



# การรศกการสนั้ชระเท็องของเรณนที่่ก้อออดึคบทสพหวนค้ชษนรณน่วนป้รับค้่า

นายโพโรจน์ วัฒนันันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๒ ๐๐๒๕๑๘๐๗



247061

การลดการสิ้นเปลืองของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานด้วยมวลห่วงปรับค่า



นาย ไพโรจน์ วัฒนานันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 2 7 0 6 2 6 0 2 1

# VIBRATION REDUCTION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES BY TMD

Mr. Pairoj Watchamanan

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

การลดการสิ้นเปลืองของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานด้วย  
มวลห่วงปรับค่า

โดย

นายไพโรจน์ วัฒนานันท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

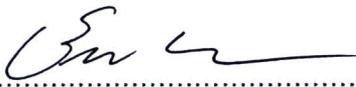
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์มิไชย)

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

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

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

ไพโรจน์ วัชมานันท์ : การลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานด้วยมวลหน่วง  
ปรับค่า. (VIBRATION REDUCTION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES BY

TMD) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 182 หน้า.

247061

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานภายใต้การสั่นตัว  
ของโครงสร้างสะพานซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านของยวดยานในทิศทางตรงข้ามด้วยการติดตั้ง  
ระบบมวลหน่วงปรับค่า (TMD) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อสุขภาพ  
อนามัยและความรู้สึกสะดวกสบายของผู้โดยสาร ในการศึกษาี้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ  
สะพาน-รถยนต์-มวลหน่วงได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่  
จอดติดบนสะพานภายใต้การสั่นไหวของสะพานในรูปแบบต่างๆ ตลอดจนศึกษาพฤติกรรมและ  
ประสิทธิภาพของการลดการสั่นสะเทือนด้วยการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับ 0.04  
เท่าของน้ำหนักตัวสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสะพาน ผลการศึกษากับสะพานตัวอย่างแห่งหนึ่ง  
แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นสะเทือนเฉพาะสำหรับยวดยาน  
บางลักษณะ ทำให้ประยุกต์ใช้จริงอาจมีข้อจำกัด ในส่วนของผลการประเมินผลกระทบต่างๆ ต่อ  
ร่างกายมนุษย์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO 2631-1 พบว่าภายหลังจากติดตั้งมวล  
หน่วงปรับค่า ผู้โดยสารยังรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนในทุกกรณีแต่แนวโน้มที่จะเกิดความรู้สึกไม่  
สะดวกสบายนั้นลดลง อย่างไรก็ตามพบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถยืดระยะเวลาที่ผู้โดยสารต้องทน  
ต่อสภาวะการสั่นสะเทือนภายในรถยนต์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยได้นานขึ้นคิดเป็น  
ร้อยละ 119 เมื่อเทียบกับกรณีก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

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

ลายมือชื่อนิสิต.....ไพโรจน์ วัชมานันท์.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

## 5270626021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : VIBRATION REDUCTION /TUNED MASS DAMPER /TMD /VIBRATION OF STOPPED VEHICLES

PAIROJ WATCHAMANAN : VIBRATION REDUCTION OF STOPPED VEHICLES ON BRIDGES BY TMD. ADVISOR : ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, D.Eng., 182 pp.

## 247061

This research studies the vibration reduction of stopped vehicles on a bridge by tuned mass damper (TMD) to enhance the health and comfort of passengers. The vehicle vibration is induced from the bridge motion which is caused by the passages of vehicles in opposite traffic direction. In this study, the mathematical model of vehicle-bridge-TMD is formulated for evaluation of vehicle vibration under various bridge motions and for assessment of TMD effectiveness. The TMD with mass about 0.04 of bridge mass is installed beneath the bridge deck at mid-span. Based on the obtained results from computer simulations, the TMD seems to be effective for certain type of vehicles. Therefore, its application in an actual bridge might be limited. Considering the effect on human exposure to whole-body vibration as per the standard of ISO 2631-1, it reveals that, after installing the TMD, the passengers still percept the vibration in all considered cases but the vibration effect on passenger discomfort tends to be reduced. However, considering the vibration effect on passenger health, it is found that the TMD can prolong the time of vibration exposure to about 119% compared with the bridge without TMD.

Department : Civil Engineering

Student's Signature *วิมลรัตน์ อภิรักษ์*

Field of Study : Civil Engineering

Advisor's Signature *T. Pinkaew*

Academic Year : 2010

## กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ที่ได้อบรมสั่งสอนรวมถึงให้การอุปถัมภ์จนทำให้กระผมได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงานตามที่มุ่งหวังได้มาจนถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้วิชาพื้นฐานในภาคทฤษฎี รวมถึงการให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการทำวิจัยและการแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้อย่างดียิ่งมาโดยตลอด โดยอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ หากปราศจากความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉมิไชย และความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดย รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและหน่วยงานบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คุณวรรณฯ ช่างเกิด ธุรการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ช่วยประสานงานด้านระเบียบการจนจบการศึกษา และหน่วยงานบรรณารักษ์ประจำห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการสืบค้นข้อมูลในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคณะทำงาน เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท รหัสปีการศึกษา 2552 สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกท่าน และขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตที่อยู่ในความดูแลของ รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณธนวรรธ โสภณมหาผล ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณคุณเอกวิทย์ ชันแก้ว และคุณเทียบเทียบ เขียววิวัฒน์ ที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงตามเป้าหมายด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลแก่ผู้ที่สนใจศึกษา จุดประกายความคิดและเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
• บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ต
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่การวิจัย .....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	2
1.2.1 ผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อมนุษย์ตามมาตรฐาน (ISO 2631-1) ..	2
1.2.2 ผลกระทบจากการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะที่วิ่งผ่าน .....	4
1.2.3 การใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดียวเพื่อลดการสั่นไหว .....	5
1.2.4 การใช้มวลหน่วงปรับค่ามากกว่าหนึ่งชุดเพื่อลดการสั่นไหว .....	10
1.2.5 การใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของคาน .....	15
1.2.6 การใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน .....	18
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	22
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	22
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย .....	23
1.6 การดำเนินงานวิจัย .....	23
2 การควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยมวลหน่วงปรับค่า .....	25
2.1 มวลหน่วงปรับค่า .....	25
2.2 ผลตอบสนองการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของระบบที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับสอง เนื่องจากแรงภายนอก .....	26
2.2.1 ระบบโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วง .....	26
2.2.2 ระบบโครงสร้างหลักมีความหน่วง .....	34
2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า .....	38

บทที่	หน้า
2.4 ประสิทธิภาพและการคงสภาพความสามารถใช้งานได้ของมวลหน่วยปรับค่า .....	51
2.4.1 ประสิทธิภาพของมวลหน่วยปรับค่า .....	52
2.4.2 การคงสภาพความสามารถใช้งานได้ของมวลหน่วยปรับค่า .....	55
2.5 ตัวอย่างการใช้งานของมวลหน่วยปรับค่า .....	57
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	63
3.1 พิกัดทั่วไปของการกระจัด .....	63
3.1.1 คานช่วงเดียวหน้าตัดสมำเสมอ .....	63
3.1.2 รถยนต์ .....	67
3.1.3 มวลหน่วย .....	67
3.2 สมการของลากรางจ์ .....	68
3.3 สมการของการเคลื่อนที่ของระบบสะพาน-รถยนต์-มวลหน่วย .....	70
3.4 ค่าผลตอบสนองของระบบโดยวิธีการเชิงตัวเลขด้วยสเปทสเฟอรัม .....	77
4 การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 .....	81
4.1 ขอบเขตของมาตรฐาน ISO 2631-1 .....	81
4.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้ประเมินผลการสั่นสะเทือนของร่างกายมนุษย์ .....	82
4.3 วิธีการประเมินการสั่นสะเทือนของร่างกายมนุษย์ .....	88
4.3.1 การประเมินโดยวิธีพื้นฐาน .....	88
4.3.2 การประเมินโดยวิธีเพิ่มเติมหากวิธีการประเมินพื้นฐานไม่เพียงพอ .....	89
4.4 การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย .....	90
4.4.1 กรณีที่ตัวประกอบสูงสุดไม่เกิน 9 .....	90
4.4.2 กรณีที่ตัวประกอบสูงสุดเกินกว่า 9 .....	92
4.5 การประเมินผลกระทบต่อความสะดวกสบายและการรับรู้ .....	93
4.5.1 การประเมินผลกระทบต่อความสะดวกสบาย .....	93
4.5.2 การประเมินผลกระทบต่อการรับรู้ .....	94
4.6 การประเมินผลกระทบต่อความเจ็บป่วยจากการเคลื่อนไหว .....	94
5 ลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค .....	96
5.1 ข้อกำหนดทั่วไป .....	96
5.2 ลักษณะเฉพาะของคุณสมบัติเชิงโหมดสำหรับระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์ .....	97
5.3 เงื่อนไขการปรับค่าพารามิเตอร์ของมวลหน่วยปรับค่า .....	100

บทที่	หน้า
5.4 การเบี่ยงเบนของค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ .....	102
5.5 การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง .....	105
5.5.1 ผลกระทบจากมวลของรถยนต์ .....	105
5.5.2 ผลกระทบจากความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ .....	107
5.5.3 ผลกระทบจากความหน่วงของรถยนต์ .....	108
5.6 ผลตอบสนองในโดเมนของความถี่ .....	110
5.7 การเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า .....	115
6 ผลการวิเคราะห์และการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ภายใต้การกระตุ้น จากสภาพการจราจรจริงตามมาตรฐาน ISO 2631-1 .....	118
6.1 สัญญาณการกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริง .....	118
6.2 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ .....	120
6.3 ผลการเบี่ยงเบนค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า .....	129
6.4 ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถยนต์ .....	131
6.4.1 ประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนของมวลหน่วงปรับค่า .....	133
6.4.2 ประสิทธิภาพในการลดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมวลหน่วงปรับค่าตาม มาตรฐาน ISO 2631-1 .....	136
6.4.2.1 ผลการประเมินผลกระทบต่อการรับรู้ได้ .....	144
6.4.2.2 ผลการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบาย .....	145
6.4.2.3 ผลการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย .....	146
6.4.2.4 ผลการประเมินผลกระทบต่อความเจ็บป่วยจากการเคลื่อนไหว .....	150
7 อภิปรายและสรุปผลของงานวิจัย .....	152
รายการอ้างอิง .....	156
ภาคผนวก .....	159
ภาคผนวก ก .....	160
ภาคผนวก ข .....	179
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	182

## สารบัญตาราง

		หน้า
• ตารางที่ 2.1	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับมวลหน่วงปรับค่าติดเข้ากับโครงสร้างไม่มี ความหน่วงภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิค (Warburton, 1982) .....	47
ตารางที่ 2.2	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับมวลหน่วงปรับค่าติดเข้ากับโครงสร้างไม่มี ความหน่วงภายใต้แรงกระทำแบบไร้รูปแบบซึ่งเป็นประเภท White noise spectral density (Warburton, 1982) .....	48
ตารางที่ 2.3	รายการมวลหน่วงปรับค่าประเภท Passive damping device กับโครงสร้าง ประเภทต่างๆ .....	58
ตารางที่ 3.1	ค่าอนุพันธ์ย่อยของสมการ (3.19) ถึง (3.22) .....	74
ตารางที่ 4.1	คำแนะนำสำหรับการเลือกใช้ Frequency-weighting curves ในการกรอง สัญญาณ .....	83
ตารางที่ 4.2	ตัวแปรของฟังก์ชันส่งผ่าน .....	84
ตารางที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ถ่วงน้ำหนักหลักและความถี่ .....	86
ตารางที่ 4.4	เกณฑ์สำหรับการประเมินผลกระทบต่อความสะดวกสบายจาก การสั่นสะเทือน .....	93
ตารางที่ 5.1	ค่าคุณสมบัติของสะพาน .....	96
ตารางที่ 5.2	ค่าคุณสมบัติของรถยนต์ .....	97
ตารางที่ 5.3	ค่าคุณสมบัติของมวลหน่วงปรับค่า .....	97
ตารางที่ 6.1	ข้อมูลคุณสมบัติมวลและความถี่ของรถยนต์ในกรณีต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ .....	131
ตารางที่ 6.2(ก)	ค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดของรถยนต์คันที่ 1 ก่อนผ่านการถ่วงน้ำหนักภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	134
ตารางที่ 6.2(ข)	ค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดของรถยนต์คันที่ 1 ก่อนผ่านการถ่วงน้ำหนักภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	134
ตารางที่ 6.2(ค)	ค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดของรถยนต์คันที่ 2 ก่อนผ่านการถ่วงน้ำหนักภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	135
ตารางที่ 6.2(ง)	ค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดของรถยนต์คันที่ 2 ก่อนผ่านการถ่วงน้ำหนักภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	135



ตารางที่ 6.5(ก)	อัตราส่วน [Acc. w/o TMD]/[Acc. w/TMD] ของรถยนต์คันที่ 1 ก่อนผ่าน การถ่วงน้ำหนักภายใต้การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริง .....	143
ตารางที่ 6.5(ข)	อัตราส่วน [Acc. w/o TMD]/[Acc. w/TMD] ของรถยนต์คันที่ 2 ก่อนผ่าน การถ่วงน้ำหนักภายใต้การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริง .....	143
ตารางที่ 6.5(ค)	อัตราส่วน [Acc. w/o TMD]/[Acc. w/TMD] ของรถยนต์คันที่ 3 ก่อนผ่าน การถ่วงน้ำหนักภายใต้การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริง .....	143
ตารางที่ ผ1	ค่าคุณสมบัติของสะพาน .....	160
ตารางที่ ผ2	ค่าคุณสมบัติของแบบจำลองรถยนต์ .....	161
ตารางที่ ผ3	ค่าคงตัว $A_n$ , $B_n$ , $C_n$ และ $D_n$ ในแต่ละกรณีของความถี่แรงกระตุ้นสำหรับ ระบบที่มีเฉพาะคาน .....	167
ตารางที่ ผ4	ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานเปรียบเทียบระหว่าง วิธีทางทฤษฎีและวิธีเชิงตัวเลขด้วยการใช้ผลต่างของช่วงเวลาที่แบ่ง $\Delta t = 0.0001$ .....	168
ตารางที่ ผ5	ค่าคงตัว $A_n$ , $B_n$ , $C_n$ และ $D_n$ ในแต่ละกรณีของความถี่แรงกระตุ้นสำหรับ ระบบที่มีคานและรถยนต์ .....	174
ตารางที่ ผ6	ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานเปรียบเทียบระหว่าง วิธีทางทฤษฎีและวิธีเชิงตัวเลขด้วยการใช้ผลต่างของช่วงเวลาที่แบ่ง $\Delta t = 0.0001$ .....	175
ตารางที่ ผ7	ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของรถยนต์เปรียบเทียบระหว่างวิธีทางทฤษฎี และวิธีเชิงตัวเลขด้วยการใช้ผลต่างของช่วงเวลาที่แบ่ง $\Delta t = 0.0001$ .....	176
ตารางที่ ผ8(ก)	ค่าตัวประกอบสูงสุดของสัญญาณความเร่งของรถยนต์คันที่ 1 ภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	179
ตารางที่ ผ8(ข)	ค่าตัวประกอบสูงสุดของสัญญาณความเร่งของรถยนต์คันที่ 1 ภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	179
ตารางที่ ผ8(ค)	ค่าตัวประกอบสูงสุดของสัญญาณความเร่งของรถยนต์คันที่ 2 ภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	180
ตารางที่ ผ8(ง)	ค่าตัวประกอบสูงสุดของสัญญาณความเร่งของรถยนต์คันที่ 2 ภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	180

ตารางที่ ผ8(จ) ค่าตัวประกอบสูงสุดของสัญญาณความเร่งของรถยนต์คันที่ 3 ภายใต้	
• การกระตุ่นจากสภาพการจราจรจริงก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	180
ตารางที่ ผ8(ฉ) ค่าตัวประกอบสูงสุดของสัญญาณความเร่งของรถยนต์คันที่ 3 ภายใต้	
การกระตุ่นจากสภาพการจราจรจริงหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	181

## สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1.	แบบจำลองของโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วง (Undamped main system) ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีระดับชั้นความถี่เท่ากับสอง .....	27
รูปที่ 2.2	ผลตอบสนองที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของโครงสร้างไม่มีมวลหน่วงปรับค่า (เส้นประ) และมีมวลหน่วงปรับค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$ , $\mu = 0.10$ , $\alpha = 1.0$ , $\zeta_d = 0$ (เส้นประ-จุด) และ $\zeta_d = 0.05$ (เส้นทึบ) .....	32
รูปที่ 2.3	อัตราส่วนการกระจัดที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของมวลหน่วงปรับค่าต่อโครงสร้าง ด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$ , $\mu = 0.10$ , $\alpha = 1.0$ , $\zeta_d = 0$ (เส้นประ-จุด) และ $\zeta_d = 0.05$ (เส้นทึบ) .....	33
รูปที่ 2.4	แบบจำลองของโครงสร้างหลักมีความหน่วง (Damped main system) ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่มีระดับชั้นความถี่เท่ากับสอง .....	34
รูปที่ 2.5	ผลตอบสนองที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของโครงสร้างไม่มีมวลหน่วงปรับค่า (เส้นประ) และมีมวลหน่วงปรับค่าด้วยค่า $\zeta_s = 0.02$ , $\mu = 0.10$ , $\alpha = 1.0$ , $\zeta_d = 0$ (เส้นประ-จุด) และ $\zeta_d = 0.05$ (เส้นทึบ) .....	37
รูปที่ 2.6	อัตราส่วนการกระจัดที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของมวลหน่วงปรับค่าต่อโครงสร้าง ด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0.02$ , $\mu = 0.10$ , $\alpha = 1.0$ , $\zeta_d = 0$ (เส้นประ-จุด) และ $\zeta_d = 0.05$ (เส้นทึบ) .....	38
รูปที่ 2.7	ผลตอบสนองที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของโครงสร้างไม่มีความหน่วงติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$ , $\mu = 0.04$ , $\alpha = 1.0$ , $\zeta_d$ แตกต่างกันหลายค่า .....	39
รูปที่ 2.8	ผลตอบสนองที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของโครงสร้างไม่มีความหน่วงติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0$ , $\mu = 0.04$ , $\alpha_{opt} = 0.9615$ , $\zeta_d$ แตกต่างกันหลายค่า .....	45
รูปที่ 2.9	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับอัตราส่วนมวล ( $\mu$ ) อัตราส่วนปรับค่าความถี่ ( $\alpha$ ) อัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ( $\zeta$ ) อัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่า และ ( $\eta$ ) ผลตอบสนองการกระจัดของโครงสร้าง สำหรับโครงสร้างไม่มีความหน่วง .....	46

รูปที่ 2.10	ผลตอบสนองที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของโครงสร้างมีความหน่วงติดตั้ง มวลหน่วงปรับค่า ด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0.02$ , $\mu = 0.04$ , $\alpha = 1.0$ , $\zeta_d$ แตกต่างกันหลายค่า .....	49
รูปที่ 2.11	ผลตอบสนองที่สภาวะการสั่นแบบคงที่ของโครงสร้างมีความหน่วงติดตั้ง มวลหน่วงปรับค่า ด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0.02$ , $\mu = 0.04$ , $\alpha_{opt} = 0.9551$ , $\zeta_d$ แตกต่างกันหลายค่า .....	51
รูปที่ 2.12	ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าเนื่องจากอัตราส่วนมวล $\mu$ แตกต่างกัน หลายค่า ด้วยค่าพารามิเตอร์ $\zeta_s = 0.02$ .....	52
รูปที่ 2.13	ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าเนื่องจากอัตราส่วนปรับค่าความถี่ $\alpha$ แตกต่างกันหลายค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ $\mu = 0.10$ , $\zeta_s = 0.02$ และ $\zeta_{d,opt} = 0.1875$ .....	53
รูปที่ 2.14	ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าเนื่องจากอัตราส่วนความหน่วงของ มวลหน่วงปรับค่า $\zeta_d$ แตกต่างกันหลายค่า ด้วยค่าพารามิเตอร์ $\mu = 0.04$ , $\alpha_{opt} = 0.9551$ และ $\zeta_s = 0.02$ .....	54
รูปที่ 2.15	ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าเนื่องจากอัตราส่วนความหน่วงของ โครงสร้าง (ก) $\alpha = 0.9456$ , $\mu = 0.05$ , $\zeta_s = 0.05$ (ข) $\alpha = 0.9011$ , $\mu = 0.105$ , $\zeta_s = 0.05$ (ค) $\alpha = 0.9341$ , $\mu = 0.05$ , $\zeta_s = 0.10$ และ (ง) $\alpha = 0.8878$ , $\mu = 0.10$ , $\zeta_s = 0.10$ .....	54
รูปที่ 2.16	ความคงสภาพใช้งานได้ของมวลหน่วงปรับค่าโดยใช้ค่า $\mu = 0.05$ .....	56
รูปที่ 2.17	ความคงสภาพใช้งานได้ของมวลหน่วงปรับค่าโดยใช้ค่า $\mu = 0.10$ .....	56
รูปที่ 2.18	ลักษณะทางกายภาพของมวลหน่วงปรับค่า .....	59
รูปที่ 2.19	สะพาน Millennium Bridge, London/UK .....	60
รูปที่ 2.20	สะพาน Schwedter Str., Bridge, Berlin/Germany .....	60
รูปที่ 2.21	สะพาน Pedestrian bridge Britzer Damm Berlin /Germany .....	61
รูปที่ 2.22	สะพาน Mjomnesundet Bridge, Norway .....	61
รูปที่ 2.23	โรงแรม Burj Al Arab, Steel Sceleton and Spire, Dubai/UAE .....	62
รูปที่ 3.1	คานช่วงเดี่ยวน้ำตัดสม้าเสมอและรูปแบบโหมดการสั่น .....	64
รูปที่ 3.2	(ก) คานช่วงเดี่ยวน้ำตัดสม้าเสมอเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของฐานรอง และ (ข) ฟังก์ชันสนับสนุนของฐานรองที่ตำแหน่งซ้ายและขวา .....	65

รูปที่ 3.3	แบบจำลองการรวมมวลของรถยนต์ที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับหนึ่ง .....	67
รูปที่ 3.4	แบบจำลองการรวมมวลของมวลห้วงปรับค่าที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับหนึ่ง .....	68
รูปที่ 3.5	แบบจำลองของคานช่วงเดียวหน้าตัดสามเหลี่ยมมีรถยนต์จอดติดบนสะพานพร้อมติดตั้งมวลห้วงปรับค่าโดยมีระดับชั้นความเร็วมากกว่าหนึ่ง .....	70
รูปที่ 4.1	ระบบพิกัดแกนพื้นฐานตามแต่ละอริยาบถภายใต้การสั่นสะเทือนต่อร่างกายมนุษย์ .....	82
รูปที่ 4.2	เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ถ่วงน้ำหนักหลักและความถี่ .....	87
รูปที่ 4.3	กราฟมาตรฐานของสุขภาพและขอบเขตเฝ้าระวัง (Health guidance caution zones) .....	92
รูปที่ 5.1	ตำแหน่งของรถยนต์และมวลห้วงปรับค่า .....	96
รูปที่ 5.2	ค่าไอเกนความถี่ของระบบปฏิสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของรถยนต์ (ก) สะพานช่วงสั้น ( $L_b = 25$ m) และ (ข) สะพานช่วงยาว ( $L_b = 50$ m) .....	98
รูปที่ 5.3	รูปร่างโหมดการสั่นต่ำสุด 6 โหมดแรกของระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์ ..	99
รูปที่ 5.4	ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ของแบบจำลองที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับสามด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_b = 59500$ kg, $f_b = 3.51$ Hz, $\zeta_b = 0.03$ , $m_c = 1000$ kg, $\zeta_c = 0.15$ , $\mu = 0.04$ , $\alpha_{opt} = 0.9433$ และ $\zeta_{d,opt} = 0.1716$ (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	101
รูปที่ 5.5	การกระจัดสัมพัทธ์สูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานช่วงสั้น 25 เมตร ติดตั้งมวลห้วงปรับค่าภายใต้การเบี่ยงเบนของค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg, $\zeta_c = 0.15$ , $\mu = 0.04$ , $\alpha_{opt} = 0.9433$ และ $\zeta_{d,opt} = 0.1716$ .....	103
รูปที่ 5.6	การกระจัดสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานช่วงสั้น 25 เมตร สำหรับแบบจำลองสะพาน-มวลห้วง (กรณีไม่มีรถยนต์จอดติดบนสะพาน) .....	104
รูปที่ 5.7	ผลตอบสนองการสั่นสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงมวลของรถยนต์ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $\zeta_c = 0.15$ (ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง และ (ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง .....	106

รูปที่ 5.8	ผลตอบสนองการสั่นสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของรถยนต์ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg (ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง และ (ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง .....	107
รูปที่ 5.9	ผลตอบสนองการสั่นสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความหน่วงของรถยนต์ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg (ก) ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 (ข) ความเร่งสัมบูรณ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง และ (ค) การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่กึ่งกลางช่วง .....	109
รูปที่ 5.10	ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานช่วงยาว 25 เมตร (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	111
รูปที่ 5.11	ความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานช่วงยาว 50 เมตร (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	112
รูปที่ 5.12	การกระจัดสัมพัทธ์ของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วง (ก) สะพานช่วงสั้น 25 เมตร และ (ข) สะพานช่วงยาว 50 เมตร .....	114
รูปที่ 5.13	ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนสูงสุดของรถยนต์คันที่ 3 ภายใต้การเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	116
รูปที่ 6.1	ตัวแทนของสัญญาณการกระตุ้นในช่วงเวลา 10 นาที ของสะพานช่วงสั้น 25 เมตร (ก) สัญญาณความเร่งที่ฐานรอง และ (ข) สัญญาณการกระจัดที่ฐานรอง .....	119
รูปที่ 6.2	ตัวแทนของสัญญาณการกระตุ้นในช่วงเวลา 1 นาที ของสะพานช่วงสั้น 25 เมตร (ก) สัญญาณความเร่งที่ฐานรอง และ (ข) สัญญาณการขจัดที่ฐานรอง .....	121
รูปที่ 6.3	กราฟผลตอบสนอง FFT ของสัญญาณการกระตุ้นในช่วงเวลา 1 นาที ของสะพานช่วงสั้น 25 เมตร (ก) สัญญาณความเร่งที่ฐานรอง และ (ข) สัญญาณการกระจัดที่ฐานรอง .....	123
รูปที่ 6.4	ผลตอบสนอง FFT ของความเร่งของรถยนต์ด้วยการใช้สัญญาณการจราจรจริง (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	124
รูปที่ 6.5	ผลตอบสนองของความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 ด้วยการใช้สัญญาณการจราจรจริงในโดเมนของเวลา (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	126

รูปที่ 6.6	ผลตอบสนอง FFT ของการกระตุ้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน ด้วยการใช้สัญญาณการจราจรจริง .....	127
รูปที่ 6.7	ผลตอบสนองของการกระตุ้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานด้วย การใช้สัญญาณการจราจรจริงในโดเมนของเวลา (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ และ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ .....	128
รูปที่ 6.8	ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนสูงสุดของรถยนต์ภายใต้การเบี่ยงเบนของค่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า (ก) $f_c = 0.5 f_b$ (ข) $f_c = f_b$ (ค) $f_c = 1.5 f_b$ และ (ง) ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมวลของรถยนต์ ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ $\alpha_{opt} = 0.9433$ และ $\zeta_{d,opt} = 0.1716$ .....	130
รูปที่ 6.9	ตัวอย่างค่าความเร่งสัมบูรณ์ของรถยนต์คันที่ 3 ในโดเมนของเวลาภายใต้ การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าด้วยการใช้ ค่าพารามิเตอร์ $m_c = 1000$ kg และ $f_c = 3.5$ Hz (ก) ก่อนติดตั้งมวลหน่วง ปรับค่า และ (ข) หลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	132
รูปที่ 6.10	ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นของรถยนต์คันที่ 1 ถึง 3 ก่อนผ่านการถ่วงน้ำหนักตาม การเปลี่ยนแปลงค่ามวลและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ภายใต้การกระตุ้น จากสภาพการจราจรจริง (ก) ก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า และ(ข) หลังติดตั้ง มวลหน่วงปรับค่า .....	133
รูปที่ 6.11	ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นของรถยนต์คันที่ 3 ก่อนผ่านการถ่วงน้ำหนักตามการ เปลี่ยนแปลงค่ามวลและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ภายใต้การกระตุ้นจาก สภาพการจราจรจริงทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	133
รูปที่ 6.12	ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นของรถยนต์คันที่ 1 ถึง 3 หลังผ่านการถ่วงน้ำหนักตาม การเปลี่ยนแปลงค่ามวลและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ภายใต้การกระตุ้น จากสภาพการจราจรจริง (ก) ก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า และ(ข) หลังติดตั้ง มวลหน่วงปรับค่า .....	137
รูปที่ 6.13	ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นของรถยนต์คันที่ 3 หลังผ่านการถ่วงน้ำหนักตามการ เปลี่ยนแปลงค่ามวลและความถี่ช่วงล่างของรถยนต์ภายใต้การกระตุ้นจาก สภาพการจราจรจริงทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	138
รูปที่ 6.14	รูปตัดตามแนวยาวของสะพานและตำแหน่งของรถยนต์ในแต่ละช่วงของสะพาน .....	146

รูปที่ 6.15	กราฟการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยจากการสั่นสะเทือนตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1 (ก) ก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า และ (ข) หลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า .....	149
รูปที่ ผ.1	ผลตอบสนองการกระจัดสัมบูรณ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานเนื่องจากการรวมผล 5 โหมดการสั่นเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) $\omega = 0.5\omega_{b1}$ (ข) $\omega = \omega_{b1}$ และ (ค) $\omega = 9\omega_{b1}$ .....	169
รูปที่ ผ.2	ผลตอบสนองการกระจัดสัมบูรณ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานเนื่องจากการรวมผล 5 โหมดการสั่นของคานเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) $\omega = 0.5\omega_{b1}$ (ข) $\omega = \omega_{b1}$ และ (ค) $\omega = 9\omega_{b1}$ .....	176
รูปที่ ผ.3	ผลตอบสนองการกระจัดสัมบูรณ์ของรถยนต์เนื่องจากการรวมผล 5 โหมดการสั่นของคานเปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) $\omega = 0.5\omega_{b1}$ (ข) $\omega = \omega_{b1}$ และ (ค) $\omega = 9\omega_{b1}$ .....	177