

การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองย่อส่วน

นาย พัทธพงษ์ อาสนจินดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5142-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MOVING TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION BY USING A SCALE-DOWN MODEL

Mr. Pattarapong Asnachinda

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5142-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาหน้าหน้ากรณฑ์ทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองย่อส่วน
โดย นายพัชรพงษ์ อาสนจินดา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

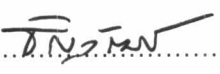
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิ์ศิริ)

พัทธพงษ์ อาสนจินดา : การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน.
(MOVING TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION BY USING A SCALE-DOWN MODEL)
อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 155 หน้า, ISBN 974-17-5142-7

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน สะพานและรถเป็นหลัก โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพานที่หน้าตัดต่าง ๆ มาเป็นข้อมูลในการหาน้ำหนัก ใน การศึกษานี้จะใช้การคำนวณหาน้ำหนักด้วยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิง เพราะพบว่ามีความรวดเร็วกว่าวิธีซิงกูลาร์ แวลูติคอมโพสิชัน นอกจากนี้จะประยุกต์ใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำเพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักที่คำนวณได้

การทดสอบได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ มวลและความเร็วของรถบรรทุก, ระดับความขรุขระของพื้นผิวสะพาน, ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถตามแนวขวางของสะพาน, ประเภทฐานรองรับ ของสะพานได้แก่ฐานรองรับแบบธรรมดาและแบบสะพานต่อเนื่อง และผลของจำนวนเพลลาของรถบรรทุก รวมทั้ง จะทำการเก็บวัดแรงทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจริงในเพลลาเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของแรงที่เกิดขึ้น

การย่อส่วนแบบจำลองจะให้มีความเครียดของแบบจำลองสะพานใกล้เคียงกับในสะพานจริง แบบจำลองย่อส่วนสะพานทำจากแผ่นเหล็กมีขนาดกว้าง ความยาว และความหนาเท่ากับ 50 ซม. 200 ซม. และ 1 ซม. ตามลำดับ โดยพิจารณารูปแบบจุดรองรับของสะพาน 2 ประเภทด้วยกันได้แก่สะพานแบบช่วงเดียวที่มีจุด รองรับแบบธรรมดาและสะพานแบบต่อเนื่อง ส่วนแบบจำลองย่อส่วนรถบรรทุกมีความกว้างระหว่างล้อ 20 ซม. และมีระยะห่างระหว่างเพลลา 28 ซม. สำหรับรถบรรทุกแบบ 2 เพลลา และมีระยะห่างระหว่างเพลลานั้นถึงเพลลา กลางและถึงเพลลาหลังเท่ากับ 24 ซม. และ 31.5 ซม. ตามลำดับสำหรับรถบรรทุกแบบ 3 เพลลา โดยจะทำการเพิ่ม และลดน้ำหนักรถในช่อง 10 กก. ถึง 30 กก. ส่วนความขรุขระของพื้นผิวสะพานจะทำการจำลอง 3 ระดับด้วยกัน

จากการทดสอบทั้งหมด 540 การทดสอบพบว่า การนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำ การเฉลี่ยและนำไปทำนายน้ำหนักจะสามารถลดผลของการบิดตัวของสะพานซึ่งเกิดจากตำแหน่งของรถตามแนว ขวางได้ดี และรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่ดีกว่า รถบรรทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตามระดับของความขรุขระ ของพื้นผิวสะพาน รูปแบบของฐานรองรับของสะพานนั้นมีผลต่อการทำนายน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ โดยสะพานแบบ ช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะให้ผลการทำนายน้ำหนักที่ดีกว่าสะพานแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้พบว่ากรณีรถบรรทุก แบบ 2 เพลลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิวไม่มีความขรุขระนั้นให้ผลการทำนายน้ำหนักรวมทั้งมีความ คลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ส่วนผลการทดสอบกรณีรูปแบบสะพานเป็นแบบต่อเนื่องและกรณีที่รถบรรทุกมี จำนวนเพลลาเพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสูงสุด $\pm 20\%$

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2546.....

ลายมือชื่อนิสิต.....พัทธพงษ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4570443421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TRUCK WEIGHT / WEIGHT IDENTIFICATION / MODEL

MR. PATTARAPONG ASNACHINDA : MOVING TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION BY USING
A SCALE-DOWN MODEL. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR DR. TOSPOL
PINKAEW, 155 pp, ISBN 974-17-5142-7

This research is conducted on the truck weight identification while moving on the bridge by testing on a scale-down model. The strain signals from various bridge sections are used as input data. The study employed the Dynamic Programming method to identify the truck weight since, it is found that, this method provides faster speed of computation comparing with the Singular Value Decomposition method. Moreover, the iteration technique is adapted to improve the identification accuracy.

The test investigated effects of the various factors including mass and velocity of truck, roughness of bridge surface, transverse position of truck, type of bridge supports e.g. simple support and continuous bridges, and number of truck axles. Moreover, the dynamic axle loads of the truck model are measured in order to study their characteristics.

The scale-down model is simulated by making the strains obtained from bridge model close to that from the real bridge. The bridge is modeled by a rectangular steel plate having width, length and thickness of 50 cm, 200cm and 1 cm, respectively. Two types of bridge support conditions consisting of one-span bridge with simple supports and continuous bridge are considered. The truck model has 20 cm wheel spacing and 28 cm axle spacing for two-axle truck model while three-axle truck model has the distance from front axle to middle axle and to rear axle equal to 24 cm and 31.5 cm, respectively. The truck weight is varied from 10 Kg to 30 Kg. Three levels of bridge roughness are simulated.

From 540 cases of experiment, it is found that using the strain obtained from averaging strains in same section can significantly reduce the torsional effect of bridge due to transverse position of the truck. The truck having heavier mass and moving with lower speed tends to yield better weight identification results. The identification error increases as the roughness level increases. The effect of support conditions is significant. It is found that the one-span bridge with simple supports yields better weight identification results than those from the continuous bridge. It is also found that, the weight error of about $\pm 5\%$ is achieved when the two-axle truck moving on the one-span simple support bridge with smooth surface. However this error becomes as high as $\pm 20\%$ for the continuous bridge and for the three-axle truck.

Department..... CIVIL ENGINEERING.....

Student's signature .....

Concentration : CIVIL ENGINEERING.....

Advisor's signature .....

Academic year..... 2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ รศ.ศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นประธานของ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ดร. เฉลิมพล โล่ห์รัตนเสน่ห์ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือในการทำทดสอบ รวมทั้งยังได้ให้ความกรุณาในการซ่อมแซมเครื่องมือต่างๆ และให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

นอกจากบุคคลท่านต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่น้อง และ เพื่อนๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาเป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 วัตถุประสงค์	8
1.4 ขอบเขตการวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	8
1.6 การดำเนินงานวิจัย	8
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 การสั่นไหวของสะพานภายใต้แรงกระทำแบบเคลื่อนที่	10
2.1.1 การจำลองสะพานด้วยชิ้นส่วนคาน	11
2.1.2 การหาเมตริกซ์ความหน่วง (damping matrix) ของระบบ	14
2.1.3 การหาแรงที่ขั้วจากแรงภายนอกที่มากระทำ	15
2.1.4 การสร้างสมการการเคลื่อนที่	16
2.1.5 วิธีการหาเมตริกซ์ F	18
2.2 การวัดความเครียด	18
2.3 การหาแรงขณะเคลื่อนที่จากผลการสั่นไหวของสะพาน	19
2.3.1 หลักการทั่วไป	20
2.3.2 การหาแรงโดยตรงจากการแก้ระบบสมการ	20
2.3.3.1 การแก้สมการโดยการใช้ซูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ (pseudo-inverse matrix, PI)	23
2.3.3.1 การแก้สมการด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition, SVD)	23
2.3.3 การหาน้ำหนักด้วยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูลา (recursive formula)	26
2.3.3.1 ไดนามิกโปรแกรมมิง (Dynamic Programming)	27
2.3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณ	29
2.4 การเพิ่มความถูกต้องในการหาแรงด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ	29

บทที่	หน้า
2.5 การปรับปรุงการหาน้ำหนักจากผลของสภาพเงื่อนไขบริเวณจุดรองรับของแบบจำลองสะพาน ..	31
2.5.1 แบบจำลองของสะพานแบบช่วงเดียว	32
2.5.2 แบบจำลองของสะพานแบบหลายช่วง	32
2.5.3 สถิติเฟสเมตริกซ์ของแบบจำลองสะพานที่ทำการปรับแก้สภาพจุดรองรับ	33
3 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพเบื้องต้นของวิธีการหาน้ำหนัก	36
3.1 ตัวอย่างการทดสอบเบื้องต้น	36
3.2 ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากแบบจำลองย่อยส่วน	37
3.2.1 การหาน้ำหนักรถด้วยวิธีแก้ระบบสมการด้วยการใช้ชูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ (Pseudo-Inverse Matrix)	37
3.2.2 การหาน้ำหนักรถด้วยวิธีแก้ระบบสมการด้วยซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition)	38
3.2.3 การหาน้ำหนักรถด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง	40
3.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า λ ที่เหมาะสม	42
3.3.1 อิทธิพลของมวลของรถบรรทุก	43
3.3.2 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุก	44
3.4 ผลการหาน้ำหนักด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ	46
4 การออกแบบและติดตั้งแบบจำลองย่อยส่วน	50
4.1 แบบจำลองย่อยส่วนสะพาน	50
4.2 แบบจำลองย่อยส่วนของรถบรรทุก	55
4.3 ตำแหน่งและขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด	58
4.3.1 ขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด	58
4.3.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด	58
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	60
4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บสัญญาณ	60
4.4.2 ตัวเซนเซอร์ที่ใช้หาตำแหน่งของรถ	60
4.5 รูปแบบการทดสอบการหาน้ำหนัก	63
4.5.1 การศึกษาผลของตำแหน่งการวิ่งของรถในช่องจราจร	63
4.5.2 การศึกษาผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพานที่มีต่อการหาน้ำหนัก	63
4.5.3 การทดสอบผลการหาน้ำหนักรถจากผลของสภาพเงื่อนไขบริเวณจุดรองรับของสะพาน	65
4.5.4 การศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่มีจำนวนเพลลา 3 เพลลา	66
4.6 หลักการวิเคราะห์ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก	66
4.6.1 กรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา	66
4.6.2 กรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลลาเคลื่อนที่บนสะพานต่อเนื่อง	68

สารบัญ (ต่อ)

ณ

บทที่	หน้า
4.6.3	69
5	72
5.1	72
5.2	74
5.2.1	74
5.2.2	80
5.3	82
5.4	83
6	86
6.1	86
6.1.1	86
6.1.2	88
6.1.3	90
6.1.4	92
6.1.5	99
6.1.6	100
6.2	111
6.2.1	111
6.2.2	113
6.3	122
6.4	125
6.4.1	125
6.4.2	131
6.5	133
6.5.1	133
6.5.2	137
6.5.3	140
7	144
7.1	144

สารบัญ (ต่อ)

ญ

บทที่	หน้า
7.2 การหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบ 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานต่อเนื่อง.....	145
7.3 การหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบ 3 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา.....	145
7.4 ข้อเสนอแนะ.....	146
7.4.1 ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้จริง.....	146
7.4.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม.....	146
รายการอ้างอิง.....	147
ภาคผนวก.....	149
ภาคผนวก ก. การเปรียบเทียบแบบจำลองรถบรรทุก.....	150
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบโดยละเอียด.....	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	155

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	ผลการทดสอบหาค่าความเครียดที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ เมื่อทำการปรับระยะของจุดรองรับช่วงในที่แตกต่างกัน (กรณีสะพานจำลองไม่มีการยึดรั้งที่ปลาย)	53
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบหาค่าความเครียดที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ เมื่อทำการปรับระยะของจุดรองรับช่วงในที่แตกต่างกัน (กรณีสะพานจำลองมีการยึดรั้งที่ปลาย).....	53
ตารางที่ 5.1	ค่าเปรียบเทียบของแบบจำลองสะพานต่อเนื่อง	80
ตารางที่ 6.1	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ.....	89
ตารางที่ 6.2	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ช่องจราจรด้านซ้ายของสะพาน และพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ.....	97
ตารางที่ 6.3	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ช่องจราจรด้านขวาของสะพาน และพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ	98
ตารางที่ 6.4	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และสะพานมีความขรุขระเล็กน้อย.....	101
ตารางที่ 6.5	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และสะพานมีความขรุขระปานกลาง	102
ตารางที่ 6.6	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และสะพานมีความขรุขระมาก	103
ตารางที่ 6.7	ค่า Impact Factor ของน้ำน้กรถบรรทุกที่เก็บวัดได้และที่ทำการทนายได้ กรณีเคลื่อนที่ ณ ช่องจราจรด้านขวาของสะพาน และสะพานไม่มีความขรุขระ	109
ตารางที่ 6.8	ค่า Impact Factor ของน้ำน้กรถบรรทุกที่เก็บวัดได้และที่ทำการทนายได้ กรณีเคลื่อนที่ ณ ช่องจราจรด้านขวาของสะพาน และสะพานมีความขรุขระเล็กน้อย	110
ตารางที่ 6.9	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่บนสะพานต่อเนื่องซึ่งมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.8.....	119
ตารางที่ 6.10	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่บนสะพานต่อเนื่องซึ่งมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.7.....	120
ตารางที่ 6.11	อิทธิพลของค่าเปรียบเทียบของสะพานต่อเนื่องที่มีต่อความถูกต้องในการทนายน้ำน้ก	121
ตารางที่ 6.12	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุก กรณีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และสะพานไม่มีความขรุขระ และสมมติให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่.....	124
ตารางที่ 6.13	ผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุกแบบ 3 เพลา กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว และสะพานไม่มีความขรุขระ.....	129
ตารางที่ 6.14	ผลผลการทดสอบการห้ำน้ำน้กรถบรรทุกแบบ 3 เพลา กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว และพื้นผิวสะพานมีความขรุขระเล็กน้อย.....	130

สารบัญตาราง

๘

บทที่

หน้า

ตารางที่ 6.15 ผลผลการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 3 เฟลาด้วยการทายน้ำหนักแบบ 2 ตัวแปร กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว และสะพานไม่มีความขรุขระ.....	132
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างสะพานที่รับแรงกระทำแบบจุด.....	10
รูปที่ 2.2 แบบจำลองคานของออยเลอร์-เบอร์นูลี.....	11
รูปที่ 2.3 แบบจำลองชิ้นส่วนของคาน.....	11
รูปที่ 2.4 แสดงแรงที่ขั้วเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ.....	15
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการหาน้ำหนักเบื้องต้นก่อนการคำนวณซ้ำ.....	29
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการหาแรงทางสถิติจากการเฉลี่ยแรงทางพลศาสตร์ที่คำนวณได้.....	30
รูปที่ 2.7 ลักษณะสะพานแบบช่วงเดียว.....	32
รูปที่ 2.8 แบบจำลองคานสำหรับสะพานช่วงเดียว.....	32
รูปที่ 2.9 ลักษณะสะพานแบบหลายช่วง.....	32
รูปที่ 2.10 แบบจำลองคานสำหรับสะพานหลายช่วง.....	33
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างชิ้นส่วนคานที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักจรด.....	33
รูปที่ 2.12 ชิ้นส่วนคานที่มีจุดรองรับข้างหนึ่งเป็นข้อหมุนสปริง.....	34
รูปที่ 2.13 รูปแบบการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองสะพาน.....	34
รูปที่ 3.1 โมเมนต์ตัดในแต่ละหน้าตัด (section) กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.51 เมตร/วินาที.....	36
รูปที่ 3.2 โมเมนต์ตัดในแต่ละหน้าตัด (section) กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.32 เมตร/วินาที.....	37
รูปที่ 3.3 แสดงค่าแรงของรถขณะวิ่งบนสะพาน เมื่อไม่มีการเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.51 เมตร/วินาที.....	38
รูปที่ 3.4 แสดงค่าแรงของรถขณะวิ่งบนสะพาน เมื่อเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) ด้วยค่า $\lambda = 0.1$ กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.51 เมตร/วินาที.....	39
รูปที่ 3.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (regularization parameter, λ) กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.51 เมตร/วินาที.....	40
รูปที่ 3.6 แสดงค่าแรงของรถขณะวิ่งบนสะพาน เมื่อเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) ด้วยค่า $\lambda = 0.1$ กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.51 เมตร/วินาที.....	41
รูปที่ 3.7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (regularization parameter, λ) กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.51 เมตร/วินาที.....	41
รูปที่ 3.8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (regularization parameter, λ) กรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.32 เมตร/วินาที.....	42
รูปที่ 3.9 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักรวมที่มวลของรถแตกต่างกัน โดยใช้วิธี ซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition).....	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ท

	หน้า
รูปที่ 3.10 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักรวมที่มวลของรถแตกต่างกัน โดยใช้วิธี ไดนามิกโปรแกรมมิง (Dynamic Programming)	44
รูปที่ 3.11 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักรวมที่ความเร็วของรถแตกต่างกัน โดยใช้ วิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition)	45
รูปที่ 3.12 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักรวมที่ความเร็วของรถแตกต่างกัน โดยใช้ วิธีไดนามิกโปรแกรมมิง (Dynamic Programming)	45
รูปที่ 3.13 แสดงค่าแรงของเพลาน้ำที่หาได้โดยใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ โดยใช้ $\lambda = 0.1$	46
รูปที่ 3.14 แสดงค่าแรงของเพลาลังที่หาได้โดยใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ โดยใช้ $\lambda = 0.1$	47
รูปที่ 3.15 แสดงค่าแรงรวมของรถที่หาได้โดยใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ โดยใช้ $\lambda = 0.1$	47
รูปที่ 3.16 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักรวมที่มวลของรถแตกต่างกัน โดยใช้วิธี ไดนามิกโปรแกรมมิงแบบธรรมดา และวิธีไดนามิกโปรแกรมมิงร่วมกับเทคนิคการคำนวณซ้ำ	48
รูปที่ 3.17 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนทางสถิติของน้ำหนักรวมที่ความเร็วของรถแตกต่างกัน โดยใช้วิธี ไดนามิกโปรแกรมมิงแบบธรรมดา และวิธีไดนามิกโปรแกรมมิงร่วมกับเทคนิคการคำนวณซ้ำ	48
รูปที่ 3.18 แสดงจำนวนรอบของการคำนวณซ้ำที่ใช้ที่ค่าพารามิเตอร์ λ ต่างกัน	49
รูปที่ 4.1 ลักษณะและขนาดของรถบรรทุกจริง	50
รูปที่ 4.2 ลักษณะน้ำหนักกระทำแบบจุดบนสะพาน	51
รูปที่ 4.3 แบบจำลองย่อยส่วนสะพานช่วงเดียว	51
รูปที่ 4.4 รูปแบบของแบบจำลองสะพานหลายช่วง	52
รูปที่ 4.5 แบบจำลองย่อยส่วนสะพานหลายช่วง กรณีจุดรองรับมีสติฟเนสน้อย (Continuity index = 0.79)	54
รูปที่ 4.6 แบบจำลองย่อยส่วนสะพานหลายช่วง กรณีจุดรองรับมีสติฟเนสมาก (Continuity index = 0.69)	54
รูปที่ 4.7 อุปกรณ์วัดแรงทางพลศาสตร์ที่เพลารถ (Dynamics Axle Force Detector)	55
รูปที่ 4.8 แบบจำลองย่อยส่วนรถบรรทุกแบบ 2 เพลา	56
รูปที่ 4.9 แบบจำลองย่อยส่วนรถบรรทุกแบบ 3 เพลา	57
รูปที่ 4.10 ขนาดของแบบจำลองย่อยส่วนของรถบรรทุก	57
รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการติดตั้งเกจวัดความเครียด	58
รูปที่ 4.12ก ตำแหน่งในการติดตั้งเกจวัดความเครียดได้สะพาน	59
รูปที่ 4.12ข ตำแหน่งในการติดตั้งเกจวัดความเครียดได้สะพาน	59
รูปที่ 4.13 ลักษณะของกล่องบริดจ์คอมพลีทชัน	60
รูปที่ 4.14 ลักษณะของดาต้าลอคเกอร์	60
รูปที่ 4.15 ตัวเซนเซอร์วัดตำแหน่ง	61
รูปที่ 4.16 แถบขาว-ดำ ความกว้าง 0.5 ซม.	61
รูปที่ 4.17 สัญญาณที่ตัวเซนเซอร์เก็บข้อมูล	62

	หน้า
รูปที่ 4.18 การติดตั้งเซนเซอร์วัดตำแหน่งและแถบขาว-ดำ กับแบบจำลองสะพาน.....	62
รูปที่ 4.19ก ขนาดและรูปร่างของท่อนไม้ 3 รูปแบบที่นำมาใช้ทำพื้นผิวขรุขระของแบบจำลองสะพาน....	64
รูปที่ 4.19ข พื้นผิวความขรุขระทั้ง 3 ระดับที่จะนำไปติดตั้งบนแบบจำลองสะพาน.....	65
รูปที่ 4.20 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2 เพลาบนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนธรรมดา	67
รูปที่ 4.21 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2 เพลาบนสะพานต่อเนื่อง	68
รูปที่ 4.22 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 3 เพลาบนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนธรรมดา	70
รูปที่ 5.1 ลักษณะการให้แรงกระทำทางสถิติสำหรับการปรับเทียบแบบจำลองรถบรรทุก.....	72
รูปที่ 5.2 ลักษณะสัญญาณความเครียดที่เก็บวัดได้จากการปรับเทียบด้วยแรงกระทำทางสถิติ	73
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างกราฟและฟังก์ชันสำหรับใช้ปรับเทียบเพื่อหาค่าแรงทางพลศาสตร์ในล้อหมายเลข 1 ..	73
รูปที่ 5.4 ลักษณะของค่าแรงในเพลารถที่เก็บวัดได้จากการวิ่งรถด้วยความเร็วต่ำ	75
รูปที่ 5.5 ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานก่อนทำการปรับแก้	75
รูปที่ 5.6 ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานก่อนทำการปรับแก้	76
รูปที่ 5.7 ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานก่อนทำการปรับแก้	76
รูปที่ 5.8 น้ำหนักเพลาน้ำ, เพลาลังและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่หายได้ก่อนทำการปรับแก้	77
รูปที่ 5.9 ค่าโมเมนต์หลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพาน	78
รูปที่ 5.10 ค่าโมเมนต์หลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพาน	78
รูปที่ 5.11 ค่าโมเมนต์หลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพาน	79
รูปที่ 5.12 น้ำหนักเพลาน้ำ เพลาลังและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทางพลศาสตร์หลังจากทำการปรับแก้	79
รูปที่ 5.13 ค่าโมเมนต์ของหน้าตัดสะพานหลังจากปรับแก้ กรณีสะพานมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.8	81
รูปที่ 5.14 ค่าโมเมนต์ของหน้าตัดสะพานหลังจากปรับแก้ กรณีสะพานมีค่า Continuity index เท่ากับ 0.7	81
รูปที่ 5.15 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นไหวแบบอิสระ	82
รูปที่ 5.16 สัญญาณบนโดเมนของความถี่ (frequency domain)	82
รูปที่ 5.17 ลักษณะสัญญาณของแรงทางพลศาสตร์ในเพลารถที่เก็บวัดได้จาก Dynamics Axle Force Detector.....	84
รูปที่ 5.18 ฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (FFT) ของความถี่ของที่มีสัญญาณรบกวน	84
รูปที่ 5.19 ลักษณะสัญญาณที่ทำการกรองข้อมูลและกรองสัญญาณรบกวน	85
รูปที่ 6.1 ลักษณะของโมเมนต์ดัดของสะพานที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนต่ำ (ผลการทดสอบ ครั้งที่ 3 กรณีรถบรรทุกหนัก 30 Kg เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ)	87
รูปที่ 6.2 ลักษณะของโมเมนต์ดัดของสะพานที่ให้ผลการทำนายน้ำหนักมีความคลาดเคลื่อนสูง (ผลการทดสอบ ครั้งที่ 5 กรณีรถบรรทุกหนัก 20 Kg เคลื่อนที่ด้วยความเร็วปานกลาง)	88
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงผลต่างของน้ำหนักรถบรรทุกที่หายได้กับน้ำหนักที่วัดได้จริง กรณีทดสอบด้วยน้ำหนัก รถบรรทุกจำลองที่แตกต่างกันเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจำนวน 15 การทดสอบ	90
รูปที่ 6.4 ลักษณะของโมเมนต์ดัดของสะพาน เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ.....	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ณ

หน้า

รูปที่ 6.5	ลักษณะของโมเมนต์ดัดของสะพาน เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วปานกลาง.....	91
รูปที่ 6.6	ลักษณะของโมเมนต์ดัดของสะพาน เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วสูง.....	92
รูปที่ 6.7	เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณความเครียดที่หน้าตัดสะพาน L/3 เมื่อเพลาลังของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวม 30 กก. อยู่ที่ตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียด และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ณ ตำแหน่งด้านซ้าย ขวา และกึ่งกลางสะพาน	93
รูปที่ 6.8	เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณความเครียดที่หน้าตัดสะพาน L/2 เมื่อเพลาลังของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวม 30 กก. อยู่ที่ตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียด และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ณ ตำแหน่งด้านซ้าย ขวา และกึ่งกลางสะพาน	94
รูปที่ 6.9	เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณความเครียดที่หน้าตัดสะพาน 2L/3 เมื่อเพลาลังของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวม 30 กก. อยู่ที่ตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียด และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ณ ตำแหน่งด้านซ้าย ขวา และกึ่งกลางสะพาน	94
รูปที่ 6.10	ลักษณะสัญญาณความเครียดที่หน้าตัด L/2 เมื่อรถบรรทุกหนัก 30 กิโลกรัมเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งฝั่งซ้ายของสะพานด้วยความเร็วต่ำ	95
รูปที่ 6.11	ลักษณะสัญญาณความเครียดที่หน้าตัด L/2 เมื่อรถบรรทุกหนัก 30 กิโลกรัมเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งฝั่งขวาของสะพานด้วยความเร็วต่ำ	95
รูปที่ 6.12	เปรียบเทียบลักษณะโมเมนต์ดัดของหน้าตัดสะพานเมื่อรถบรรทุกหนัก 30 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำในตำแหน่งตามแนวขวางของสะพานกรณีเคลื่อนที่ในช่องจราจรด้านซ้าย ขวา และกลาง	96
รูปที่ 6.13	ลักษณะของโมเมนต์ดัดของสะพาน เมื่อรถบรรทุกหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำบนสะพานที่มีพื้นผิวขรุขระเล็กน้อย	99
รูปที่ 6.14	ค่าความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ที่ระดับมวลและความเร็วของรถบรรทุกที่แตกต่างกันเมื่อพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ	105
รูปที่ 6.15	ค่าความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ที่ระดับมวลและความเร็วของรถบรรทุกที่แตกต่างกันเมื่อพื้นผิวสะพานมีความขรุขระเล็กน้อย	105
รูปที่ 6.16	ค่าความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ที่ระดับมวลและความเร็วของรถบรรทุกที่แตกต่างกันเมื่อพื้นผิวสะพานมีความขรุขระปานกลาง	105
รูปที่ 6.17	ค่าความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ที่ระดับมวลและความเร็วของรถบรรทุกที่แตกต่างกันเมื่อพื้นผิวสะพานมีความขรุขระมาก	106
รูปที่ 6.18	เปรียบเทียบลักษณะแรงที่เก็บวัดได้และทำการหายไป เมื่อเคลื่อนที่รถบรรทุกหนัก 30 กก. ด้วยความเร็วปานกลาง ผ่านสะพานที่พื้นผิวราบเรียบ	106
รูปที่ 6.19	เปรียบเทียบลักษณะแรงที่เก็บวัดได้และทำการหายไป เมื่อเคลื่อนที่รถบรรทุกหนัก 30 กก. ด้วยความเร็วปานกลาง ผ่านสะพานที่พื้นผิวขรุขระ	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ด

	หน้า
รูปที่ 6.20 ค่าความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ของน้ำหนักเพลาหน้า เพลาหลังและน้ำหนักรวมที่ทลายได้ ที่ระดับค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) ที่แตกต่างกัน.....	108
รูปที่ 6.21 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Impact Factor น้ำหนักเพลาหน้า เพลาหลังและน้ำหนักรวมที่ ทลายได้ ที่ระดับค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) ที่แตกต่างกัน	108
รูปที่ 6.22 ผลกระทบของค่าเริ่มต้นของผลตอบสนองของสะพานต่อค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติของ น้ำหนักรวมของรถบรรทุก.....	112
รูปที่ 6.23 ลักษณะของโมเมนต์ดัดที่หน้าตัด L/2 ที่สร้างขึ้นในแต่ละรอบของการคำนวณซ้ำ กรณีที่ สัมประสิทธิ์ A มีค่าเป็น 5 เท่า	113
รูปที่ 6.24 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานที่มีค่า Continuity index = 0.8 เมื่อรถบรรทุก จำลองหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ	114
รูปที่ 6.25 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานที่มีค่า Continuity index = 0.8 เมื่อรถบรรทุก จำลองหนัก 20 กก. เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ	115
รูปที่ 6.26 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานที่มีค่า Continuity index = 0.8 เมื่อรถบรรทุก จำลองหนัก 30 กก. เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ	115
รูปที่ 6.27 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานที่มีค่า Continuity index = 0.7 เมื่อรถบรรทุก จำลองหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ	116
รูปที่ 6.28 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานที่มีค่า Continuity index = 0.7 เมื่อรถบรรทุก จำลองหนัก 20 กก. เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ	117
รูปที่ 6.29 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานที่มีค่า Continuity index = 0.7 เมื่อรถบรรทุก จำลองหนัก 30 กก. เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่ำ	117
รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบผลของค่าสถิติเนสของข้อหมุนสปริงต่อค่า Continuity index ของสะพานต่อเนื่อง ที่มีความยาวช่วงหลักแตกต่างกัน	118
รูปที่ 6.31 ลักษณะสัญญาณความเครียดของหน้าตัดสะพานและตำแหน่งรถบรรทุกที่คลาดเคลื่อน	123
รูปที่ 6.32 แสดงตำแหน่งของรถบรรทุกและเวลา กรณีที่วัดได้จริงและที่สมมติขึ้น.....	123
รูปที่ 6.33 ลักษณะโมเมนต์ดัดของหน้าตัดสะพาน เมื่อรถบรรทุกแบบ 3 เพลาหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ด้วย ความเร็วสูงบนสะพานช่วงเดียวที่มีพื้นผิวราบเรียบ.....	125
รูปที่ 6.34 ลักษณะน้ำหนักทางพลศาสตร์ในเพลารถที่เก็บวัดได้ เมื่อรถบรรทุกแบบ 3 เพลาหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงบนสะพานช่วงเดียวที่มีพื้นผิวราบเรียบ	126
รูปที่ 6.35 ลักษณะโมเมนต์ดัดของหน้าตัดสะพาน เมื่อรถบรรทุกแบบ 3 เพลาหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ด้วย ความเร็วสูง บนสะพานช่วงเดียวที่มีพื้นผิวขรุขระเล็กน้อย.....	126
รูปที่ 6.36 ลักษณะน้ำหนักทางพลศาสตร์ในเพลารถที่เก็บวัดได้ เมื่อรถบรรทุกแบบ 3 เพลาหนัก 10 กก. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง บนสะพานช่วงเดียวที่มีพื้นผิวขรุขระเล็กน้อย.....	127

