความเป็นจริงช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ผ่านสะพานเหล็กข้ามทางแยกตลอดทั้งสะพานมีความเป็นไปได้สูงที่จะยาวนานกว่า 10 นาทีอีกทั้งบางช่วงรถยนต์อาจมีการเคลื่อนที่ไปได้อย่างช้าๆ สลับกับการหยุดนิ่ง ทำให้เกิดผลจากการเปลี่ยนตำแหน่งของรถยนต์รวมอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อให้สามารถคำนวณค่า Vibration Dose (VDV) ของสัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในช่วงเวลาที่มากกว่า 10 นาทีขึ้นไปและมีผลของการเปลี่ยนตำแหน่งรวมอยู่ในกระบวนการวิเคราะห์นี้ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการประยุกต์สมการที่ 4.7 สำหรับคำนวณค่า Vibration Dose (VDV)



รูปที่ 6.24 แสดงภาพตัดทางขวางของสะพานและตำแหน่งของรถยนต์ในแต่ละช่วงของสะพาน

จากสมการที่ 4.7 สามารถเปลี่ยนสมการการหาค่า Vibration Dose (VDV) ให้อยู่ในรูปสมการแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete time system) ได้ดังสมการที่ 6.1

$$VDV = \left[\sum_{t=1}^{t_n} a_w^4(t) \cdot \Delta T \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6.1)$$

โดยที่ $a_w(t)$ คือ ความเร่งที่ได้จากกระบวนการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration)

ในหน่วย m/s^2

t_n คือ ระยะเวลาทั้งหมดของการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน ในหน่วยวินาที

ΔT คือ ช่วงคาบของการสั่นสะเทือนระหว่างจุดของเวลาใดๆ (sampling period) ในหน่วยวินาที

ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดความซับซ้อนขึ้นในการสังเคราะห์สมการที่ใช้ในการหาค่า a_w จึงได้สร้างเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์โดยการกำหนดให้ค่า Vibration Dose (VDV) มีค่าคงที่ทุกๆ 1 นาทีของสัญญาณ จากสมการที่ 4.8 หมายถึงสมการคำนวณค่า Vibration Dose (VDV) ของตำแหน่งรถยนต์คันที่ j ดังนั้นค่า Vibration Dose (VDV) ยาวนาน 10 นาทีที่สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ 4.8 ดังนี้

$$VDV_{10\min}^{(j)} = \left[\sum_{r=1}^{10} [VDV_{1\min}^{(j)}]_r^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6.2)$$

หรือ

$$VDV_{10\min}^{(j)} = \sqrt[4]{\frac{10}{F_s} \left(\sum_{t_i=1}^{t_n=10} a_{w,eq}^4(t_i) \right)} \quad (6.3)$$

โดยที่ $a_{w,eq}(t_i)$ คือ ความเร่งที่ได้จากกระบวนการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration) ต่อหนึ่งนาที่เทียบเท่าที่ตำแหน่ง j

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ 6.1 จะสามารถหาผลรวมกำลังสี่ของค่าความเร่งที่ได้จากกระบวนการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration) ต่อหนึ่งนาที่เทียบเท่าที่ตำแหน่ง j ได้; $a_{w,eq}(t_i)$ ได้ดังต่อไปนี้

$$\sum_{t_i=1}^{t_n} a_{w,eq}^4(t_i) = \sqrt[4]{\frac{1}{10} \left(\sum_{t_i=1}^{t_n} a_w^4(t_i) \right)} \quad (6.4)$$

เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนตำแหน่งของรถยนต์จากการเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆ สลับการหยุดนิ่งแล้วสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่า VDV ได้ใหม่ดังสมการที่ 6.5

$$VDV = \left[\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^5 \sum_{t_i=1}^{t_n} \left\{ a_{w,eq}^4(t_i) \cdot \left(\frac{1}{F_s} \right) \right\}_j \Delta T_j \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6.5)$$

โดยที่ $a_w(t_i)$ คือ ความเร่งที่ได้จากกระบวนการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted acceleration) ต่อหนึ่งนาที่ที่ตำแหน่ง j

N_s คือ จำนวนช่วงทั้งหมดของสะพาน

F_s คือ ค่าความถี่ของสัญญาณความเร่ง (sampling frequency)

t_i และ t_n คือ เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดในการเคลื่อนที่ผ่านสะพานของรถยนต์ตามลำดับ

ΔT_j คือ ช่วงระยะเวลาในการเปลี่ยนตำแหน่งของรถยนต์ในแต่ละช่วงความยาวของสะพาน

$$\text{มีค่าเท่ากับ } \frac{T}{5N}$$

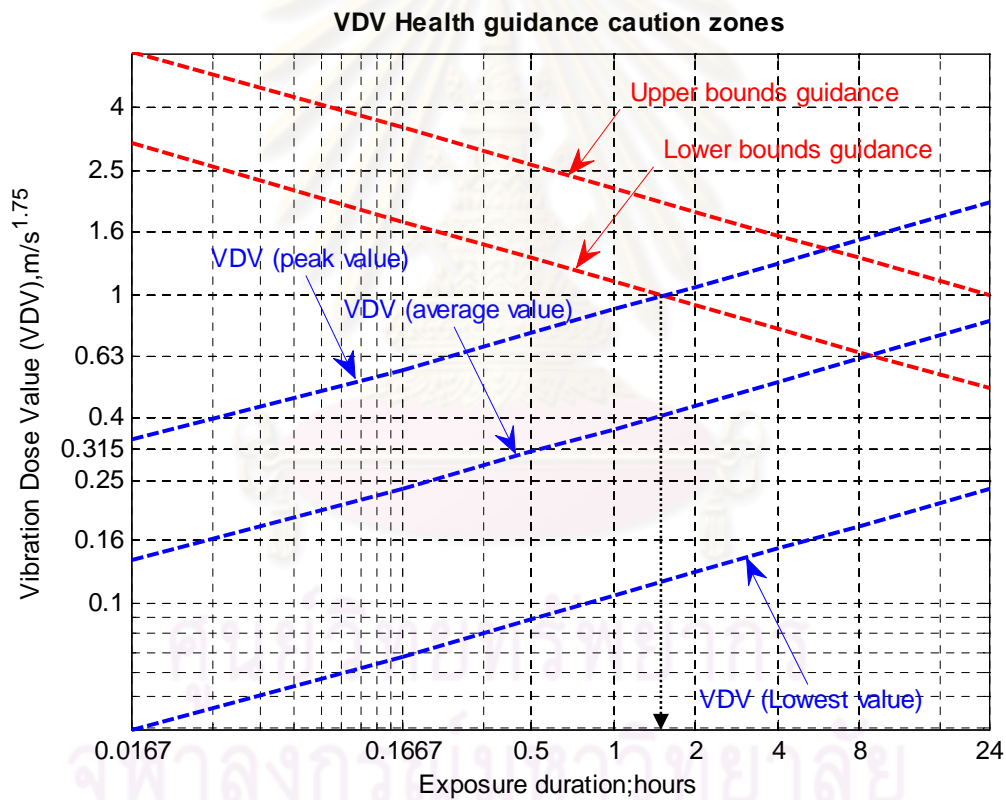
แต่เนื่องจากค่า VDV ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในแต่ละช่วงของสะพานมีค่าที่เท่ากันเมื่อเทียบตำแหน่งของรถยนต์ในแต่ละตำแหน่ง โดยมีจำนวนช่วงความยาวสะพานทั้งสิ้น N_s ช่วง ดังนั้นจากสมการที่ 6.5 สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 6.6

$$VDV = \left[N_s \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{t_i=1}^{t_n} \left[\left\{ a_{w,eq}^4(t_i) \cdot \left(\frac{1}{F_s} \right) \right\}_j \frac{T}{5N_s} \right] \right]^{\frac{1}{4}} \tag{6.6}$$

หรือ

$$VDV = \left[\frac{T}{5F_s} \cdot \sum_{j=1}^5 \sum_{t_i=1}^{t_n} \left[\left\{ a_{w,eq}^4(t_i) \right\}_j \right] \right]^{\frac{1}{4}} \tag{6.7}$$

จากสมการที่ 6.7 หมายถึงค่า Vibration Dose (VDV) ทั้งหมดตลอดการเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งใดๆ j บนสะพาน เมื่อกำหนดให้เวลาทั้งหมดของการเคลื่อนที่ผ่านสะพานเท่ากับ T นาที ซึ่งจากผลการประเมินสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.25 แผนภาพแสดงการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือนตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1

จากแผนภาพแสดงการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือนตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1 ในรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่าค่า VDV ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อรถยนต์ต้องจอดติดอยู่บนสะพานนานขึ้น ในขณะที่เกณฑ์การพิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพตามมาตรฐานกลับมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลายาวนานขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเป็นจริงเกี่ยวกับความสามารถในการอยู่ภายใต้

ของมนุษย์จะลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไปทำให้เกณฑ์สำหรับการประเมินจะต้องถูกควบคุมให้มีระดับของเกณฑ์ที่ต่ำลง ในขณะที่ระดับความรุนแรงต่อความรู้สึกของมนุษย์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจากผลการประเมินพบว่าการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้โดยสารซึ่งอยู่ในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานในทิศทางที่การจราจรหนาแน่นเมื่อใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านสะพานประมาณ 1 ชั่วโมง 36 นาที (1.60 ชั่วโมง)

6.6 ผลการประเมินผลกระทบต่อภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว (Motion Sickness)

การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานสามารถทำได้โดยการพิจารณารณีกการสั่นสะเทือนของรถยนต์อยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 2631 สำหรับการประเมินผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว จากตารางที่ 6.2 ค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.5 Hz จึงสามารถนำผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1 และ 5 ในกรณีนี้มาทำการประเมินผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหวตามหลักการที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.6 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับจุดรองรับทั้งสองข้างซึ่งเกิดการเคลื่อนที่แบบปราศจากการดัด (Rigid body motion) ด้วยความถี่ต่ำในสภาวะเริ่มต้นก่อนที่จะเกิดการดัดในโหมดหลักของการสั่นไหวในสภาวะต่อมา ทำให้มีความเป็นไปได้ในการเกิดผลกระทบต่อรถยนต์โดยสารที่อยู่ในตำแหน่งทั้งสองนี้มากกว่าตำแหน่งอื่น โดยค่า $MSDV$ ในการวิเคราะห์นี้ได้ใช้ค่าการถ่วงน้ำหนักตามย่านความถี่ W_f ที่ความถี่ 0.5 Hz ซึ่งตรงกับค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.224 ตามตารางที่ 3 ในมาตรฐาน ISO 2631-1 [6] โดยถือเป็นการวิเคราะห์ในเชิงอนุรักษ์เนื่องจากค่าตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักที่ความถี่สูงกว่า 0.5 Hz จะมีค่าที่ต่ำกว่า 0.224 จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อความถี่มีค่าเท่ากับ 4 Hz ดังนั้นค่า $MSDV$ ในรูปร้อยละจากการคูณด้วยค่าคงที่ K_m (มีค่าเท่ากับ 1/3) สามารถแสดงไว้ในตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 แสดงค่า $K_m \cdot MSDV$ ในรูปแบบร้อยละ ในกรณีที่มีรถยนต์มีค่าความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 0.5 Hz

Car pos.	Car mass (kg)										
	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
[1]	0.320	0.320	0.320	0.320	0.319	0.319	0.319	0.319	0.318	0.318	0.318
[5]	0.364	0.363	0.363	0.363	0.363	0.363	0.362	0.362	0.362	0.362	0.362

จากตารางที่ 6.10 พบว่าค่าที่แสดงในตารางมีค่าร้อยละความเป็นไปได้ที่ต่ำมาก โดยสามารถเปรียบเทียบได้กับจำนวนผู้โดยสารที่อยู่ภายในห้องโดยสารรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจำนวน 1000 คนจะมีผู้โดยสารน้อยกว่า 4 คนที่ได้รับผลกระทบในภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหวถึงแม้ว่าจะเป็นค่าร้อยละที่เกิดจากการวิเคราะห์ในเชิงอนุรักษ์ ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ไม่ปรากฏการร้องเรียนอย่างเป็นทางการจากผู้ใช้บริการสะพานข้ามทางแยกถึงผลกระทบจากการสั่นไหวของสะพานจนนำไปสู่อาการป่วยในลักษณะที่เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน

อย่างไรก็ตามอาการคลื่นไส้และอาเจียนของผู้ใช้บริการสะพานข้ามทางแยกอาจเกิดขึ้นได้บ้างจากเงื่อนไขในบางสภาวะ อาทิเช่น สภาพร่างกายที่ไม่ปรกติจากอาการป่วยอื่นๆ หรือสภาวะทางอารมณ์ที่ก่อให้เกิดความเครียด จากสภาพการจราจรที่ติดขัดบนสะพานข้ามทางแยกเป็นการกระตุ้นจนนำไปสู่อาการคลื่นไส้อาเจียน เป็นต้น ซึ่งสาเหตุที่กล่าวมานี้มิใช่ผลกระทบที่เกิดจากการสั่นไหวของสะพาน แต่เกิดจากตัวบุคคลที่มีสภาพทางร่างกายที่แตกต่างกัน

6.7 ผลกระทบต่อผู้โดยสารในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานข้ามทางแยกจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับผู้โดยสารที่อยู่ภายในรถยนต์ภายใต้การจราจรที่หนาแน่นบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกจากการประเมินโดยเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1 ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.4 ถึง 6.6 สามารถสรุปได้ว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นภายในรถยนต์ภายใต้การจราจรที่หนาแน่นบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกส่งผลกระทบต่อความรู้สึกได้ถึงถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นซึ่งมีความสอดคล้องกันกับการร้องเรียนของผู้ใช้สะพานข้ามทางแยกต่อกรุงเทพมหานครถึงการสั่นสะเทือนนี้มาตลอด นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกที่สะดวกสบายของผู้โดยสารที่อยู่ในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานข้ามทางแยก ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์ของรถยนต์ในบางกรณีเกิดผลกระทบต่อความรู้สึกจนถึงระดับที่ทำให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายขึ้นได้ และเมื่อขยายผลในการประเมินออกไปเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสุขภาพ พบว่าความรู้สึกไม่สะดวกสบายต่อผู้โดยสารในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจะเริ่มมีผลกระทบเมื่อระยะเวลาในการอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนประมาณ 1 ชั่วโมง 36 นาที (1.60 ชั่วโมง) ขึ้นไป ทั้งนี้จากการประเมินทำให้สามารถสรุปได้ว่าการสั่นไหวของสะพานจะส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้โดยสารถึงการสั่นสะเทือน กล่าวคือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสามารถรับรู้ได้โดยผู้โดยสารในรถยนต์นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อความรู้สึกที่สะดวกสบาย และอาจมีความเป็นไปได้ที่การสั่นไหวของสะพานจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้โดยสารภายในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ในทิศทางที่การจราจรหนาแน่น แต่โอกาสของการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพมีความเป็นไปได้น้อย นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้เล็กน้อยมากที่การสั่นไหวของสะพานจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้บริการสะพานข้ามทางแยกจนทำให้เกิดภาวะป่วยจากการเคลื่อนไหว

บทที่ 7

ความเป็นไปได้ในการลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ด้วยมวลหน่วงปรับค่า

การสั่นสะเทือนที่เกิดกับรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพาน ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติของสะพานที่อยู่บนปลายคานขวางเดียวกันเมื่อเกิดการสั่นไหวจะส่งผลกระทบต่อสะพานที่อยู่ในทิศทางการจราจรตรงข้าม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานในทิศทางดังกล่าว โดยจากผลการประเมินการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631 (1997) พบว่าการสั่นสะเทือนดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ส่งผลกระทบต่อคนทำให้เกิดการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนได้ และมีแนวโน้มสูงที่จะส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายกับผู้โดยสารได้ ทั้งนี้ปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงสาเหตุจากความสามารถในการให้บริการของสะพานข้ามทางแยก ซึ่งควรจะมีการแก้ไขแต่เนื่องจากสะพานข้ามทางแยกมีอัตราการรองรับในการให้บริการที่สูงมากในแต่ละวัน ดังนั้นแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้นต้องไม่ส่งผลกระทบต่อให้บริการของสะพานมากนัก แนวทางหนึ่งสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้มวลหน่วงปรับค่า (Tuned-Mass-Damper; TMD) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดผลตอบสนองของรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพาน

7.1 มวลหน่วงปรับค่า

มวลหน่วงปรับค่า (Tuned-Mass-Damper; TMD) คืออุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยการดูดซับพลังงานการสั่นไหวของโครงสร้างเข้าสู่มวลที่ติดตั้งไว้ ระบบมวลหน่วงปรับค่าอาศัยหลักการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบ 3 ส่วนคือ มวล สปริง ตัวหน่วง ระบบมวลหน่วงปรับค่ามีทั้งระบบเดี่ยว (Single TMD) และระบบกลุ่ม (Multiple TMDs) ในที่นี้จะนำเสนอการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยวเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงความสามารถของมวลหน่วงปรับค่าที่มีผลต่อการลดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน การใช้ระบบมวลหน่วงปรับค่าจะต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม (Optimum design) จึงจะได้ระบบที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานเพื่อลดการสั่นไหวที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาหลายงานได้นำเสนอสูตรสำเร็จสำหรับการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่เหมาะสม โดยในขั้นตอนการออกแบบจะทำการคำนวณพารามิเตอร์ที่เหมาะสม 2 ส่วนประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างความถี่ และอัตราส่วนระหว่างความหน่วง จากสมการทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\mu = \frac{M_{TMD}}{M_{Structure}} \quad (7.1)$$

โดยที่ μ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลหน่วงที่ได้จากการสมมติขึ้นกับมวลของโครงสร้าง

$$\alpha = \frac{\omega_{TMD}}{\omega_{Structure}} = \frac{1}{1 + \mu} \tag{7.2}$$

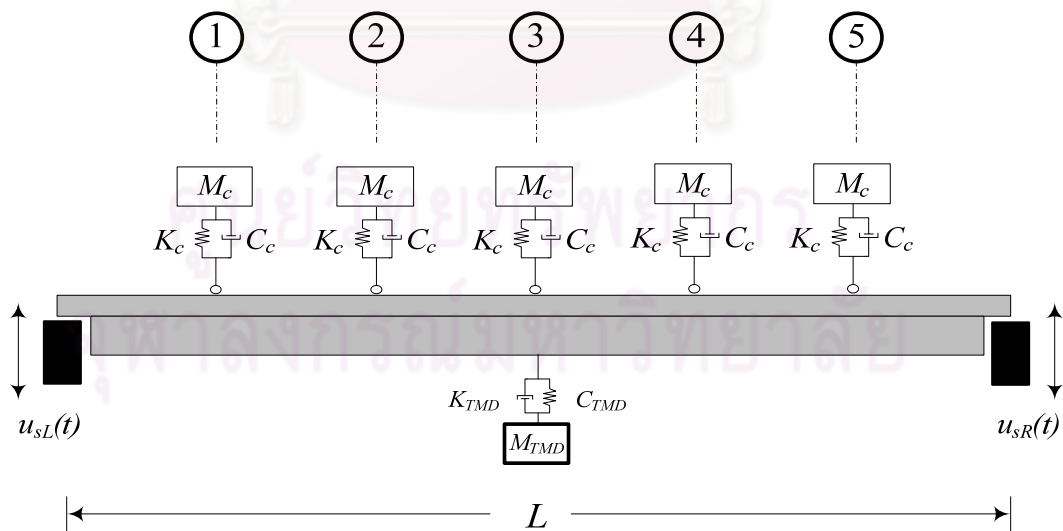
โดยที่ α คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ากับความถี่ของโครงสร้างในโหมดหลัก

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \tag{7.3}$$

โดยที่ ζ_{opt} คือ อัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมในการออกแบบมวลหน่วงปรับค่า

7.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ดังรูปที่ 7.1 สามารถใช้หลักการที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2 ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของรถยนต์และโครงสร้างสะพานรวมถึงมวลหน่วงปรับค่าได้ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์มีลักษณะที่คล้ายกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองที่ผ่านมาในบทที่ 5 ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มและประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าที่มีผลต่อการลดผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจะทำการพิจารณาแบบจำลองในบางกรณีจากกรณีที่ได้ศึกษามาแล้วในบทที่ 5 และ 6



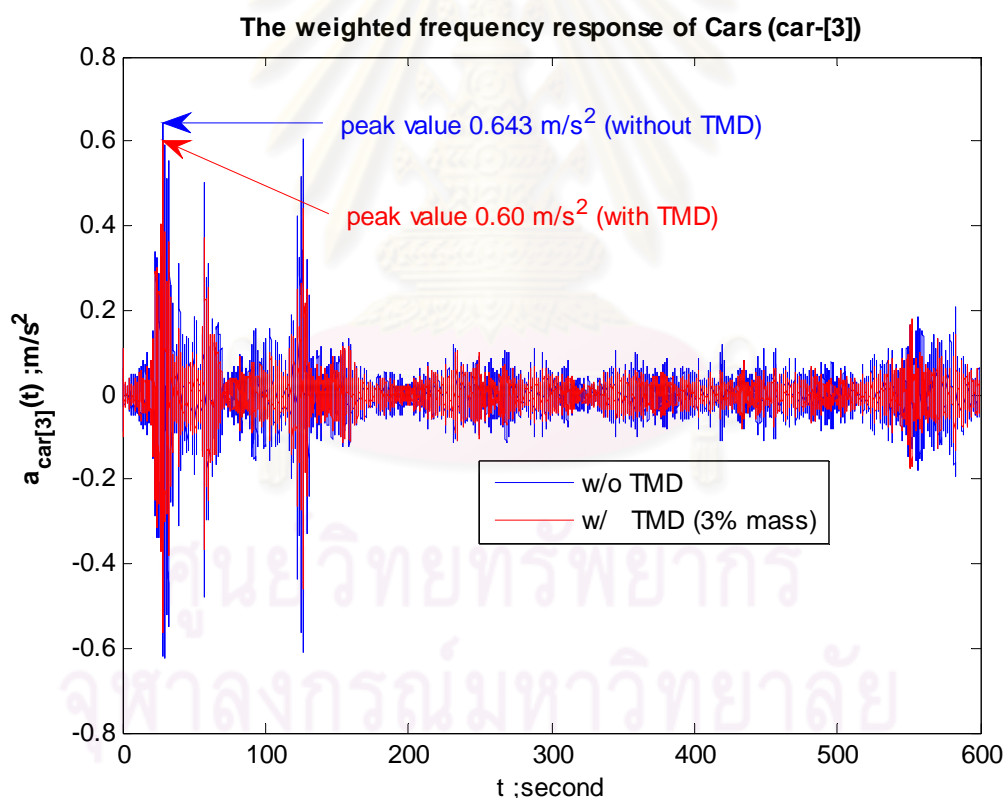
รูปที่ 7.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

ในที่นี้ได้เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่รถยนต์มีคุณสมบัติด้านมวลค่าหนึ่งและความถี่ช่วงล่างกลุ่มหนึ่งเพื่อใช้ศึกษาความสามารถในการลดผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน ในส่วนของมวลหน่วง

ปรับค่าจะทำการกำหนดคุณสมบัติด้านมวลจำนวน 2 ค่าและใช้สมการที่ 7.1 ถึง 7.3 ในการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาต่อไป

7.3 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานภายหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของรถยนต์จากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่ตำแหน่งกลางช่วงของสะพานสามารถแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานและเมื่อนำผลการวิเคราะห์ไปเข้าสู่กระบวนการประเมินผลกระทบต่อผู้โดยสารจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานตามเกณฑ์มาตรฐานของ ISO 2631-1 ในการวิเคราะห์นี้ได้เลือกค่าคุณสมบัติของรถยนต์บางกรณีเพื่อใช้ในการศึกษา โดยเลือกให้มวลของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานมีค่าเท่ากับ 1000 kg และค่าความถี่ช่วงล่างที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 7.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งของรถยนต์ระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีมวลเป็น 3 % ของมวลสะพาน ในกรณีที่รถยนต์มีมวล 1000 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz

จากรูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งของรถยนต์แบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ในกรณีก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีการกำหนดให้มีมวลเป็น 3% ของมวลสะพาน และรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานมีค่ามวลเท่ากับ 100 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz ซึ่งพบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดผลตอบสนองเชิง

ความเร่งของรถยนต์ได้ แต่ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์กรณีต่างๆซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 7.1 พบว่าแนวโน้มของมวล
 หน่วงปรับค่ามีแนวโน้มที่สามารถลดผลตอบสนองของรถยนต์ได้เมื่อกำหนดให้มวลมีค่ามากขึ้น

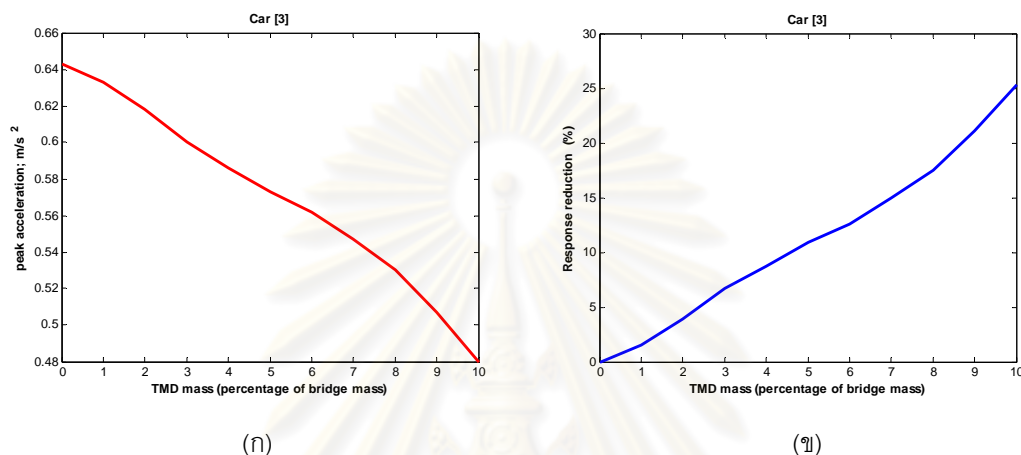
ตารางที่ 7.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเร่งแบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ (Frequency weighted acceleration,
 $a_w(t)$) ของแบบจำลองทางรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

Car Freq.	Car pos.	PEAK			RMS			VDV		
		w/o TMD	$\mu = 1\%$	$\mu = 3\%$	w/o TMD	$\mu = 1\%$	$\mu = 3\%$	w/o TMD	$\mu = 1\%$	$\mu = 3\%$
1.0 Hz	1	0.039	0.032	0.031	0.005	0.005	0.005	0.041	0.037	0.035
	2	0.072	0.056	0.046	0.008	0.006	0.006	0.073	0.056	0.048
	3	0.085	0.067	0.061	0.009	0.007	0.006	0.088	0.066	0.056
1.5 Hz	1	0.072	0.066	0.061	0.008	0.007	0.007	0.073	0.062	0.055
	2	0.145	0.122	0.11	0.015	0.011	0.009	0.152	0.112	0.09
	3	0.172	0.143	0.129	0.018	0.013	0.011	0.184	0.133	0.107
2.0 Hz	1	0.153	0.146	0.137	0.014	0.012	0.011	0.148	0.126	0.111
	2	0.283	0.242	0.217	0.028	0.022	0.018	0.297	0.23	0.188
	3	0.338	0.276	0.254	0.034	0.025	0.021	0.355	0.271	0.222
2.5 Hz	1	0.309	0.296	0.271	0.026	0.023	0.021	0.293	0.262	0.236
	2	0.537	0.512	0.474	0.053	0.044	0.039	0.569	0.486	0.424
	3	0.643	0.633	0.6	0.064	0.053	0.046	0.677	0.579	0.513

	not uncomfortable
	a little uncomfortable
	fairly uncomfortable

ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์แบบถ่วงน้ำหนักตามความถี่ดังแสดงในตารางที่ 7.1 สามารถนำไป
 ประเมินผลกระทบต่อความสามารถในการรับรู้ได้จากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นรวมถึงความรู้สึกสะดวกสบาย ซึ่ง
 ผลการประเมินที่วิเคราะห์ดังตารางที่ 7.1 พบว่าความเร่งที่เกิดขึ้นยังคงอยู่ในสภาวะที่สามารถรับรู้ได้ แต่ในส่วน
 ของผลกระทบที่มีต่อความรู้สึกสะดวกสบายมีแนวโน้มในระดับที่ลดลง

เมื่อทำการขยายผลการพิจารณาคุณสมบัติของรถยนต์ตัวอย่างบางคุณสมบัติต่อผลจากการติดตั้งมวล
 หน่วงปรับค่า ซึ่งในที่นี้เลือกรถยนต์ที่มีคุณสมบัติเชิงมวลเท่ากับ 1000 kg และความถี่ช่วงล่างเท่ากับ 2.5 Hz
 โดยมีการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติด้านมวลของมวลหน่วงปรับค่า จากการกำหนดค่ามวลของมวลหน่วงปรับค่าให้
 แปรเปลี่ยนไปเริ่มจาก 1 ถึง 10 % ทั้งนี้ในแต่ละกรณีจะมีการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าโดยมีค่ามวลเป็นตัวแปร
 ต้นซึ่งมีคุณสมบัติของสปริงและความหน่วงเป็นตัวแปรตาม ดังแสดงในรูปที่ 7.3 (ก) และ (ข)



รูปที่ 7.3 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของรถยนต์ที่จอดติดอยู่กลางช่วงสะพานเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับ
 สะพาน (ก) ผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์จากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า
 (ข) ประสิทธิภาพของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีต่อรถยนต์ (%)

การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีอิทธิพลต่อผลตอบสนองเชิงความเร่งของรถยนต์จนส่งผลให้การประเมินผลกระทบ
 จากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่มีต่อผู้โดยสารมีระดับที่เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม
 ก็ตามการที่จะลดระดับความรู้สึกไม่สะดวกสบายของผู้โดยสารที่อยู่ภายในรถยนต์ที่จอดติดอยู่เกิดการ
 สั่นสะเทือนจากการสั่นไหวของสะพานอาจต้องใช้มวลหน่วงที่มีค่ามวลมากถึง 10 % ของมวลสะพาน ซึ่งปริมาณ
 มวลขนาดดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อการแอ่นตัวของสะพานอันเนื่องมาจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ให้กับ
 สะพานในการแบกรับมวลหน่วงปรับค่า ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการใช่มวลหน่วงปรับค่า
 ควรจะมีการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานที่มีการสั่นไหวที่
 จุดรองรับ แต่สูตรคำนวณค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของมวลหน่วงในกรณีศึกษาเป็นสูตรการออกแบบทั่วไปที่ยัง
 ไม่สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาโดยตรง หรือการใช่มวลหน่วงปรับค่าแบบกลุ่ม
 (Multiple TMD) ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานซึ่งมีผลต่อผู้โดยสารที่อยู่
 ภายในรถยนต์

บทที่ 8

อภิปรายและบทสรุปของงานวิจัย

ความสามารถในการให้บริการของสะพาน (Serviceability) นั้นประเมินได้จากค่าการแอ่นตัวของสะพานสามารถตรวจสอบได้โดยการทดสอบสะพานจริงหรือทำการควบคุมในระหว่างกระบวนการออกแบบสะพาน กล่าวคือการแอ่นตัวของสะพานจะถูกควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบสะพาน อย่างไรก็ตามในบางกรณีถึงแม้ว่าการแอ่นตัวของสะพานมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดแต่ผู้โดยสารภายในรถยนต์กลับรู้สึกได้ถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดกับรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพานโดยเฉพาะในกรณีที่จอดติดอยู่บนสะพาน ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการวิ่งผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้ามที่มีการจราจรคล่องตัว ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาจากความสามารถในการให้บริการของสะพานที่แม้ว่าจะมีการควบคุมการแอ่นตัวของสะพานในระหว่างกระบวนการออกแบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแล้วก็ตาม ทั้งนี้เมื่อสังเกตถึงลักษณะทางกายภาพของสะพานเหล็กข้ามทางแยกทำให้ทราบว่าลักษณะของสะพานที่อยู่บนปลายคานขวางเดียวกันเมื่อเกิดการสั่นไหวจะส่งผลกระทบต่อสะพานที่อยู่ในทิศทางจราจรตรงข้ามที่มีสภาพการจราจรที่หนาแน่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานในทิศทางดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการวิจัยถึงปัญหาที่เกิดขึ้น

การศึกษาปัญหามีความซับซ้อนอย่างยิ่งหากจะทำการทดสอบจริงในสนามด้วยสภาพของเหตุการณ์ความหลากหลายของลักษณะรถยนต์โดยสารที่มีความแตกต่างทางคุณสมบัติช่วงล่าง และอุปสรรคที่สำคัญอย่างยิ่งคือการขีดขวางการจราจรบนสะพานข้ามทางแยกในระหว่างการทดสอบเนื่องจากสะพานข้ามทางแยกมีอัตราการให้บริการทางการจราจรที่สูงมากตลอดทั้งวัน ดังนั้นในการศึกษาปัญหาจึงได้อาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานถูกจำลองด้วยการพิจารณาเป็นคานสะพานเหล็กที่อยู่บริเวณปลายคานขวางของสะพานและคานดังกล่าวมีลักษณะของจุดรองรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งเพื่อจำลองเหตุการณ์ที่ปลายคานขวางของสะพานเคลื่อนที่ นอกจากนี้แบบจำลองคานสะพานยังมีระบบองศาอิสระเดียวติดอยู่เพื่อใช้เป็นตัวแทนรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นทำให้มีความสะดวกในการศึกษาเนื่องจากสามารถจำลองรถยนต์ให้มีคุณสมบัติช่วงล่างที่หลากหลายกรณีที่ครอบคลุมลักษณะของรถยนต์ที่มีการใช้บริการสะพานตามสภาพความเป็นจริงได้ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ได้มาซึ่งสมการการเคลื่อนที่ของระบบที่ประกอบด้วยคานสะพานและรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้จะต้องอาศัยสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพาน ซึ่งอาจสังเคราะห์ขึ้นได้แต่มีความเป็นไปได้สูงกว่าสัญญาณที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นจะไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง ทำให้การได้มาซึ่งสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานจะต้องอาศัยการตรวจวัดสะพานโดยตรงจากการทดสอบสะพานจริงเพื่อให้เกิดความสอดคล้องกับสภาพจริง ในการทดสอบสะพานจริงได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีคือการทดสอบสะพานจากการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้ามของอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ และการทดสอบสะพานภายใต้การจราจรปกติ

การทดสอบสะพานโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยการวิ่งผ่านของรถบรรทุกมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัญหาในขั้นต้น ซึ่งสามารถประเมินถึงปัญหาที่ทำให้เกิดผลกระทบขึ้นต่อรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพานโดยอาศัยสัญญาณที่บันทึกได้จริงจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุก โดยผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าการสั่นสะเทือนของรถจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนถึง 98 % เมื่อความถี่ช่วงล่างของรถยนต์สูงขึ้นเพียง 0.5 Hz ซึ่งเป็นผลมาจากการสั่นพ้องกับความถี่ในโหมดหลักของสะพาน แต่การสั่นสะเทือนของรถยนต์จะลดลงเล็กน้อยเพียง 5-6 % เมื่อรถยนต์มีมวลมากขึ้นถึง 600 kg นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มที่ระดับการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 50 % เมื่อรถบรรทุกในฝั่งตรงข้ามวิ่งผ่านสะพานด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากขนาดความเร่งที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับสะพานมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อความเร็วยานพาหนะที่วิ่งผ่านในฝั่งตรงข้ามสูงขึ้น และจากผลการวิเคราะห์สามารถนำไปสู่การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631 ซึ่งพบว่าการสั่นสะเทือนดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จากการสั่นไหวของสะพานจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงกันข้ามส่งผลในระดับที่ก่อให้เกิดการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนได้ (Perception) อย่างชัดเจนโดยค่าความเร่งสูงสุดที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผ่านการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนักแล้วมีค่าสูงถึง 0.606 m/s^2 แต่ค่าที่มาตรฐาน ISO 2631 ระบุถึงความเร่งขั้นต่ำที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้คือ 0.015 m/s^2 ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ความเร่งที่ได้แสดงให้เห็นว่าผู้โดยสารภายในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานในทิศทางที่มีการจราจรหนาแน่นจึงสามารถรับรู้ได้ถึง การสั่นสะเทือนทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในทิศทางตรงข้าม ซึ่งสอดคล้องกันกับการร้องเรียนของผู้ใช้สะพานข้ามทางแยกต่อกรุงเทพมหานครถึงการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนนี้มาตลอด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการขยายผลในการศึกษาถึงผลกระทบอื่นๆที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนดังกล่าวทั้งในส่วนของผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบาย และผลกระทบต่อสุขภาพ โดยอาศัยสัญญาณการสั่นไหวของสะพานจากการทดสอบภายใต้การจราจรปกติ เนื่องจากตามสภาพความเป็นจริงรถบรรทุกไม่สามารถใช้บริการสะพานเหล็กข้ามทางแยกในกรุงเทพมหานคร อีกทั้งความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกก็มีค่าที่ต่ำกว่าความเร็วที่วิ่งผ่านโดยยานพาหนะที่ใช้บริการสะพานเหล็กข้ามทางแยกในสภาพการจราจรที่คล่องตัว ทำให้สัญญาณที่ตรวจวัดได้โดยอาศัยรถบรรทุกเป็นแหล่งกำเนิดจึงมีความแตกต่างจากสภาพการจราจรที่เป็นจริงจึงทำการเก็บบันทึกสัญญาณการสั่นไหวของสะพานภายใต้การจราจรปกติ โดยผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้สัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับของสะพานจากการทดสอบภายใต้การจราจรปกติ พบว่ามีความสอดคล้องกับกรณีของการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในส่วนของแนวโน้มของระดับการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ และมีระดับที่ลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อรถยนต์มีมวลสูงขึ้น ในทำนองเดียวกันผลการวิเคราะห์สามารถนำไปสู่การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631 พบว่าการสั่นไหวของสะพานจะส่งผลกระทบต่อ การรับรู้ของผู้โดยสารในรถยนต์นั้นคือค่าความเร่งที่วิเคราะห์ได้มีค่าที่สูงกว่า 0.015 m/s^2 ทุกกรณีโดยค่าความเร่งสูงสุดจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยไม่ผ่านการกรองสัญญาณแบบถ่วงน้ำหนัก(เนื่องจากค่า crest factor สูงกว่า 9) มีค่าสูงสุดถึง 0.919 m/s^2 นอกจากนี้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์กว่า 50 % ของกรณีที่ทำการศึกษาทั้งหมดนี้จะอยู่ในเกณฑ์ของความไม่รู้สึกไม่สะดวกสบายเล็กน้อย (a little uncomfortable) จนถึงความรู้สึกไม่สะดวกสบายในระดับที่รู้สึกได้อย่างชัดเจน (uncomfortable) ดังนั้นปัญหาการสั่นสะเทือนดังกล่าวนี้มีแนวโน้มและความเป็นไปได้สูงที่จะ

ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายของผู้โดยสารภายในรถยนต์ แต่ทั้งนี้การสิ้นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้มีความเป็นไปได้น้อยที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้โดยสารภายในรถยนต์โดยสารแม้จอดติดอยู่บนสะพานนานเป็นชั่วโมง เนื่องจากผลการประเมินตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631 ในส่วนของผลกระทบต่อสุขภาพพบว่า ความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้โดยสารจากปัญหาการสิ้นสะเทือนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาในการอยู่ภายใต้สภาวะดังกล่าวนานเกินกว่า 1 ชั่วโมง 36 นาทีเป็นต้นไป แต่จากการเก็บข้อมูลทางการจราจรจริงพบว่าในช่วงที่การจราจรหนาแน่นโดยเฉลี่ยจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านสะพานประมาณหนึ่งชั่วโมง อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นควรได้รับการแก้ไขหรือปรับปรุงความสามารถในการให้บริการของสะพาน เนื่องจากสะพานเหล็กข้ามทางแยกมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินชีวิตของผู้โดยสารสำหรับการสัญจรและจากผลการศึกษาได้บ่งชี้ให้เห็นถึงผลกระทบต่อการใช้รถตลอดจนความรู้สึกสะดวกสบายที่มีแนวโน้มสูงที่จะเกิดขึ้นกับผู้โดยสารภายในรถยนต์โดยสารจากเหตุการณ์ที่ผู้ใช้บริการสะพานเหล็กข้ามทางแยกประสบอยู่เป็นประจำ นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวยังอาจส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของผู้ใช้บริการสะพานเหล็กข้ามทางแยกที่มีจำนวนมากในสภาพการจราจรปกติ โดยเฉพาะในส่วนของความเชื่อมั่นต่อเสถียรภาพของสะพานเหล็กข้ามทางแยกซึ่งแม้ว่าจะเป็นเพียงในแง่ของความรู้สึกก็ตาม

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการแก้ไขปัญหาสำหรับการศึกษาในอนาคต

สะพานเหล็กข้ามทางแยกมีการเปิดให้บริการเพื่อรองรับการจราจรที่หนาแน่นในกรุงเทพมหานครมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานและมีอัตราการให้บริการที่สูงในช่วงเวลาปกติ แต่เนื่องจากปัญหาจากความสามารถในการให้บริการของสะพานที่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้โดยสารที่อยู่ในรถยนต์เมื่อจอดติดอยู่บนสะพาน ปัญหาดังกล่าวควรได้รับการแก้ไขหรือปรับปรุงความสามารถในการให้บริการของสะพานเหล็กข้ามทางแยก โดยแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมจะต้องไม่กระทบต่อการจราจรบนสะพานมากนัก ซึ่งแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมแนวทางหนึ่งได้แก่การใช้มวลหน่วงปรับค่า ทั้งนี้แนวทางดังกล่าวได้มีการศึกษาในขั้นต้นถึงความสามารถในการลดการสิ้นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จากการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่บริเวณกลางช่วงของสะพาน ซึ่งผลการศึกษาในขั้นต้นนี้พบว่ามวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยวที่มีขนาดของมวลตามอัตราปกติมีความสามารถในการลดการสิ้นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในกรณีที่สะพานมีการสั่นไหวได้เพียงเล็กน้อย แต่พบว่าการเพิ่มมวลให้กับมวลหน่วงปรับค่าทำให้ประสิทธิภาพของการลดการสิ้นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ได้ดียิ่งขึ้น แต่การเพิ่มมวลให้กับมวลหน่วงปรับค่าที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อความแอ่นตัวสถิติของสะพาน เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ให้กับสะพาน การศึกษาได้กำหนดให้มวลของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าสูงสุดไม่เกิน 10 % ของมวลสะพาน ซึ่งพบว่าในกรณีนี้สามารถลดการสิ้นสะเทือนของสะพานได้ถึง 25 % อย่างไรก็ตามความสามารถในการลดการสิ้นสะเทือนดังกล่าวของมวลหน่วงปรับค่าแบบเดียวยังคงไม่เพียงพอต่อการลดผลกระทบทางความรู้สึกของผู้โดยสารในรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานได้ เนื่องจากผลการศึกษาพบว่าการสิ้นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในกรณีที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยวที่บริเวณกลางช่วงของสะพานยังมีแนวโน้มที่จะเกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายขึ้นได้ จึงอาจจะต้องพิจารณาถึงแนวทางในการแก้ปัญหา

รูปแบบอื่นๆที่จะมีประสิทธิภาพในการลดการสิ้นไหวของสะพานและการสิ้นเสเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานที่ดียิ่งขึ้นต่อไป



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Thomas D.Gillespie. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 400 Commonwealth Drive
Warrendale,PA 15096-0001 : Society of Automotive Engineers., 1999.
- [2] Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Applications. 233 Spring Street, New York, NY
10013, USA : Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [3] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. Second
Edition. A Simon & Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey 07632 : Prentice-Hall,
2001.
- [4] Ray W. Clough, Joseph Penzien. DYNAMICS OF STRUCTURES. Third Edition. 1221 Avenue of
Americas. New York, NY 10020, USA : Computers & Structures., 2003.
- [5] Leonard Meirovitch. Fundamental of vibration. International Edition. 1995 University Ave.
Berkeley, CA 94704, USA : McGraw-Hill Companies., 2001.
- [6] International Organization for Standardization 1997. Mechanical vibration and shock – evaluation
of human exposure – to whole-body vibration. Second edition 1997-05-01. Part 1: general
requirements. Corrected and reprinted 1997-07-15 , 1997.
- [7] M.J.Griffin. Discomfort from feeling vehicle vibration. Vehicle System Dynamics 45, 7–8 (July–
August 2007) : 679–698.
- [8] Bonin G. Ride quality evaluation: 8 D.O.F. vehicle model calibration. 4th INTERNATIONAL SIIV
CONGRESS–PALERMO (ITALY) SEPTEMBER 2007 : 12-14.
- [9] Hassan Moghimi, Hamid R. Ronagh. Development of a numerical model for bridge–vehicle
interaction and human response to traffic-induced vibration. Engineering Structures (Aug
2008) : 3808-3819.
- [10] Y.H. Lin, C.H. Cho. Vibration suppression of beam structures traversed by multiple moving
loads using a damped absorber. Journal of Marine Science and Technology 1993 : 39-48.

- [11] Kwon, H.-C. / Kim, M.-C. / Lee, I.-W. Vibration control of bridges under moving loads. Computers & Structures (Feb 1998) : 473-480.
- [12] Xiaomin Shi and C.S. Cai. Suppression of Vehicle-induced Bridge Vibration Using Tuned Mass Damper. Journal of Vibration and Control (Jun, 2008) : 1037-1054.
- [13] Fan Yang, Ramin Sedaghati, Ebrahim Esmailzadeh. Optimal Vibration Suppression of Timoshenko Beam With Tuned-Mass-Damper Using Finite Element Method. Journal of Vibration and Acoustics (June 2009).
- [14] Farhad S. Samani, Francesco Pellicano. Vibration reduction on beams subjected to moving loads using linear and nonlinear dynamic absorbers. Journal of Sound and Vibration Sep 2009 : 742-754.
- [15] Medina Andrés, Violeta. Vibration analysis and control of dynamics effects of moving vehicles over bridges. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [16] The U.S. National Library of Medicine. 2010. Motion Sickness [online].
<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/motionsickness.html>.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนวรรณ ไสภณมหาผล เกิดเมื่อวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนกุหลาบวิทยา จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดราชบพิศ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551 โดยทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานด้วยมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบของการสั่นไหวของสะพานที่มีผลต่อรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน



ศูนย์วิทยพัทธยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย