

การหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาของยานพาหนะบนสะพาน
จากสัญญาณความเครียด

นาย นิคมเดช วีระจันทะชาติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4346-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF VELOCITY AND AXLE SPACINGS OF VEHICLES ON BRIDGES
FROM STRAIN SIGNALS



Mr. Nikomdej Weerachantachart

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 2003

ISBN 974-17-4346-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาของยานพาหนะบนสะพานจาก
สัญญาณความเครียด

โดย

นายนิคมเดช วีระฉันทะชาติ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

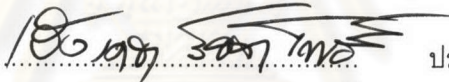
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

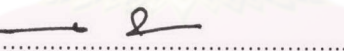
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



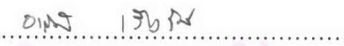
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เวียงเดชา รัชตโพธิ์)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อานันท์ เวียงรัมย์)

ศูนย์วิทยุโทรพัทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิคมเดช วีระฉันทะชาติ : การหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาของยานพาหนะบนสะพานจากสัญญาณความเครียด (DETERMINATION OF VELOCITY AND AXLE SPACINGS OF VEHICLES ON BRIDGES FROM STRAIN SIGNALS)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 140 หน้า, ISBN 974-17-4346-7

ระบบ Weigh-in-motion (WIM) เป็นระบบที่ใช้ในการหาน้ำหนักบรรทุกของยวดยานพาหนะขณะกำลังเคลื่อนที่บนถนนหรือสะพานโดยวัดการตอบสนองของส่วนโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งการประยุกต์ใช้ระบบดังกล่าวกับสะพานจะให้ค่าน้ำหนักที่ถูกต้องกว่ากับถนนเพราะผลของแรงกระแทกจากรถซึ่งกระทบต่อการประมาณน้ำหนักมีต่ำกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการในการหาน้ำหนักบรรทุกซึ่งเคลื่อนที่บนสะพานให้ความถูกต้องสูงนั้นจำเป็นต้องทราบค่าความเร็ว ระยะห่างระหว่างเพลลา และตำแหน่งของเพลลาในแต่ละช่วงเวลา ให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

ในทางปฏิบัติ อุปกรณ์ที่ใช้วัดผลตอบสนองของส่วนโครงสร้างสะพานนิยมใช้อุปกรณ์วัดความเครียด ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาช่วยในการหาระยะห่างระหว่างเพลลา และความเร็วรถด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการต่อพ่วงมาตรวัดความเครียดในวงจรถบรีดจ์เพื่อสร้างกราฟสัญญาณความเครียดที่สามารถระบุเวลาที่เพลลาอยู่บนหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดได้แม่นยำขึ้นทำให้สามารถนำไปใช้คำนวณหาความเร็วของรถและระยะห่างระหว่างเพลลาได้ถูกต้องขึ้นด้วย นอกจากนี้การต่อพ่วงมาตรวัดที่เสนอ ยังสามารถใช้ในการระบุจำนวนเพลลาของรถและช่องการวิ่งของรถได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอด้วยการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของสะพานและรถบรรทุก ในส่วนของสะพานจำลองนั้นเป็นสะพานเหล็กที่มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ 50 ซม. 200 ซม. และ 1 ซม. ตามลำดับ และในส่วนของรถบรรทุกจำลองเป็นรถบรรทุกชนิดสองเพลลา โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักเพลลาหน้าต่อเพลลาหลังเป็น 1.0 และ 0.33 โดยแต่ละอัตราส่วนมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 15 ซม. 20 ซม. 25 ซม. 30 ซม. 40 ซม. 50 ซม. 60 ซม. และ 70 ซม.

จากการทดสอบ พบว่าสัญญาณความเครียดที่ได้จากการต่อพ่วงมาตรวัดที่เสนอ สามารถระบุจำนวนเพลลาและช่องการวิ่งได้ถูกต้อง ส่วนในแง่ของความเร็วรถพบว่า มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อนำวิธีการที่นำเสนอไปเปรียบเทียบกับวิธีที่เสนอโดยนักวิจัยในอดีต พบว่าวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้ให้ความถูกต้องในการหาความเร็วและระยะห่างเพลลาดีกว่ามาก

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา..... 2546.....

ลายมือชื่อนิสิต..... นิคมเดช วีระฉันทะชาติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... .....

4470373021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS : WEIGH-IN-MOTION / VELOCITY / AXLE SPACING / STRAIN SIGNAL / VEHICLE / BRIDGE

NIKOMDEJ WEERACHANTACHART : DETERMINATION OF VELOCITY AND AXLE SPACINGS
OF VEHICLES ON BRIDGES FROM STRAIN SIGNALS

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. TOSPOL PINKAEW, 140pp, ISBN 974-17-4346-7

Weigh-In-Motion (WIM) is a system used for determining weights of vehicles moving on roads or bridges from their structural responses. Comparatively, the application of this system to bridges yields better accuracy due to less effect from impact on bridges than roads. However, to achieve accurate weight determination, the velocity, the axle spacing and the position of the vehicle have to be precisely identified.

In practice, bridge responses are measured by using strain gauges. Therefore, it is appropriate that the same gauges are used as the device for determining the velocity, the axle spacing and the position of the axles. In this research, an effective gauge configuration is proposed to provide more accurate time determination when the vehicle axles are on the monitored bridge sections. Consequently, accurate velocity and axle spacings of vehicles can be obtained. Moreover, the strain signals from the proposed gauge configuration can also be used to identify the number of vehicle' axles and the traffic lane being used.

The proposed method was verified by scaled-model tests. The bridge was modeled by a steel plate having width, length and thickness of 50, 200 and 1 cm, respectively. The vehicle was modeled by a two-axle moving load having a weight ratio of the front axle to the rear axle of 1 and 0.33 respectively. The axle spacings of the vehicle model were set to 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 and 70 cm.

The test results indicate that the bridge strains obtained from the proposed configuration of the gauges can correctly identify the lane of the vehicle and its number of axles. For the velocity and the axle spacing determination, errors of about ± 10 and ± 7 percent were observed respectively. These results are substantially better than those obtained from the method proposed by previous researchers.

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

Concentration..... CIVIL ENGINEERING.....

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

Student's signature *Nikomdej Weerachantachart*

Advisor's sinature *Tospol Pinkaew*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้
สละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้น
ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริงเดชา รัชตโพธิ์ และ
อาจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี ที่ได้กรุณาให้ความสนใจในการเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ท้ายที่สุด ประโยชน์อันพึงได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มี
พระคุณทุกท่าน รวมทั้งสมาชิกในครอบครัวซึ่งให้กำลังใจเสมอมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความนำ	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตการศึกษา	5
บทที่ 2 หลักการหาตำแหน่งการติดมาตรวัดความเครียดและกราฟสัญญาณความเครียด	
2.1 หลักการในการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลา	6
2.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถที่ผ่านสะพานบนโปรแกรม LUSAS	10
2.3 การสร้างกราฟสัญญาณความเครียดเพื่อใช้ในการหาความเร็วและ ระยะห่างระหว่างเพลลา	25
2.4 การต่อมาตรวัดความเครียดในวงจรบริดจ์ เพื่อใช้ในการหาความเร็วและ ระยะห่างระหว่างเพลลา	34
บทที่ 3 การทดสอบการหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยแบบจำลอง ย่อยส่วน	
3.1 แบบจำลองย่อยส่วนของสะพานชนิดแผ่นพื้นทางเดียว	39
3.2 ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ	43
3.3 การทดสอบทางสถิต	44
3.4 การทดสอบเพื่อหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาของน้ำหนักบรรทุก	50
3.5 การนำความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้ไปช่วยในการทำนายน้ำหนัก	77
บทที่ 4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผล	94
4.2 ข้อเสนอแนะอื่นๆ	95

สารบัญ (ต่อ)

๗

	หน้า
รายการอ้างอิง	96
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	98
ภาคผนวก ข ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลลา	119
ภาคผนวก ค ตารางแสดงความน่าจะเป็นในการเกิดความคลาดเคลื่อน	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	140



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ณ

หน้า

ตารางที่	3.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ของมาตรวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบ	40
ตารางที่	3.2	แสดงความเร็วที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 1	66
ตารางที่	3.3	แสดงความเร็วที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 1	67
ตารางที่	3.4	แสดงความเร็วที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 2	68
ตารางที่	3.5	แสดงความเร็วที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 2	69
ตารางที่	3.6	ระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 1	71
ตารางที่	3.7	ระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 1	72
ตารางที่	3.8	ระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 2	73
ตารางที่	3.9	ระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 2	74
ตารางที่	3.10	ผลการคำนวณความเร็วและระยะห่างเพลลาด้วยวิธีของ Dempsey และ Znidaric	75
ตารางที่	3.11	เปอร์เซ็นต์ในการระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนสูงที่สุดต่อความยาวสะพาน ภายในช่วง 0.500 ม. ถึง 1.500 ม.	83
ตารางที่	ข1	ความเร่งที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.1 และความเร่งเฉลี่ยแต่ละช่วงที่คำนวณได้จาก เซ็นต์เซอร์บอกตำแหน่ง สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 1	120
ตารางที่	ข2	ความเร่งที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.1 และความเร่งเฉลี่ยแต่ละช่วงที่คำนวณได้จาก เซ็นต์เซอร์บอกตำแหน่ง สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 1	121
ตารางที่	ข3	ความเร่งที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.1 และความเร่งเฉลี่ยแต่ละช่วงที่คำนวณได้จาก เซ็นต์เซอร์บอกตำแหน่ง สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 2	121
ตารางที่	ข4	ความเร่งที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.1 และความเร่งเฉลี่ยแต่ละช่วงที่คำนวณได้จาก เซ็นต์เซอร์บอกตำแหน่ง สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลนที่ 2	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ญ

หน้า

ตารางที่ ข5	ความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้จากหลักการในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไม่คงที่ สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลน	126
ตารางที่ ข6	ความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้จากหลักการในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไม่คงที่ สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลน	127
ตารางที่ ข7	ความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้จากหลักการในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไม่คงที่ สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 1 เคลื่อนที่ผ่านเลน 2	128
ตารางที่ ข8	ความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลาที่คำนวณได้จากหลักการในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร่งไม่คงที่ สำหรับอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุก 1 ต่อ 3 เคลื่อนที่ผ่านเลน 2	129

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

๗

	หน้า
รูปที่ 1.1 แพลนสะพานและผลตอบสนองของค่าความเครียดกับเวลา	4
รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของรถผ่านสะพาน	6
รูปที่ 2.2 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดไว้ที่หน้าตัด A และ B	7
รูปที่ 2.3 รายละเอียดของสัญญาณความเครียดเพื่อใช้ในการคำนวณความเร็วและระยะห่างเพลลา	7
รูปที่ 2.4 สัญญาณความเครียดที่ได้จากโปรแกรม LUSAS	10
รูปที่ 2.5 สัญญาณความเครียดที่ได้จากการทดลอง	10
รูปที่ 2.6 รูปแบบของสะพานจำลองที่มีที่รองรับแบบธรรมดา	11
รูปที่ 2.7 แพลนแสดงการติดมาตรวัดความเครียดบนสะพานจำลอง	12
รูปที่ 2.8 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/4$ ($x=0.5$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ	13
รูปที่ 2.9 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/4$ ($x=0.5$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ	14
รูปที่ 2.10 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/3$ ($x=2/3$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ	15
รูปที่ 2.11 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/3$ ($x=2/3$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ	16
รูปที่ 2.12 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/2$ ($x=1.0$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ	17
รูปที่ 2.13 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/2$ ($x=1.0$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ระยะ x ต่างๆ	18
รูปที่ 2.14 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/4$ ($x=0.5$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	19
รูปที่ 2.15 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/4$ ($x=0.5$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	20
รูปที่ 2.16 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/3$ ($x=2/3$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	21
รูปที่ 2.17 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/3$ ($x=2/3$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	22
รูปที่ 2.18 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/2$ ($x=1.0$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	23
รูปที่ 2.19 สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/2$ ($x=1.0$ ม.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	24
รูปที่ 2.20 สัญญาณความเครียดที่ต้องการเพื่อใช้ในการหาความเร็วและระยะห่างเพลลา	25

รูปที่ 2.21	สัญญาณความเครียดที่ได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางมากกว่า 0.50 ม.	26
รูปที่ 2.22	สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดเมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัด $x=0.50$ ม. และ $x=1.50$ ม.	26
รูปที่ 2.23	สัญญาณความเครียดที่ได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ห่างจากหน้าตัดที่ติดมาตรวัดความเครียดเป็นระยะทางน้อยกว่า 0.50 ม.	27
รูปที่ 2.24	สัญญาณความเครียดที่ได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่อยู่บนหน้าตัดที่ติดมาตรวัด	27
รูปที่ 2.25	สัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.19 มาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/4$ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	29
รูปที่ 2.26	สัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.20 มาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/3$ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	30
รูปที่ 2.27	สัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.21 มาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด $x=L/2$ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ระยะ y ต่างๆ	31
รูปที่ 2.28	แบบจำลองสะพานที่รับน้ำหนักบรรทุกแบบจุดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ	32
รูปที่ 2.29	การเปรียบเทียบสัญญาณความเครียดที่ได้จากสมการที่ 2.18 และจากมาตรวัดความเครียดตัวที่ถูกน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านพอดี ของหน้าตัด $x=L/2$	32
รูปที่ 2.30	วงจรวัดจี้ที่ใช้ในการต่อฟ่งมาตรวัดความเครียด	34
รูปที่ 2.31	ลักษณะการต่อตัวด้านทานแบบอนุกรม	35
รูปที่ 2.32	ลักษณะการต่อตัวด้านทานแบบขนาน	36
รูปที่ 2.33	วงจรรการต่อมาตรวัดความเครียดเพื่อสร้างกราฟสัญญาณความเครียดที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างระหว่างเพลลา	38
รูปที่ 3.1	แปลนขนาดและลักษณะของที่รองรับของแบบจำลองย่อส่วนของสะพาน	39
รูปที่ 3.2	แบบจำลองย่อส่วนของสะพานที่ใช้ในการทดสอบ	40
รูปที่ 3.3	มาตรวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบ	40
รูปที่ 3.4	แปลนการติดมาตรวัดความเครียดของแบบจำลองย่อส่วนของสะพาน	41
รูปที่ 3.5	อุปกรณ์วัดจี้บริบูรณ์	41
รูปที่ 3.6	รายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูล	42
รูปที่ 3.7	เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดความเร็ว	42
รูปที่ 3.8	แถบกระดาษขาวดำที่ใช้ควบคู่กับตัวเซ็นเซอร์ในการวัดความเร็ว	42
รูปที่ 3.9	ลักษณะสัญญาณที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านแถบกระดาษขาวดำ	43
รูปที่ 3.10	น้ำหนักบรรทุกแบบจุดชนิดล้อเดี่ยว	43
รูปที่ 3.11	น้ำหนักบรรทุกชนิดเพลลาคู่อัตราส่วน 1 ต่อ 1	44
รูปที่ 3.12	น้ำหนักบรรทุกชนิดเพลลาคู่อัตราส่วน 1 ต่อ 3	44

รูปที่ 3.30	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 1 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 1) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	55
รูปที่ 3.31	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด L/2 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 3 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 1) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	56
รูปที่ 3.32	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 3 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 1) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	56
รูปที่ 3.33	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด L/2 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 1 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 2) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	57
รูปที่ 3.34	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 1 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 2) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	57
รูปที่ 3.35	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด L/2 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 3 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 2) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	58
รูปที่ 3.36	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 ต่อ 3 และมีระยะห่างระหว่างเพลลาเป็น 25 ซม. (เลขที่ 2) (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	58
รูปที่ 3.37	สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด L/2	59
รูปที่ 3.38	สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3	59
รูปที่ 3.39	สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด L/2 (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	60
รูปที่ 3.40	สัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3 (ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการ moving average)	60
รูปที่ 3.41	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด L/2	61
รูปที่ 3.42	ผลรวมสัญญาณความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดบนหน้าตัด 2L/3	62
รูปที่ 3.43	ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์บอกตำแหน่ง	64
รูปที่ 3.44	แสดงช่วงข้อมูลที่มีข้อมูลตัวที่ 5181 เป็นจุดกึ่งกลาง	64
รูปที่ 3.45	แสดงแถบขาวดำที่เซ็นเซอร์เคลื่อนที่ผ่านในช่วงเวลาที่สนใจ	65
รูปที่ 3.46	รายละเอียดในการหาตำแหน่งของเพลลาที่เคลื่อนที่อยู่บนสะพาน	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ณ

หน้า

รูปที่ 3.63	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ความเร็วกับเวลา และความเร่งกับเวลา ของรถคันที่ 21 ถึง คันที่ 25	89
รูปที่ 3.64	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ความเร็วกับเวลา และความเร่งกับเวลา ของรถคันที่ 26 ถึง คันที่ 30	90
รูปที่ 3.65	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ความเร็วกับเวลา และความเร่งกับเวลา ของรถคันที่ 31 ถึง คันที่ 35	91
รูปที่ 3.66	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ความเร็วกับเวลา และความเร่งกับเวลา ของรถคันที่ 36 ถึง คันที่ 40	92
รูปที่ ก1	สัญลักษณ์และทิศทางของมุมหมุนของเส้นตรงที่ตั้งฉากกับระนาบกึ่งกลาง และความชันของระนาบของโครงสร้างแผ่น	98
รูปที่ ก2	ชิ้นส่วนของโครงสร้างแผ่นที่มี 4 ชั้น และหน้าตัดของโครงสร้างแผ่นที่เกิดการเสียรูปร่าง โดยสมมติว่าเส้นตรงในทิศทางของความหนายังคงเป็นเส้นตรง	99
รูปที่ ก3	ความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างแผ่น และ โมเมนต์และแรงเฉือนที่สอดคล้องกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้น	100
รูปที่ ก4	ชิ้นส่วนของโครงสร้างเปลือก	107
รูปที่ ก5	ทิศทางของเวกเตอร์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเปลือก	108
รูปที่ ก6	วงจรวีทสโตน บริดจ์	113
รูปที่ ก7	การติดตามวัดความเครียดในวงจรวีทสโตน บริดจ์ ในลักษณะต่างๆ	115
รูปที่ ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาขณะที่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพาน	119
รูปที่ ข2	สัญญาณความเครียดที่ยังคงมีผลของสัญญาณรบกวนและผลทางพลศาสตร์(รูปซ้าย) และสัญญาณความเครียดที่ผ่านการทำ moving average (รูปขวา)	131
รูปที่ ข3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาเมื่อน้ำหนักเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่	133
รูปที่ ข4	การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนเมื่อเพลาน้ำอยู่บนหน้าตัด L/2	133
รูปที่ ข5	การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนเมื่อเพลาลงอยู่บนหน้าตัด L/2	134
รูปที่ ข6	การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนเมื่อเพลาน้ำอยู่บนหน้าตัด 2L/3	135
รูปที่ ข7	การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนเมื่อเพลาลงอยู่บนหน้าตัด 2L/3	135