

๖๐๐๕๕๕๘๙

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



247638

การค้นคว้าเพื่อนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพาน

นาย ธนวรรณ โสภณมหาผล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 1 7 0 3 1 9 2 2 1

VIBRATION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES

Mr. Tanawat Soponmahaphol

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสิ้นสะท้อนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพาน

โดย

นายธนวรรธน์ โสภณมหาผล

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

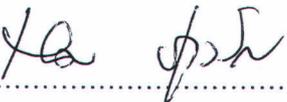

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉิมไชย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม)

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

247638

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

ผลการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ โดยอาศัยสัญญาณการสั่นไหวที่จุดรองรับสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกด้วยความเร็วต่างๆ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อระดับการสั่นสะเทือนที่รุนแรงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ และความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกในทิศทางตรงข้าม โดยเฉพาะเมื่อรถยนต์มีค่าความถี่ช่วงล่างที่สูงจนมีค่าเข้าใกล้ความถี่ในโหมดการสั่นหลักของสะพาน ในขณะที่ค่าน้ำหนักของรถยนต์จะมีผลกระทบต่อค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์น้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลของความเร็วในการวิ่งผ่านของรถบรรทุกและค่าความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ ผลการประเมินโดยมาตรฐาน ISO 2631 พบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ส่งผลกระทบต่อผู้โดยสารได้ถึงการสั่นสะเทือนในทุกกรณีและเกิดความรำลึกไม่สะดวกสบายกับผู้โดยสารในบางกรณี

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

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

ลายมือชื่อผู้เขียน.....
ลายมือชื่อขอ.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.

247638

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.

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 ให้การอุปถัมภ์จนกระผมได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงานเติบโตจนถึงบัดนี้

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

ขอขอบพระคุณสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของการทดสอบสะพาน และให้ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้และทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงลงได้

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

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

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้ที่สนใจศึกษา 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 การสิ้นสะท้อน 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 สมการการกระจัดของปฏิกิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพานและรถยนต์ โดยสาร	11
2.1.2 การประยุกต์เพื่อสร้างแบบจำลองและสมการการกระจัดของปฏิกิริยาตอบสนองซึ่งกัน 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 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในกรณีที่ ค่า Crest factor < 9	52
4.4.2 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพในกรณีที่ ค่า 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

สารบัญญัตราสาร

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงพจน์ต่างๆจากการสังเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ระหว่างสะพานและรถยนต์ โดยสมการที่ 2.9	16
ตารางที่ 2.2	แสดงพจน์ต่างๆจากการสังเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ระหว่างสะพาน รถยนต์ และมวลหน่วงปรับค่าและรถยนต์โดยสมการที่ 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 ตามทิศทางและอริยาบถภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือน	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 สั่นไหวในแนวตั้งที่จุดรองรับทั้งสองข้างของสะพาน	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 แนวตั้งที่จุดรองรับทั้งสองข้าง	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 แนวตั้ง 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	แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 3.2.1 (ค่า $\Omega = \omega_1$) (ก) ค่าการกระจัดของสะพาน (ข) ค่าการกระจัดของรถยนต์โดยสาร	41
รูปที่ 3.10	แสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจัดระหว่างค่าที่คำนวณโดยการดำเนินการทางตัวเลขกับค่าที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของสะพานในกรณีที่ 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	ภาพแสดงการชั่งน้ำหนักบรรทุกที่ด้านชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ	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 การจราจรบนสะพานเหล็กข้ามทางแยกในช่วงเวลาเย็นที่จับภาพโดยกล้องวงจรปิด	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 ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 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) การกระจัดที่จุดรองรับ (ข) ความเร่งที่จุดรองรับ.....	92
รูปที่ 6.17	ตัวอย่างความเร่งของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีรถยนต์มีมวล 1400 kg และมีความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz (ก) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 1 (ข) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 2 (ค) ความเร่งของรถยนต์ในตำแหน่งที่ 3.....	93
รูปที่ 6.18	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นรถยนต์คันที่ 1 และ 5 ภายใต้สภาพการจราจรปกติ (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	94
รูปที่ 6.19	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นรถยนต์คันที่ 2 และ 4 ภายใต้สภาพการจราจรปกติ (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	94
รูปที่ 6.20	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ภายใต้การจราจรปกติ (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS) (ค) ค่าความเร่งสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1,2 และ3 (ง) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 1,2 และ3.....	95
รูปที่ 6.21	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบโดยพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความถี่ช่วงล่างและค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ระหว่างกรณีการทดสอบสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติและการทดสอบโดยการวิ่งผ่านของรถบรรทุก (ก) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration response) (ข) ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square; RMS).....	97
รูปที่ 6.22	แสดงสัญญาณความเร่งทั้งก่อนและหลังผ่านการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งผ่านในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็ว 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	แสดงภาพตัดทางขวางของสะพานและตำแหน่งของรถยนต์ในแต่ละช่วงของสะพาน.....	104
รูปที่ 6.25	แผนภาพแสดงการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสั่นสะเทือนตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1.....	106
รูปที่ 7.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานซึ่งติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า....	110
รูปที่ 7.2	ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งของรถยนต์ระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีมวลเป็น 3 % ของมวลสะพาน ในกรณีที่รถยนต์มีมวล 1000 kg ความถี่ช่วงล่าง 2.5 Hz.....	111

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