

การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม



นาย ภาณุ ฟุ้งสุข

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-7104-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MOVING TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION ON BRIDGES BY FIELD TESTING



Mr. Panu Foongsook

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2004

ISBN 974-17-7104-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานโดยการทดสอบ
ภาคสนาม

โดย

นายภาณุ พุ่งสุข


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต




..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




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



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



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)



..... กรรมการ
(ดร. เฉลิมพล โลหรัตนเสน่ห์)

ภาณุ พุ่งสุข : การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม (MOVING TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION ON BRIDGES BY FIELD TESTING)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 145 หน้า, ISBN 974-17-7104-5

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานโดยการทดสอบภาคสนามด้วยการใช้สัญญาณความเครียดของสะพานที่หน้าตัดต่าง ๆ มาเป็นข้อมูลในการหาน้ำหนักในการศึกษานี้จะใช้การคำนวณหาน้ำหนักด้วยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่งร่วมกับเทคนิคการคำนวณซ้ำ ซึ่งจากผลการศึกษาในอดีตพบว่าวิธีดังกล่าวมีความสามารถในการหาน้ำหนักบรรทุกได้ดีเพียงพอสำหรับนำไปใช้ในงานจริง แต่การศึกษาดังกล่าวจำกัดอยู่เพียงการศึกษาด้วยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์หรือแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

การศึกษาได้พิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ น้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกทดสอบ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถตามแนวขวางของสะพาน และความขรุขระของพื้นผิวสะพาน โดยทำการทดสอบที่สะพานข้ามคลองบางน้อย ซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรงขนาด 3 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) โดยช่วงสะพานที่ทำการทดสอบมีความยาวช่วง 9.43 เมตร และมีความกว้าง 14 เมตร โดยแผ่นพื้นสะพานใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงขนาดกว้าง 1 เมตร วางเรียงกัน และเททับหน้าด้วยคอนกรีต (topping) หนาประมาณ 45 เซนติเมตร รถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบเป็นรถสิบล้อที่มีค้ำระยะห่างระหว่างเพลาระหว่าง 4.4 เมตร โดยวัดระยะจากเพลาน้ำถึงกึ่งกลางระหว่างเพลาคู่หลังและให้น้ำหนักบรรทุกโดยใช้ทรายหยาบในการศึกษานี้ทำการทดสอบด้วยรถบรรทุกที่ความเร็ว ระหว่าง 20-45 กม./ชม. และน้ำหนักบรรทุกระหว่าง 20-26 ตัน

จากข้อมูลการตรวจวัดค่าความเครียดของสะพานที่ได้พบว่า พฤติกรรมของสะพานต้องการทำเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยวิธีการเฉลี่ยค่าสัญญาณความเครียดแบบถ่วงน้ำหนักและแยกผลการทดสอบเนื่องจากตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางที่แตกต่างกัน เนื่องจากรูปแบบสะพานมีลักษณะหน้าตัดที่ไม่เท่ากันโดยที่บริเวณขอบของสะพานจะมีความหนามากกว่าบริเวณกลางหน้าตัด ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาของทางเท้าและราวกันตกและความแตกต่างของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงแต่ละแผ่น

จากผลการทดสอบทั้งหมดจำนวน 51 การทดสอบ พบว่าการนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักโดยคำนึงถึงผลของความไม่เท่ากันของหน้าตัดสะพานสามารถนำไปคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกได้และมีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ โดยพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนสูงขึ้นเมื่อมีความขรุขระของพื้นผิวสะพาน โดยผลการหาน้ำหนักบรรทุกทั้งในเพลาน้ำ เพลาคู่หลัง และน้ำหนักรวมของทุกกรณียกเว้นกรณีที่คิดความขรุขระนั้น มีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 50\%$, $\pm 10\%$ และ $\pm 6\%$ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของการทดสอบทั้งหมดยกเว้นกรณีที่คิดผลของความขรุขระของสะพาน จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 6\%$ ของน้ำหนักรวม จะใกล้เคียงกับเกณฑ์ประเภทที่ 3 ของ ASTM E1318-94 ซึ่งเป็นประเภทให้ความถูกต้องของระบบ Weight in motion (WIM) ที่ให้ค่าน้ำหนักที่ถูกต้องมากที่สุด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2547.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*ภาณุ พุ่งสุข*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ป.บ.อ.*.....

4570462321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TRUCK WEIGHT/ WEIGHT IDENTIFICATION/ BRIDGE/ FIELD TESTING

MR. PANU FOONGSOOK : MOVING TRUCK WEIGHT IDENTIFICATION ON BRIDGES BY
FIELD TESTING. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR DR. TOSPOL PINKAEW, 145
pp, ISBN 974-17-7104-5

This thesis studies on the weight identification of a truck while it is moving on bridge by field testing. The strain signals from various bridge sections are used as input data. The identification employs the Dynamic Programming method with iterative technique since the previous researches have found that the method provides sufficient accuracy to the identified weight of truck. However, those researches are limited for only the studies through computer simulation or scaled model experiment.

The study consider the effects of truck and bridge such as mass and velocity of truck, transverse moving direction on bridge and surface roughness of bridge. The Bang Noi bridge is chosen. The bridge is prestressed concrete bridge having 3 lanes (1 moving direction) with 9.43 meters span length and 14 meters in width. Prestressed concrete slabs with 1 meter width are placed in a row and covered with 45 centimeters topping concrete. A 10-wheel truck with 4.4 meters axle spacing measured from front axle to middle of rear axle is employed and is loaded by sand. The test speed is between 20-45 km/hr and the truck weight is between 20-26 tons.

From the recorded strain signal measurement, since the bridge character is non uniform cross sectional area in which the thickness along the edge is thicker than that in the middle strip due to sidewalk and railing. Therefore, the bridge calibration is adopted by using averaging of section strain with weighing procedure and the test data of different transverse moving direction cases is then analyzed using different calibration factor.

From 51 cases of test, there is found that using averaging of section strain with weighing procedure to identify the truck weight provides sufficient accuracy to the obtained solutions. The highest identification error is found for the cases with large roughness of bridge surface. In overall, the identified results of all test cases exhibit the identification errors within $\pm 50\%$, $\pm 10\%$ and $\pm 6\%$ for front axle weight, rear axle weight and total weight, respectively.

Department..... CIVIL ENGINEERING

Concentration..... CIVIL ENGINEERING

Academic year..... 2004

Student's signature Panu Foongsook.

Advisor's signature Tapol K.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นประธานของ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ อาจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ดร. เฉลิมพล โล่ห์รัตนเสน่ห์ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือในการทำการทดสอบ รวมทั้งยังได้ให้ความกรุณาในการซ่อมแซมเครื่องมือต่างๆ และให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ นายช่างประสิทธิ์ ภูประทุม รักษาการวิศวกรรมวิชาชีพอ ๖๖ ข. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง และ นายช่างจร เลหาณีวัตวร นายช่างแขวงการทางสมุทรสาคร แขวงการทางสมุทรสาคร กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สะพานข้ามคลองบางน้อยเพื่อการศึกษาวิจัย

นอกจากบุคคลท่านต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่น้อง และ เพื่อนๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาเป็นอย่างดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 8 |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย | 8 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ | 8 |
| 1.6 การดำเนินงานวิจัย | 8 |
| 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 10 |
| 2.1 การสร้างรูปแบบจำลองเพื่อจำลองความเครียด | 10 |
| 2.1.1 การจำลองรูปแบบปฏิกิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพานกับรถบรรทุก | 10 |
| 2.1.2 การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของปฏิกิริยาตอบสนองซึ่งกันและกันระหว่างสะพานกับรถบรรทุก | 12 |
| 2.2 การหาค่าน้ำหนักจรดขณะเคลื่อนที่บนสะพาน | 12 |
| 2.2.1 การจำลองสะพานด้วยชิ้นส่วนคาน | 13 |
| 2.2.2 การหาเมตริกซ์ความหน่วง (damping matrix) ของระบบ | 17 |
| 2.2.3 การหาแรงที่ชั่วจากแรงภายนอกที่มากระทำ | 18 |
| 2.2.4 การสร้างสมการการเคลื่อนที่ของสะพานภายใต้แรงซึ่งเคลื่อนที่บนสะพาน | 19 |
| 2.2.5 วิธีการหาทรานซิชันเมตริกซ์ (F) | 21 |
| 2.2.6 หลักการหาค่าน้ำหนักจรดขณะเคลื่อนที่บนสะพาน | 22 |
| 2.2.7 การวัดความเครียด | 23 |
| 2.2.8 การหาแรงโดยตรงจากการแก้ระบบสมการ | 23 |
| 2.2.9 ไดนามิกโปรแกรมมิง (Dynamic Programming) | 24 |
| 2.2.10 เทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration Technique) | 26 |
| 2.2.11 การเฉลียวาค่าน้ำหนักจรด | 30 |
| 2.3 ความถูกต้องของการหาค่าน้ำหนักจรดจากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ | 31 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.4 ความถูกต้องของการหาน้ำหนักรถจากการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน | 33 |
| 2.5 การหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานแบบต่อเนื่อง | 34 |
| 2.5.1 สถิติในสมมติวิธีของแบบจำลองสะพานที่ทำการปรับแก้สภาพจตุรรองรับ | 34 |
| 3 การพัฒนาอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน | 38 |
| 3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน | 38 |
| 3.2 การวิเคราะห์อุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ | 40 |
| 3.3 การทดสอบความสามารถของอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน | 42 |
| 3.4 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ | 46 |
| 3.5 การประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน | 51 |
| 4 การเตรียมการทดสอบสะพานภาคสนาม | 54 |
| 4.1 สะพานทดสอบ | 54 |
| 4.2 รถบรรทุกทดสอบ | 58 |
| 4.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดสำหรับสะพาน | 60 |
| 4.4 ระบบเก็บข้อมูลความเครียดและอุปกรณ์ทดสอบอื่น | 63 |
| 4.4.1 ระบบเก็บข้อมูลความเครียด | 63 |
| 4.4.2 อุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ | 66 |
| 5 การเปรียบเทียบแบบจำลองสะพาน | 72 |
| 5.1 การศึกษาพฤติกรรมกระจายแรงของสะพาน | 72 |
| 5.1.1 การกระจายระหว่างช่วงสะพาน | 76 |
| 5.1.2 การกระจายแรงตามแนวขวางระหว่างแผ่นพื้นสะพาน | 82 |
| 5.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองสะพานด้วยการทดสอบ | 85 |
| 6 การทดสอบภาคสนามและการประเมินความถูกต้องของการหาน้ำหนัก | 89 |
| 6.1 การทดสอบภาคสนาม | 89 |
| 6.1.1 รูปแบบการทดสอบภาคสนาม | 89 |
| 6.1.2 รถบรรทุกทดสอบ | 91 |
| 6.1.3 การดำเนินการทดสอบ | 93 |
| 6.2 การหาน้ำหนักรถ | 104 |
| 6.3 อิทธิพลของน้ำหนักของรถบรรทุกต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก | 113 |
| 6.4 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุกต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก | 118 |
| 6.5 อิทธิพลของช่องจราจร | 123 |
| 6.6 อิทธิพลของความขรุขระของพื้นผิวทาง | 128 |
| 6.7 ระดับความถูกต้องของการหาน้ำหนักของรถบรรทุก | 131 |
| 6.7.1 รถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 132 |

สารบัญ (ต่อ)

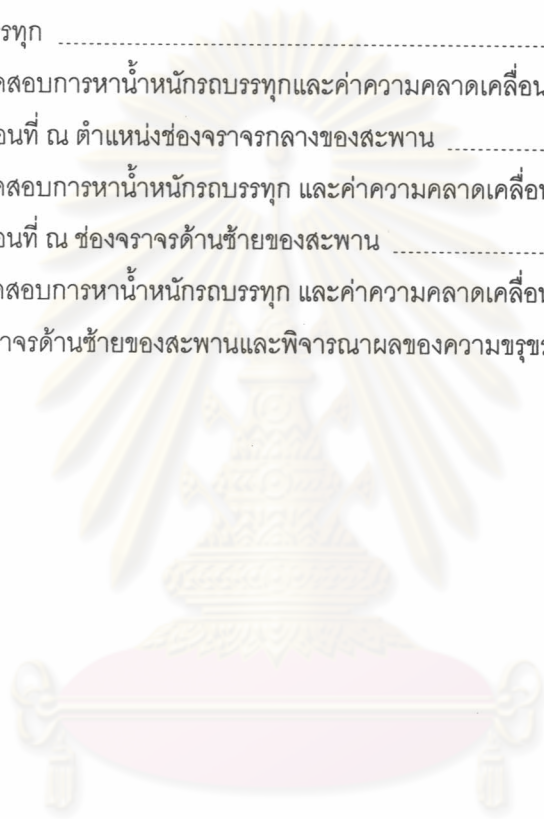
ณ

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 6.7.2 รถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว กรณีวิ่งช่องจราจรซ้าย..... | 133 |
| 6.7.2 รถบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว กรณีวิ่งช่องจราจรซ้ายและคิดผลของ ความขรุขระของพื้นผิวทาง..... | 134 |
| 7 บทสรุป | 136 |
| 7.1 อิทธิพลของน้ำหนักของรถบรรทุก | 137 |
| 7.2 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุก | 137 |
| 7.3 อิทธิพลของช่องจราจร | 137 |
| 7.4 อิทธิพลของความขรุขระของพื้นผิวทาง..... | 138 |
| 7.5 ข้อเสนอแนะ..... | 139 |
| รายการอ้างอิง..... | 140 |
| ภาคผนวก..... | 142 |
| ภาคผนวก ก การหาคุณสมบัติพื้นฐานของสะพาน | 143 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 145 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 5.1 ค่าเปรียบเทียบของแบบจำลองสะพาน | 87 |
| ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ | 92 |
| ตารางที่ 6.2 ลักษณะของการลู่เข้าของน้ำหนักเพลาน้ำ น้ำหนักเพลาลังและน้ำหนักรวม ในแต่ละรอบ | 104 |
| ตารางที่ 6.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าน้ำหนักที่หาได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับน้ำหนักจริง ของรถบรรทุก | 105 |
| ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบการห้าน้ำหนักรถบรรทุกและค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งช่องจราจรกลางของสะพาน | 110 |
| ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบการห้าน้ำหนักรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ กรณีเคลื่อนที่ ณ ช่องจราจรด้านซ้ายของสะพาน | 111 |
| ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบการห้าน้ำหนักรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติกรณีเคลื่อนที่ ณ ช่องจราจรด้านซ้ายของสะพานและพิจารณาผลของความขรุขระของผิวทาง | 112 |



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ (ต่อ)

๗

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 รูปแบบจำลองระหว่างสะพานกับรถบรรทุก | 11 |
| รูปที่ 2.2 ลักษณะระบบของแบบจำลองคันที่ใช้ในการหาค่าหน้าหนัก | 13 |
| รูปที่ 2.3 แบบจำลองชิ้นส่วนของคัน | 14 |
| รูปที่ 2.4 แรงที่ชั่วเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ | 18 |
| รูปที่ 2.5 รูปแบบขั้นตอนการคำนวณของเทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration Technique: Updated Static Component) | 29 |
| รูปที่ 2.6 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2 เพลาบนสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุน ธรรมดา | 30 |
| รูปที่ 2.7 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักทางสถิตทั้งก่อนและหลังจากผ่านการคำนวณซ้ำ | 32 |
| รูปที่ 2.8 ค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกหาได้เทียบกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจริง | 32 |
| รูปที่ 2.9 ลักษณะสะพานแบบช่วงเดียว | 34 |
| รูปที่ 2.10 แบบจำลองคันสำหรับสะพานช่วงเดียว | 34 |
| รูปที่ 2.11 ชิ้นส่วนคันที่มีจุดรองรับข้างหนึ่งเป็นข้อหมุนสปริง | 35 |
| รูปที่ 2.12 รูปแบบการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองสะพาน | 35 |
| รูปที่ 2.13 ระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2 เพลาบนสะพานต่อเนื่อง | 37 |
| รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานที่ออกแบบสำหรับติดตามวัดความเครียดสำหรับติดเหล็ก | 38 |
| รูปที่ 3.2 อุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานที่ให้แรงดึงไม่เพียงพอ | 39 |
| รูปที่ 3.3 แบบจำลองอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน | 40 |
| รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของหน่วยแรงดึงในอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน (เมื่อให้แรงดึง 1400 นิวตัน) | 41 |
| รูปที่ 3.5 การกระจายตัวของหน่วยแรงดึงในอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน (เมื่อให้แรงดึง 1400 นิวตัน) | 41 |
| รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่แผ่นพื้นคอนกรีตขนาด 35 cm x 35 cm | 42 |
| รูปที่ 3.7 เครื่องให้แรงดึงในอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพาน | 43 |
| รูปที่ 3.8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานที่เรียบร้อยแล้ว | 43 |
| รูปที่ 3.9 ลักษณะการทดสอบของแผ่นพื้นคอนกรีตกับเครื่องเซอร์โวเพลเซอร์ | 44 |
| รูปที่ 3.10 แผ่นภาพแสดงรายละเอียดในการทดสอบทั้งหมด | 45 |
| รูปที่ 3.11 พฤติกรรมของอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานที่เวลาต่างๆ | 46 |
| รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลค่าหน่วยความเครียดในอุปกรณ์วัด S1, S2 และ C1 ในการทดสอบ เปรียบเทียบกับรูปแบบของแรง | 47 |
| รูปที่ 3.13 แสดงการพิจารณาค่าอัตราส่วนของความเครียดกับแรง | 48 |
| รูปที่ 3.14 ค่าอัตราส่วนของความเครียดกับแรงในช่วงการทดสอบ 350,000 รอบ | 49 |
| รูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนของความเครียดกับแรงในช่วงการทดสอบ 30,000 รอบ | 50 |

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับค่าความเครียดสูงสุดของ S1..... | 51 |
| รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับค่าความเครียดสูงสุดของ S2..... | 52 |
| รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงสูงสุดกับค่าความเครียดสูงสุดของ C1..... | 52 |
| รูปที่ 4.1 แบบมาตรฐานของสะพานของกรมทางหลวง..... | 55 |
| รูปที่ 4.2 แบบมาตรฐานของสะพานของกรมทางหลวง (ต่อ)..... | 56 |
| รูปที่ 4.3 ลักษณะสะพานข้ามคลองบางน้อย..... | 56 |
| รูปที่ 4.4 ลักษณะการก่อสร้างห้องทดสอบได้สะพานบางน้อย..... | 57 |
| รูปที่ 4.5 ห้องทดสอบที่ก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว..... | 58 |
| รูปที่ 4.6 ลักษณะรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ..... | 59 |
| รูปที่ 4.7 ขนาดของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ..... | 59 |
| รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน..... | 61 |
| รูปที่ 4.9 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพานที่ทำการทดสอบ..... | 61 |
| รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานเข้ากับแผ่นพื้นคอนกรีต..... | 62 |
| รูปที่ 4.11 แสดงแผนผังการทำงานของระบบเก็บข้อมูลความเครียด..... | 64 |
| รูปที่ 4.12 รูปกล่องบริจคอมพิวเตอร์..... | 64 |
| รูปที่ 4.13 แสดงแผนผังการทำงานของระบบวงจรบริจคอมพิวเตอร์..... | 65 |
| รูปที่ 4.14 รูปดาต้าลอคเกอร์..... | 65 |
| รูปที่ 4.15 แสดงแผนผังการทำงานของระบบตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ..... | 66 |
| รูปที่ 4.16 ลักษณะเซนเซอร์บอกตำแหน่ง..... | 67 |
| รูปที่ 4.17 ลักษณะการติดตั้งใช้เซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถเข้าและออก..... | 67 |
| รูปที่ 4.18 สัญญาณที่ตัวเซนเซอร์บอกตำแหน่งเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งก่อนเข้าช่วงสะพานทดสอบ..... | 68 |
| รูปที่ 4.19 ระบบเก็บข้อมูลทั้งหมดได้สะพาน..... | 69 |
| รูปที่ 4.20 แสดงแผนผังการทำงานของระบบถ่ายภาพจากกล้องวิดีโอ..... | 70 |
| รูปที่ 4.21 กล้องวิดีโอที่ติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กข้างสะพานสำหรับเก็บภาพขณะทดสอบ..... | 71 |
| รูปที่ 5.1 ลักษณะสะพานข้ามคลองบางน้อย..... | 72 |
| รูปที่ 5.2 ลักษณะสะพานข้ามคลองบางน้อย(ต่อ)..... | 73 |
| รูปที่ 5.3 แบบมาตรฐานของสะพานกรมทางหลวง..... | 73 |
| รูปที่ 5.4 แบบมาตรฐานของสะพานกรมทางหลวง(ต่อ)..... | 74 |
| รูปที่ 5.5 แบบมาตรฐานของสะพานกรมทางหลวง(ต่อ)..... | 75 |
| รูปที่ 5.6 ลักษณะการตัดแบ่งช่วงของสะพาน..... | 76 |
| รูปที่ 5.7 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่ 1 (ขอบทางเดินด้านซ้าย)..... | 77 |
| รูปที่ 5.8 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่2..... | 77 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.9 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่3 | 78 |
| รูปที่ 5.10 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่4 | 78 |
| รูปที่ 5.11 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่5 | 78 |
| รูปที่ 5.12 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่6 | 79 |
| รูปที่ 5.13 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่7 | 79 |
| รูปที่ 5.14 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่8 | 79 |
| รูปที่ 5.15 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่9 | 80 |
| รูปที่ 5.16 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่10 | 80 |
| รูปที่ 5.17 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่11 | 80 |
| รูปที่ 5.18 ค่าความเครียดของแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดในแผ่นพื้นคอนกรีตแผ่นที่12 (ขอบทางด้านขวา) | 81 |
| รูปที่ 5.19 ค่าความเครียดของแต่ละหน้าตัดที่เวลาเดียวกันกรณีรวิงช่องจรรยากรกลางของสะพาน | 82 |
| รูปที่ 5.20 ค่าความเครียดของแต่ละหน้าตัดที่เวลาเดียวกันกรณีรวิงช่องจรรยากรซ้ายของสะพาน | 83 |
| รูปที่ 5.21 แบบจำลองลักษณะการวิงของรถบรรทุกบนสะพานกรณีรวิงช่องจรรยากรกลางและซ้าย | 83 |
| รูปที่ 5.22 ตำแหน่งของแผ่นพื้นที่ติดอุปกรณ์วัดความเครียดใต้สะพานที่หน้าตัดของสะพาน | 85 |
| รูปที่ 5.23 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานกรณีรวิงกลาง | 87 |
| รูปที่ 5.24 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานกรณีรวิงกลาง | 88 |
| รูปที่ 5.25 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานกรณีรวิงกลาง | 88 |
| รูปที่ 6.1 ลักษณะรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ | 92 |
| รูปที่ 6.2 คุณสมบัติรถบรรทุกที่ใช้ในการทายน้ำหนัก | 93 |
| รูปที่ 6.3 ขั้นตอนการทดสอบขณะรถบรรทุกเริ่มวิงเข้าสะพาน | 94 |
| รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการทดสอบขณะรถบรรทุกวิงออกจากสะพาน | 94 |
| รูปที่ 6.5 กล้องวิดีโอที่ติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กข้างสะพานสำหรับเก็บภาพขณะทดสอบ | 95 |
| รูปที่ 6.6 ลักษณะของระบบที่ใช้สำหรับทำการทดสอบการนําน้ำหนัก | 95 |
| รูปที่ 6.7 ลักษณะของภาพรถบรรทุกที่ทำการทดสอบที่เก็บวัดได้จากกล้องวิดีโอ | 96 |
| รูปที่ 6.8 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 3 | 97 |
| รูปที่ 6.9 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 4 ถึงตัวที่ 6 | 97 |
| รูปที่ 6.10 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 7 ถึงตัวที่ 9 | 98 |
| รูปที่ 6.11 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 10 ถึงตัวที่ 12 | 98 |
| รูปที่ 6.12 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 13 ถึงตัวที่ 15 | 99 |
| รูปที่ 6.13 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 16 ถึงตัวที่ 18 | 99 |
| รูปที่ 6.14 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 19 ถึงตัวที่ 21 | 100 |
| รูปที่ 6.15 ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 22 ถึงตัวที่ 24 | 100 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| รูปที่ 6.16 | ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 25 ถึงตัวที่ 27 | 101 |
| รูปที่ 6.17 | ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 28 ถึงตัวที่ 30 | 101 |
| รูปที่ 6.18 | ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 31 ถึงตัวที่ 33 | 102 |
| รูปที่ 6.19 | ลักษณะของสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 34 ถึงตัวที่ 36 | 102 |
| รูปที่ 6.20 | ลักษณะของสัญญาณของเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งที่จุดเข้าออกของสะพาน | 103 |
| รูปที่ 6.21 | เปรียบเทียบสัญญาณความเครียดกับเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งที่ตำแหน่งก่อนเข้าสะพาน | 103 |
| รูปที่ 6.22 | ค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่หาได้จากการคำนวณ | 105 |
| รูปที่ 6.23 | ลักษณะแรงพลศาสตร์ของรถบรรทุกที่หาได้จากการคำนวณ | 106 |
| รูปที่ 6.24 | เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดที่หน้าตัด L/3 | 106 |
| รูปที่ 6.25 | เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดที่หน้าตัด L/2 | 107 |
| รูปที่ 6.26 | เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดที่หน้าตัด 2L/3 | 107 |
| รูปที่ 6.27 | อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดความขรุขระบนสะพาน | 109 |
| รูปที่ 6.28 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ค่าน้ำหนักรถต่างกันที่หน้าตัด L/3 กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 114 |
| รูปที่ 6.29 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ค่าน้ำหนักรถต่างกันที่หน้าตัด L/2 กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 114 |
| รูปที่ 6.30 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ค่าน้ำหนักรถต่างกันที่หน้าตัด 2L/3 กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 115 |
| รูปที่ 6.31 | เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม | 115 |
| รูปที่ 6.32 | เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลัง | 116 |
| รูปที่ 6.33 | เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำ | 116 |
| รูปที่ 6.34 | เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม | 117 |
| รูปที่ 6.35 | เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลัง | 117 |
| รูปที่ 6.36 | เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำ | 119 |
| รูปที่ 6.37 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ความเร็วรถต่างกันที่หน้าตัด L/3 กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 119 |
| รูปที่ 6.38 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ความเร็วรถต่างกันที่หน้าตัด L/2 กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 119 |
| รูปที่ 6.39 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ความเร็วรถต่างกันที่หน้าตัด 2L/3 กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง | 120 |
| รูปที่ 6.40 | เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่ระดับความเร็วต่างๆ | 120 |
| รูปที่ 6.41 | เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่ระดับความเร็วต่างๆ | 121 |
| รูปที่ 6.42 | เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำที่ระดับความเร็วต่างๆ | 121 |
| รูปที่ 6.43 | เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่ระดับความเร็วต่างๆ | 122 |
| รูปที่ 6.44 | เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่ระดับความเร็วต่างๆ | 122 |
| รูปที่ 6.45 | เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำที่ระดับความเร็วต่างๆ | 123 |
| รูปที่ 6.46 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ช่องจราจรต่างกันที่หน้าตัด L/3 | 124 |
| รูปที่ 6.47 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ช่องจราจรต่างกันที่หน้าตัด L/2 | 124 |
| รูปที่ 6.48 | เปรียบเทียบค่าความเครียดที่ช่องจราจรต่างกันที่หน้าตัด 2L/3 | 125 |

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 6.49 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่ช่องจราจรต่างกัน | 125 |
| รูปที่ 6.50 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรถบรรทุกที่ช่องจราจรต่างกัน | 126 |
| รูปที่ 6.51 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรถบรรทุกที่ช่องจราจรต่างกัน | 126 |
| รูปที่ 6.52 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่ช่องจราจรต่างกัน | 127 |
| รูปที่ 6.53 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรถบรรทุกที่ช่องจราจรต่างกัน | 127 |
| รูปที่ 6.54 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรถบรรทุกที่ช่องจราจรต่างกัน | 128 |
| รูปที่ 6.55 เปรียบเทียบค่าความเครียดที่มีผลของความขรุขระที่หน้าตัด L/3 | 129 |
| รูปที่ 6.56 เปรียบเทียบค่าความเครียดที่มีผลของความขรุขระที่หน้าตัด L/2 | 130 |
| รูปที่ 6.57 เปรียบเทียบค่าความเครียดที่มีผลของความขรุขระที่หน้าตัด 2L/3 | 130 |
| รูปที่ 6.58 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่มีผลของความขรุขระ แตกต่างกัน | 131 |
| รูปที่ 6.59 ค่าน้ำหนักเพลาหน้าที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักเพลาหน้าทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว วิ่งช่องจราจรกลาง | 132 |
| รูปที่ 6.60 ค่าน้ำหนักเพลาหน้าที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักเพลาหลังทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว วิ่งช่องจราจรกลาง | 132 |
| รูปที่ 6.61 ค่าน้ำหนักรวมที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักรวมทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว วิ่งช่องจราจรกลาง | 133 |
| รูปที่ 6.62 ค่าน้ำหนักเพลาหน้าที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักเพลาหน้าทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว วิ่งช่องจราจรซ้าย | 133 |
| รูปที่ 6.63 ค่าน้ำหนักเพลาหลังที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักเพลาหลังทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว วิ่งช่องจราจรซ้าย | 134 |
| รูปที่ 6.64 ค่าน้ำหนักรวมที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักรวมทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว วิ่งช่องจราจรซ้าย | 134 |
| รูปที่ 6.65 ค่าน้ำหนักรวมที่สามารถเทียบเท่ากับค่าน้ำหนักรวมทีวัดได้จริง กรณีเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียววิ่งช่องจราจรซ้ายคิดผลของแรงกระแทก | 135 |