


การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน



นาย พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

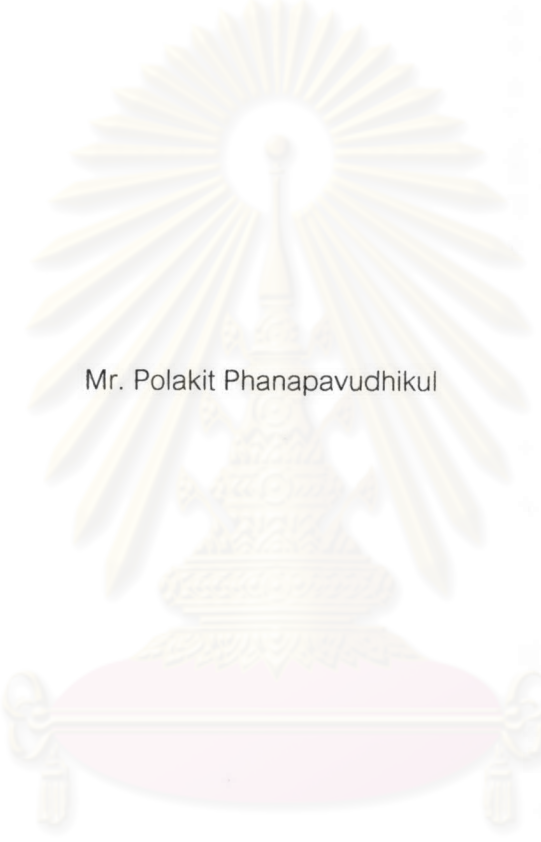
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9796-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I2083228x

WEIGHT IDENTIFICATION FOR MOVING TRUCKS ON BRIDGES



Mr. Polakit Phanapavudhikul

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 2002

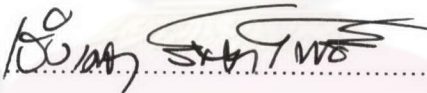
ISBN 974-17-9796-6

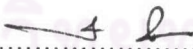
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน
โดย นาย พลกฤษณ์ พนาปวุฒิมิกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

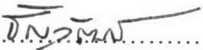
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจิงเดชา รัชตโพธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิ์ศิริ)

พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล : การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน (WEIGHT IDENTIFICATION FOR MOVING TRUCKS ON BRIDGES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 116 หน้า, ISBN 974-17-9796-6

การศึกษานี้เป็นการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน โดยใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน ความเร็วและจำนวนเพลของรถบรรทุก เป็นข้อมูลในการหาน้ำหนักรถ ในการศึกษาได้สังเคราะห์สัญญาณความเครียดจากแบบจำลองปฏิริยาตอบสนองของระหว่างสะพานกับรถบรรทุก โดยแบบจำลองดังกล่าวรวมผลของความขรุขระของผิวบนสะพานเข้าไปด้วย และจากการวิเคราะห์เชิงโหมดจะสามารถหาสัญญาณความเครียดที่ตำแหน่งใดๆบนสะพานได้ หลังจากนั้นนำข้อมูลสัญญาณความเครียด ณ ตำแหน่งที่กำหนดมาใช้หาน้ำหนักรถ โดยอาศัยวิธีการไดนามิคโปรแกรมมิ่ง ซึ่งในกรณีนี้แบ่งออกเป็น การหาน้ำหนักรถโดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพานและการหาน้ำหนักรถโดยพิจารณาผลการบิดของสะพาน การหาน้ำหนักรถโดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพานนั้นทำการวิเคราะห์โดยใช้ชิ้นส่วนคาน โดยศึกษาว่าความเร็วรถ ความขรุขระของผิวบนสะพาน น้ำหนักรวมของรถ อัตราส่วนของน้ำหนักเพลหน้าต่อน้ำหนักรวมของรถ และสภาวะเริ่มต้นของรถก่อนที่จะเข้าสะพานว่ามีผลต่อการหาน้ำหนักรถมากน้อยเพียงใด ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรถอันเนื่องมาจากผลต่างๆดังกล่าวนี้ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างวิธีการไดนามิคโปรแกรมมิ่งกับวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด ส่วนการหาน้ำหนักรถโดยพิจารณาผลการบิดของสะพานนั้นวิเคราะห์โดยใช้ชิ้นส่วนแผ่น และศึกษาเฉพาะผลของความเร็วรถ ความขรุขระของผิวบนสะพานและการบิดของสะพานเท่านั้น

จากผลการศึกษาทั้งกรณีที่ไม่พิจารณาและไม่พิจารณาผลการบิดของสะพานพบว่าสิ่งที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรถมากที่สุดคือ ความเร็วรถและความขรุขระของผิวบนสะพาน และวิธีการไดนามิคโปรแกรมมิ่งสามารถนำมาใช้น้ำหนักรถได้ดีกว่าวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด ในส่วนสุดท้ายของการวิจัยได้ทำการสุ่มตัวอย่างรถ 100 คัน ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วทำการหาน้ำหนักรถ 100 คันดังกล่าวด้วยวิธีการไดนามิคโปรแกรมมิ่ง ทั้งในกรณีที่ไม่พิจารณาและไม่พิจารณาผลการบิดของสะพานพบว่าได้ผลเช่นเดียวกัน คือ ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรถจะมีค่ามากเมื่อรถมีความเร็วสูง และวิ่งอยู่บนสะพานที่ผิวทางมีความขรุขระมาก นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีที่ไม่พิจารณาผลการบิดของสะพานนั้นจะใช้เวลาในการคำนวณเพื่อหาน้ำหนักรถนานกว่ากรณีที่ไม่พิจารณาผลการบิดของสะพานอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักของรถ 100 คัน เมื่อไม่มีการบิดของสะพาน จะมีค่าน้อยกว่า 5% แต่เมื่อพิจารณาผลการบิดของสะพาน พบค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง 10% จำนวน 97 คัน และอยู่ในช่วง 10% ถึง 15% จำนวน 3 คัน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

4370408321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : WEIGH IN MOTION / WEIGHT IDENTIFICATION

POLAKIT PHANAPAVUDHIKUL : WEIGHT IDENTIFICATION FOR MOVING TRUCKS ON BRIDGES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TOSPOL PINKAEW, 116 pp. ISBN 974-17-9796-16.

This research study identifies the weights of moving trucks on bridges. Bridge strain signals, truck speed, and the number of axles are required as the input information. The bridge strain signals are generated from a truck-bridge interaction model taking into account the roughness of the bridge surface. By applying modal analysis procedure, strain signals at any prescribed positions on the bridge can be computed. The strain signals are then employed for truck weight identification using dynamic programming. Two cases of weight identification considering the bridge response with and without torsion were studied. For the case without bridge torsion, the identification was performed using beam elements. The effects of truck speed, surface roughness, truck weight, ratio of front axle weight to overall truck weight and truck initial vibration on the accuracy of weight identification were investigated. The identified weights from dynamic programming technique are compared with those from the conventional least squares technique. For the case with bridge torsion, the identification was performed using plate elements, considering only the effects of truck speed, surface roughness and degree of torsion.

The results obtained from both cases reveal that the accuracy of weight identification greatly depends on truck speed and surface roughness. It was also found that the dynamic programming technique is more effective than the least squares technique. In the last part of this research, 100 different trucks were randomly generated using a computer program. Their weights were then identified by the dynamic programming technique. It is observed from both cases that the accuracy of weight identification decreases as the truck speed and magnitude of surface roughness increases. In addition, the identification case with bridge torsion require a significantly longer computational time. However, the accuracy of weight identification for the 100 trucks was found to be less than 5% for the case without bridge torsion. By contrast, the accuracy of the same number of trucks for the case with bridge torsion was found to be within 10% for 97 trucks and between 10% to 15% for the remaining 3 trucks.

Department Civil Engineering
Field of study Civil Engineering
Academic year 2002

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างยิ่งจากท่านเหล่านี้ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากที่สุด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เรืองเดชา รัชตโพธิ์ ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นประธานของคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ อาจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ ที่ได้ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากบุคคลท่านต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่น้อง และ เพื่อนๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งได้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยในการศึกษาดังแต่เด็กจนถึงปัจจุบัน และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์ทางการศึกษาอยู่บ้าง ผู้วิจัยขออุทิศให้แก่ คุณปู่ คุณย่า คุณตา คุณยาย คุณลุง คุณป้า และเพื่อนของผู้วิจัยผู้ล่วงลับ

พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	5
1.5 วิธีการดำเนินการศึกษา	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 การสร้างแบบจำลองเพื่อสร้างสัญญาณความเครียด	7
2.1 การจำลองรูปแบบสะพาน	7
2.1.1 การสร้างสมการการกระจัดของสะพาน	7
2.2 การจำลองรูปแบบของรถบรรทุก	11
2.2.1 การสร้างสมการการกระจัดของรถบรรทุก	11
2.3 การจำลองรูปแบบปฏิริยาตอบสนองซึ่งกันและกัน ระหว่างสะพานกับรถบรรทุก	15
2.3.1 การสร้างสมการการกระจัดของปฏิริยาตอบสนอง ซึ่งกันและกันระหว่างสะพานกับรถบรรทุก	16
2.4 การหาความเครียดจากแบบจำลอง	23
3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการสร้างความเครียด	25
3.1 การตรวจสอบการโก่งตัวของสะพาน	27
3.1.1 การตรวจสอบทางสถิติ	27
3.1.2 การตรวจสอบทางพลศาสตร์	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2.1 พิจารณาผลการโก่งตัวของสะพานเนื่องมาจาก ความขรุขระของผิวบนสะพาน	29
3.1.2.2 พิจารณาผลการโก่งตัวของสะพานเนื่องมาจาก แนวการเคลื่อนที่ของรถ	31
3.1.2.3 พิจารณาการโก่งตัวของสะพานเนื่องมาจาก ความเร็วของรถ	32
3.2 การตรวจสอบสัญญาณความเครียด	32
3.3 การตรวจสอบการสั่นไหวของรถ	36
4 การนำน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่	37
4.1 การจำลองรูปแบบคาน	38
4.2 การหาเมตริกซ์ความหน่วง (damping matrix) ของระบบ	41
4.3 การหาแรงที่ชั่วจากแรงภายนอกที่มากระทำ	43
4.4 การสร้างสมการการเคลื่อนที่	44
4.5 วิธีการหาเมตริกซ์กำลัง F	45
4.6 การวิเคราะห์ปัญหา	46
4.7 การวัดความเครียด	47
4.8 ไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic Programming)	47
4.9 ขั้นตอนการหาแรง f	49
5 การหาแรงที่กระทำเป็นจุด	50
5.1 การสร้างสัญญาณความเครียดจากแรงที่กระทำเป็นจุด	50
5.2 การหาแรงโดยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่ง	53
5.3 การหาแรงโดยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด	55
5.4 การเปรียบเทียบแรงที่หาได้โดยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่งและ วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด	58
5.4.1 การเปรียบเทียบกับแรงจริงทางสถิติ	58
5.4.2 การเปรียบเทียบกับแรงจริงทางพลศาสตร์	59
6 การนำน้ำหนักที่วิ่งอยู่บนสะพานโดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	61
6.1 การสร้างสัญญาณความเครียดจากรถที่วิ่งอยู่บนสะพาน โดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1.1	พิจารณาผลของความเร็วกว่าระดับของความขรุขระ ของผิวทาง	61
6.1.2	พิจารณาผลของอัตราส่วนของน้ำหนักเพลาน้ำต่อ น้ำหนักรวมของรถ	62
6.1.3	พิจารณาผลของสภาวะเริ่มต้นของรถก่อนที่จะเข้าสะพาน	62
6.2	การหาน้ำหนักรถโดยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง	67
6.3	การหาน้ำหนักรถโดยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด	73
6.4	การเปรียบเทียบน้ำหนักรวมของรถที่หาได้โดย วิธีไดนามิคโปรแกรมมิงและวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด	76
6.4.1	พิจารณาผลของความเร็วกว่าระดับของความขรุขระ ของผิวทาง	76
6.4.1.1	การเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมจริงทางสถิติ	76
6.4.1.2	การเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมจริงทางพลศาสตร์	80
6.4.2	พิจารณาผลของน้ำหนักรวมและสัดส่วนระหว่าง น้ำหนักล้อหน้าต่อน้ำหนักรวม	81
6.4.2.1	การเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมจริงทางสถิติ	81
6.4.2.2	การเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมจริงทางพลศาสตร์	82
6.4.3	พิจารณาผลของสภาวะเริ่มต้นของตำแหน่งรถด้านหน้า กับตำแหน่งรถด้านหลัง	83
6.4.3.1	การเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมทางสถิติ	83
6.4.3.2	การเปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมจริงทางพลศาสตร์	85
6.5	ผลของความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างเพลามีต่อ การหาน้ำหนักรถด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง	85
7	การหาน้ำหนักรถโดยพิจารณาผลการบิดของสะพาน	87
7.1	การจำลองรูปแบบสะพานเป็นแบบแผ่น	87
7.2	การสร้างสัญญาณความเครียดจากรถที่วิ่งอยู่บนสะพาน	90
7.2.1	พิจารณาผลของการบิดกับระดับของความขรุขระของผิวทาง	91
7.2.2	พิจารณาผลของการบิดกับความเร็วของรถ	92
7.3	การหาน้ำหนักรถโดยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.4 การเปรียบเทียบน้ำหนักรวมของรถที่หาได้กับน้ำหนักรวมจริงทางสถิติ	97
7.4.1 การเปรียบเทียบเมื่อพิจารณาผลของการบิดกับ	
ระดับของความขรุขระของผิวทาง	97
7.4.2 การเปรียบเทียบเมื่อพิจารณาผลของการบิดกับ	
ความเร็วของรถ	103
8 การหาน้ำหนักจากการสูดตัวอย่างรถ	105
8.1 การสร้างสัญญาณความเครียดจากรถ 100 คันที่วิ่งอยู่บนสะพาน	
โดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	105
8.2 การหาน้ำหนักรถ 100 คันโดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	108
8.3 การสร้างสัญญาณความเครียดจากรถ 100 คันที่วิ่งอยู่บนสะพาน	
โดยพิจารณาผลการบิดของสะพาน	109
8.4 การหาน้ำหนักรถ 100 คันโดยพิจารณาผลการบิดของสะพาน	110
9 สรุปผลการศึกษา	112
รายการอ้างอิง	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 8.1 คุณสมบัติต่างๆ ของรถคันที่ 1-50	106
ตารางที่ 8.2 คุณสมบัติต่างๆ ของรถคันที่ 51-100	107
ตารางที่ 8.3 ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรถสูงสุด 5 อันดับแรก กรณีที่ไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	109
ตารางที่ 8.4 ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรถสูงสุด 5 อันดับแรก กรณีที่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	111



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองสะพาน 3 มิติ	7
รูปที่ 2.2 รูปแบบโหมดพื้นฐานของสะพานที่ใช้ในการศึกษา	9
รูปที่ 2.3 รูปแบบจำลองของรถบรรทุก	12
รูปที่ 2.4 รูปแบบจำลองระหว่างสะพานกับรถบรรทุก	16
รูปที่ 2.5 แสดงความเค้นที่หน้าตัดใด ๆ ของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก	24
รูปที่ 3.1 รูปด้านข้างและฝั่งของสะพานข้ามทางแยกรัชโยธิน	25
รูปที่ 3.2 รูปตัดของส่วน C1, C2 และ ED	26
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งแนวแกนสะพานของส่วน C1 และ C2	27
รูปที่ 3.4 แบบจำลองของคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา	28
รูปที่ 3.5 การเข้ามาบนสะพานของล้อหน้าและล้อหลังในแต่ละช่วง.....	28
รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน ณ เวลาใดๆ ระหว่างแบบจำลองกับสมการ (3.1).....	29
รูปที่ 3.7 หน้าข้างความขรุขระของผิวถนนบนสะพานในแบบต่างๆ	30
รูปที่ 3.8 การสั่นไหวของสะพานที่จุดกึ่งกลาง ณ เวลาใดๆ เนื่องจาก ความขรุขระแบบต่างๆ.....	30
รูปที่ 3.9 การโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของคาน G1 และคาน G4 ณ เวลาใดๆ เมื่อรถวิ่งอยู่ในแนวกลางของสะพานด้วยความเร็ว 5 เมตร/วินาที บนผิวทางที่มีความขรุขระแบบรูป 3.7(ข)	31
รูปที่ 3.10 การสั่นไหวที่จุดกึ่งกลางของคาน G1 และคาน G4 ณ เวลาใดๆ เมื่อรถวิ่งอยู่ในเลนนอกของสะพานด้วยความเร็ว 5 เมตร/วินาที บนผิวทางที่มีความขรุขระแบบรูป 3.7(ข)	32
รูปที่ 3.11 การโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของคาน G1 และคาน G4 ณ เวลาใดๆ เมื่อรถวิ่งอยู่ในเลนนอกของสะพานบนผิวทางที่มีความขรุขระ แบบรูป 3.7(ข) ด้วยความเร็วรถต่างๆกัน.....	33
รูปที่ 3.12 ความเครียดที่จุดกึ่งกลางของคาน G1 และคาน G4 ณ เวลาใดๆ เมื่อรถวิ่งอยู่ในแนวกลางของสะพานด้วยความเร็ว 5 เมตร/วินาที บนผิวทางที่มีความขรุขระแบบรูป 3.7(ข).....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 ความเครียดที่จุดกึ่งกลางของคาน G1 และคาน G4 ณ เวลาใดๆ เมื่อรถวิ่งอยู่ในเลนนอกของสะพานด้วยความเร็ว 5 เมตร/วินาที บนผิวทางที่มีความขรุขระแบบรูป 3.7(ข)	34
รูปที่ 3.14 ความเครียดที่จุดกึ่งกลางของคาน G1 และคาน G4 ณ เวลาใดๆ เมื่อรถวิ่งอยู่ในเลนนอกของสะพานบนผิวทางที่มีความขรุขระ แบบรูป 3.7(ข) ที่ความเร็วรถต่างๆกัน.....	35
รูปที่ 3.15 แสดงการกระจายตัวของรถที่ด้านหน้าและด้านหลังเปรียบเทียบกับ หน้าข้างความขรุขระเมื่อกำหนดให้ค่าสถิติเฟนสและค่า ความหน่วงของระบบเพลลาของรถมีค่าสูงมาก	36
รูปที่ 4.1 แบบจำลองคานของออยเลอร์-เบอร์นูลี	38
รูปที่ 4.2 แบบจำลองชิ้นส่วนของคาน	38
รูปที่ 4.3 แรงที่ชั่วเนื่องจากแรงภายนอกที่มากกระทำ	43
รูปที่ 5.1 แรงกระทำเป็นจุด 1 จุดวิ่งอยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา ด้วยความเร็วคงที่	50
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของสัญญาณความเครียดที่ระยะ $L/2$ และ $L/4$ ของ สะพาน	51
รูปที่ 5.3 สัญญาณความเครียดเนื่องจากแรง $f(t)$ ที่ความเร็วและค่า DAF ต่างๆ กัน	52
รูปที่ 5.4 แรงที่หาได้โดยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแรงจริง ที่ความเร็วและค่า DAF ต่างๆ กัน	54
รูปที่ 5.5 แรง 1×10^4 นิวตัน วิ่งอยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาด้วย ความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที	55
รูปที่ 5.6 สัญญาณความเครียดที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $L/4$ เนื่องจาก แรง 1×10^4 นิวตัน วิ่งอยู่บนคานที่มีจุดรองรับเป็นแบบธรรมดา ด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที	55
รูปที่ 5.7 แรงที่หาได้โดยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงจริง ที่ความเร็วและค่า DAF ต่างๆ กัน	57
รูปที่ 5.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงรวมทางสถิติโดยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่ง และวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดที่ความเร็วและค่า DAF ต่างๆกัน.....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.9 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงรวมทางพลศาสตร์โดยวิธีไดนามิค โปรแกรมมิงและวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดที่ความเร็วและค่า <i>DAF</i> ต่าง ๆ กัน	60
รูปที่ 6.1 การสร้างความเครียดเมื่อพิจารณาผลของความเร็วรถกับระดับของ ความขรุขระของผิวทาง	62
รูปที่ 6.2 การสร้างความเครียดเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนของน้ำหนักเพลลา หน้าต่อน้ำหนักรวมของรถ	62
รูปที่ 6.3 การสร้างความเครียดเมื่อพิจารณาผลของสภาวะเริ่มต้นของรถก่อนที่ จะเข้าสะพาน	63
รูปที่ 6.4 ตำแหน่งจุดวัดความเครียดที่ใช้เป็นข้อมูลในการหาน้ำหนักรถเมื่อ ไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	63
รูปที่ 6.5 สัญญาณความเครียดเนื่องจากรถบรรทุกทุกน้ำหนัก 21 ตัน ที่ความเร็ว และระดับของความขรุขระของผิวทางที่ค่าต่างๆ	64
รูปที่ 6.6 สัญญาณความเครียดเนื่องจากน้ำหนักรวมของรถและอัตราส่วนของ น้ำหนักเพลลาหน้าต่อน้ำหนักรวมของรถมีค่าต่างๆกัน โดยมีความเร็ว 20 เมตร/วินาที และระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม.	65
รูปที่ 6.7 สัญญาณความเครียดเนื่องจากรถบรรทุกทุกน้ำหนัก 21 ตัน ความเร็ว 20 เมตร/วินาที และระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. โดยมี สภาวะเริ่มต้นของรถก่อนที่จะเข้าสะพานในแบบต่างๆกัน	66
รูปที่ 6.8 การหาน้ำหนักโดยใช้ α ค่าต่างๆ	69
รูปที่ 6.9 น้ำหนักพลศาสตร์ของรถบรรทุกทุกน้ำหนัก 21 ตัน ที่ความเร็วและระดับของ ความขรุขระของผิวทางที่ค่าต่างๆ	70
รูปที่ 6.10 น้ำหนักพลศาสตร์ของรถเนื่องจากน้ำหนักรวมของรถและอัตราส่วนของ น้ำหนักเพลลาหน้าต่อน้ำหนักรวมของรถมีค่าต่างๆกัน โดยความเร็ว 20 เมตร/วินาที และระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม.	71
รูปที่ 6.11 น้ำหนักพลศาสตร์ของรถบรรทุกทุกน้ำหนัก 21 ตัน ความเร็ว 20 เมตร/วินาที และระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. โดยมีสภาวะเริ่มต้นของรถ ก่อนที่จะเข้าสะพานในแบบต่างๆกัน	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.12 แรง P_1 ซึ่งแทนเพลาน้ำเคลื่อนที่ไปบนคานด้วยความเร็วคงที่	
0.1 เมตรต่อวินาที	73
รูปที่ 6.13 สัญญาณความเครียดเนื่องจากแรง P_1	73
รูปที่ 6.14 แรง P_2 ซึ่งแทนเพลาลังเคลื่อนที่ไปบนคานด้วยความเร็วคงที่	
0.1 เมตรต่อวินาที	74
รูปที่ 6.15 สัญญาณความเครียดเนื่องจากแรง P_2	74
รูปที่ 6.16 สัญญาณความเครียดที่ได้จากการซูปเปอร์โพสิชันระหว่างแรง P_1 และแรง P_2	75
รูปที่ 6.17 น้ำหนักพลศาสตร์ของรถบรรทุกน้ำหนัก 21 ตัน ที่ความเร็วและ ระดับของความขรุขระของผิวทางที่ค่าต่างๆ	77
รูปที่ 6.18 น้ำหนักพลศาสตร์ของรถเนื่องจากน้ำหนักรวมของรถและอัตราส่วน ของน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักรวมของรถมีค่าต่างๆกัน โดยความเร็ว 20 เมตร/วินาที และระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม.	78
รูปที่ 6.19 น้ำหนักพลศาสตร์ของรถบรรทุกน้ำหนัก 21 ตัน ความเร็ว 20 เมตร/วินาที และระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. โดยมีสภาวะเริ่มต้นของ รถก่อนที่จะเข้าสะพานในแบบต่างๆกัน	79
รูปที่ 6.20 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิตโดยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง และวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดที่ความเร็วและระดับของความขรุขระต่างๆกัน	80
รูปที่ 6.21 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางพลศาสตร์โดยวิธีไดนามิค โปรแกรมมิงและวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดที่ความเร็วและระดับของ ความขรุขระต่างๆกัน	82
รูปที่ 6.22 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิตโดยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง และวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งมีน้ำหนักรวมและสัดส่วนของน้ำหนักเพล น้ำต่อน้ำหนักรวมต่างๆกัน	83
รูปที่ 6.23 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางพลศาสตร์โดยวิธีไดนามิค โปรแกรมมิงและวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งมีน้ำหนักรวมและสัดส่วน ของน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักรวมต่างๆกัน	84

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.24 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติโดยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิง และวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ที่สภาวะเริ่มต้นของตำแหน่งด้านหน้าและ ด้านหลังของรถมีค่าต่างๆกัน	84
รูปที่ 6.25 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางพลศาสตร์โดยวิธีไดนามิก โปรแกรมมิงและวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ที่สภาวะเริ่มต้นของตำแหน่ง ด้านหน้าและด้านหลังของรถมีค่าต่างๆกัน	85
รูปที่ 6.26 ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติโดยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิง ที่ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างเพลามีค่าต่างๆกัน	86
รูปที่ 7.1 ชิ้นส่วน Bilinear quadrilateral (Q4)	88
รูปที่ 7.2 แบบจำลองชิ้นส่วนของสะพานเป็นแผ่น	88
รูปที่ 7.3 แรงที่ชั่วเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ	89
รูปที่ 7.4 การสร้างความเครียดเมื่อพิจารณาผลของการบิดกับระดับของความขรุขระ ของผิวทาง	91
รูปที่ 7.5 ผังแสดงตำแหน่งที่ใช้หาค่า ϵ_y และ ϵ	91
รูปที่ 7.6 การสร้างความเครียดเมื่อพิจารณาผลของการบิดกับความเร็วของรถ	92
รูปที่ 7.7 ตำแหน่งจุดวัดความเครียดที่นำมาใช้เป็นข้อมูลในการหาน้ำหนักรถเมื่อ พิจารณาผลการบิดของสะพาน	92
รูปที่ 7.8 สัญญาณความเครียดที่ตำแหน่ง 2,5 และ 8 เนื่องจากความเร็ว 20 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	93
รูปที่ 7.9 สัญญาณความเครียดที่ตำแหน่ง 1,4 และ 7 เนื่องจากความเร็ว 20 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	94
รูปที่ 7.10 สัญญาณความเครียดที่ตำแหน่ง 3,6 และ 9 เนื่องจากความเร็ว 20 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	95
รูปที่ 7.11 น้ำหนักรวมทางพลศาสตร์ เนื่องจากรถหนัก 21 ตัน ความเร็ว 20 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม.	

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.12 น้ำหนักรวมทางพลศาสตร์ เนื่องจากรถหนัก 21 ตัน ความเร็ว 20 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 0.5 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	99
รูปที่ 7.13 น้ำหนักรวมทางพลศาสตร์ เนื่องจากรถหนัก 21 ตัน ความเร็ว 20 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.5 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	100
รูปที่ 7.14 น้ำหนักรวมทางพลศาสตร์ เนื่องจากรถหนัก 21 ตัน ความเร็ว 10 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	101
รูปที่ 7.15 น้ำหนักรวมทางพลศาสตร์ เนื่องจากรถหนัก 21 ตัน ความเร็ว 30 เมตร/วินาที ระดับของความขรุขระของผิวทาง 1.0 ซ.ม. และเปอร์เซ็นต์การบิดของสะพานที่ค่าต่างๆกัน	102
รูปที่ 7.16 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิตที่ความเร็ว 20 เมตร/วินาที	103
รูปที่ 7.17 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิตที่ระดับของความขรุขระเท่ากับ 1 ซ.ม.	104
รูปที่ 8.1 การหาน้ำหนักรถ 100 คัน โดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	105
รูปที่ 8.2 น้ำหนักของรถ 100 คันที่หาได้จากวิธีไดนามิคโปรแกรมมิงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักจริงโดยไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน	108
รูปที่ 8.3 การหาน้ำหนักรถ 100 คัน โดยพิจารณาผลการบิดของสะพาน	109
รูปที่ 8.4 น้ำหนักของรถ 100 คันที่หาได้จากวิธีไดนามิคโปรแกรมมิงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักจริงโดยพิจารณาผลการบิดของสะพาน	110