

การหาน้ำหนักรถจากโมเมนต์ตัดของสะพานโดยปราศจากการตรวจจับเพลลา



นาย ปาลพิพัฒน์ แสงชูวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

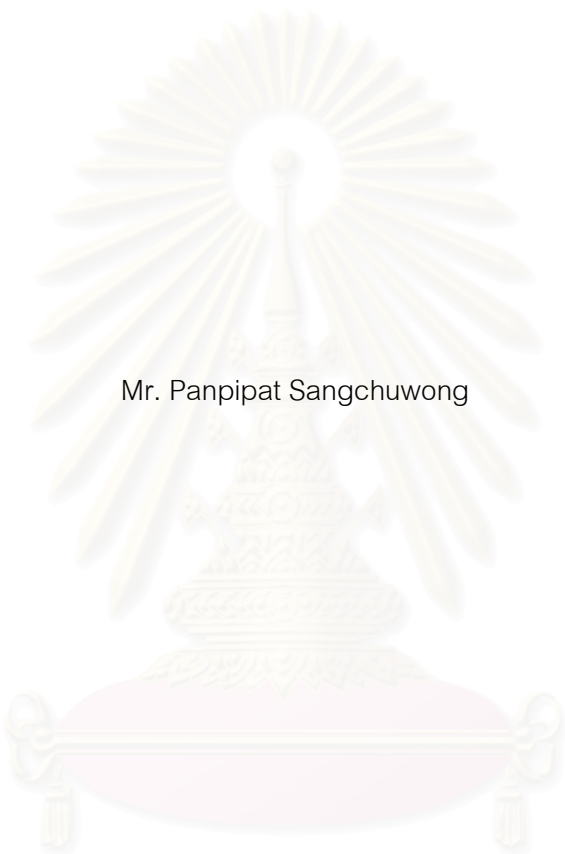
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF VEHICLE WEIGHT FROM BRIDGE BENDING MOMENT WITHOUT AXLE
DETECTION



Mr. Panpipat Sangchuwong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

ปาลทิพัฒน์ แสงชูวงศ์ : การหาน้ำหนักรถจากโมเมนต์ดัดของสะพานโดยปราศจากการตรวจนับเพลลา
(DETERMINATION OF VEHICLE WEIGHT FROM BRIDGE BENDING MOMENT WITHOUT
AXLE DETECTION) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 148 หน้า

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน (bridge weigh in motion, B-WIM) แบบปราศจากข้อมูลระยะห่างเพลลาและความเร็วของรถ โดยระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบ B-WIM นั้นสามารถทำการติดตั้งได้ง่ายโดยไม่กระทบต่อการจราจรบนสะพาน อีกทั้งในการหาน้ำหนักก็ไม่จำเป็นต้องจอดหรือชะลอความเร็วเหมือนในด้านซึ่งปกติ แต่เนื่องจากระบบที่มีการใช้งานอยู่เป็นระบบที่ต้องใช้เครื่องตรวจนับเพลลาในการหาข้อมูลตำแหน่งรถ และความเร็ว เพื่อที่จะนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการหาน้ำหนักรถ ซึ่งจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจนับเพลลา (axle detector) บนผิวสะพาน ซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้งานจริง เพราะนอกจากต้องขอมบ้ำรุงอุปกรณ์เป็นประจำแล้ว ยังทำให้ผู้ขับขี่เกิดความรำลึกรำคาญ อีกทั้งรถที่บรรทุกน้ำหนักเกินที่กีดกฏหมายก็จะทราบ และหลบหลีกเส้นทางได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการหาน้ำหนักรถโดยปราศจากอุปกรณ์การตรวจนับเพลลา โดยจะใช้เพียงข้อมูลความเครียดของสะพานขณะที่มีรถบรรทุกแล่นผ่าน ซึ่งถูกติดตั้งไว้ก่อนแล้วบริเวณใต้ท้องสะพาน มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างเพลลา ค่าความเร็วรถ และค่าน้ำหนักเพลลาโดยตรง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอการหาค่าตัวแปรต่างๆ ของรถบรรทุกผ่านวิธีการหาค่าต่ำที่สุด (minimization) ของผลต่างกำลังสองระหว่าง ค่าโมเมนต์ดัดของสะพานที่ตรวจวัดจริง กับค่าโมเมนต์ที่คำนวณขึ้นจากฟังก์ชันของเส้นอิทธิพล (influence line)

จากการศึกษาโดยอาศัยแบบจำลองสมมติในคอมพิวเตอร์ (computer simulation) เพื่อจำลองสถานการณ์ต่างๆ ของการเคลื่อนที่ผ่านของรถ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการหาน้ำหนักรถจากโมเมนต์ดัดของสะพานโดยปราศจากข้อมูลระยะห่างเพลลา และความเร็วรถที่นำเสนอ นั้น มีความเป็นไปได้ โดยมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักถึง 98% และมีความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักรวมของรถไม่เกิน $\pm 15\%$ สำหรับกรณีที่สะพานไม่มีความขรุขระ แต่หากสะพานมีความขรุขระจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้นตามระดับความขรุขระของพื้นผิวสะพาน โดยในบางกรณีอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ถึง 30-40%

ถัดมาจึงทำการศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากข้อมูลผลการทดสอบภาคสนามในอดีต โดยประยุกต์ใช้วิธีการหาน้ำหนักแบบปราศจากข้อมูลระยะห่างเพลลา และความเร็วรถที่นำเสนอ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการหาน้ำหนักที่ใช้สามารถหาน้ำหนักได้ทั้งหมด และได้ความถูกต้องของน้ำหนักรวม , ระยะห่างเพลลา และความเร็วของรถบรรทุกอยู่ในช่วง $\pm 15\%$ $\pm 20\%$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่ได้รับในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา..... 2550.....

ลายมือชื่อนิสิต ปาลทิพัฒน์ แสงชูวงศ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ทศพล ปิ่นแก้ว

4970436421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TRUCK WEIGHT / WEIGHT IDENTIFICATION / FREE OF AXLE DETECTOR / COMPUTER SIMULATION

PANPIPAT SANGCHUWONG : DETERMINATION OF VEHICLE WEIGHT FROM BRIDGE BENDING MOMENT WITHOUT AXLE DETECTION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, D.Eng., 148 pp.

This research studies the feasibility and efficiency of weight determination of vehicles moving on bridges (bridge weigh-in-motion, B-WIM) without information of axle spacing and speed of the vehicles. In general, the B-WIM system is very attractive, since it can be easily installed without traffic disturbance and, unlike the conventional weight station, its weighing method can be conducted under normal speed of vehicles. However, the existing system requires axle detectors installed on the bridge surface to obtain the vehicle position and its speed. This makes the system become impractical because the detector device needs regular maintenance. Moreover, the drivers might notice and might avoid the instrumented route.

This study proposes the vehicle weight identification technique without the use of axle detector. Bridge bending moment measured during the vehicle crossing is solely used to identify the axle spacing, vehicle speed and axle weights. The proposed identification technique is based on the minimization of the square errors (least-square) between the measured bending moments and the corresponding reconstructed moments calculated from influence line function.

Based on computer simulation of various traffic situations, it is found that the proposed technique can identify vehicle weight from bridge bending moment without axle spacing and moving speed of vehicle. The success rate of the technique is up to 98% and the errors of vehicle gross weight identification are observed to be within $\pm 15\%$ for the cases of smooth bridge surface. However, it is found that these errors tend to increase to 30-40% for the cases of rough bridge surface.

The weight identification from the actual field test data is also studied employing the proposed identification technique. Based on previous field test data, it is found that the technique can provide reasonable results in all considered cases and the identification errors of gross weight, truck axle spacing and truck speed are within $\pm 15\%$, $\pm 20\%$ and $\pm 10\%$, respectively. These obtained results indicate the possibility and the effectiveness of the proposed technique that would be very attractive toward the real application.

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

Student's signature *Panpipat*.....

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

Advisor's signature *Tospol Pinkaew*.....

Academic year.....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และครูบาอาจารย์ที่อบรม สั่งสอน ให้การอุปถัมภ์จนกระผมได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงานเติบโตใหญ่จนถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้วิชาพื้นฐานภาคทฤษฎีก่อนทำงานวิจัย หากปราศจากการให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการศึกษาและการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ โดยอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ปราศจากความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยรองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ ธิไชย และความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้โดย รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับความอนุเคราะห์ทุนวิจัย 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานสำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและหน่วยงานบัณฑิตภาควิศวกรรมโยธา คุณ วรธนา ช้างเกิด อธิการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ช่วยประสานงานด้านระเบียบการจบการศึกษา คุณ สุจรรยา จินดาวงศ์ บรรณารักษ์ห้องสมุดภาควิศวกรรมโยธา และหน่วยงานบรรณารักษ์ประจำห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการสืบค้นข้อมูลในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท และปริญญาเอก รหัสปีการศึกษา 49 และรุ่นพี่รุ่นน้อง สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกคนที่ร่วมศึกษาเล่าเรียนด้วยกันมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณธีระชัย ดีสมสุข , คุณพัทธพงษ์ อาสนจินดา , คุณวิษณุวัตร อารยโกศล รุ่นพี่นิสิตที่อยู่ในความดูแลของ รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว ที่ได้ให้คำแนะนำความช่วยเหลือต่างๆ ในการศึกษาตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งคุณสรียา หินทอง ที่ได้ให้คำแนะนำในการเขียนบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้ที่สนใจศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
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
1.2.1 งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบใช้อุปกรณ์ ตรวจจับเพลลา	2
1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบปราศจาก อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา	7
1.3 วัตถุประสงค์	11
1.4 ขอบเขตการวิจัย	11
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	11
1.6 การดำเนินงานวิจัย	12
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 ระบบปฏิบัติการตอบสนองทางพลศาสตร์ระหว่างสะพาน กับรถบรรทุก	13
2.1.1 วิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ในการจำลองโครงสร้าง	13
2.1.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของสะพาน	14
2.1.3 การปรับปรุงสติฟเนสเมทริกซ์สำหรับสะพานแบบต่อเนื่อง	20
2.1.4 แบบจำลองและการสร้างสมการการกระจัดของรถบรรทุก	23
2.1.5 ความขรุขระของสะพาน	28
2.1.6 แบบจำลอง และการสร้างสมการการกระจัดของปฏิบัติการตอบสนองระหว่างสะพานกับ รถบรรทุก	29
2.2 ผลตอบสนองของสะพานในรูปของความเครียด และโมเมนต์ดัด	33
2.3 การคำนวณน้ำหนักรถบรรทุก การหาความเร็วรถ และการหาระยะห่างระหว่างเพลลา	34
2.3.1 การหาน้ำหนักสถิติของรถบรรทุกด้วยวิธีการเส้นอิทธิพล (influence line method) ...	34
2.3.2 วิธีการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถที่เสนอใช้ใน งานวิจัยนี้ (proposed method)	38

บทที่	หน้า
2.3.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization)	41
2.3.3.1 หลักการทั่วไป	41
2.3.3.2 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธีนิวตัน (Newton's method)	41
2.3.3.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธีกึ่งนิวตัน (quasi Newton's method)	42
2.3.3.4 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธี BFGS	43
3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในคอมพิวเตอร์	45
3.1 การตรวจสอบผลตอบสนองของสะพานจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ กับผลเฉลยของสมการคณิตศาสตร์	47
3.2 การตรวจสอบปฏิกิริยาควบคู่ระหว่างแบบจำลองสะพานกับแบบจำลองรถบรรทุก	51
4 ประสิทธิภาพการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก กรณีศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์	54
4.1 การคำนวณหาน้ำหนักของรถบรรทุก	58
4.2 ผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ	60
4.2.1 ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ	61
4.2.2 พฤติกรรมของผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ	63
4.2.2.1 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับความเร็วอัตราส่วนระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก	63
4.2.2.2 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับอัตราส่วนน้ำหนักเพลลาหน้าต่อน้ำหนักเพลลาหลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก	69
4.3 ผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ	73
4.3.1 ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ	77
4.3.2 พฤติกรรมของผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ	78
4.3.2.1 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับความเร็วอัตราส่วนระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก	78
4.3.2.2 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับอัตราส่วนน้ำหนักเพลลาหน้าต่อน้ำหนักเพลลาหลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก	84
4.4 สรุปผลการทดลองการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก กรณีศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์	91
5 ประสิทธิภาพการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก กรณีศึกษาจากผลการทดสอบภาคสนาม	94
5.1 การเตรียมการทดสอบภาคสนาม	94
5.1.1 สะพานทดสอบ	94
5.1.2 รถบรรทุกทดสอบ	96
5.1.3 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ	97
5.1.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด	97

บทที่	หน้า
5.1.3.2 การเตรียมระบบรวบรวมข้อมูล	99
5.1.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ	100
5.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองสะพาน	103
5.3 ขั้นตอนการทดสอบภาคสนาม	106
5.4 การคำนวณหาน้ำหนักรถ และผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลการทดสอบภาคสนาม	106
5.4.1 การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM)	106
5.4.2 การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (free of axle detector หรือ FAD B-WIM)	113
5.4.3 สรุปผลการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก	127
6 การประยุกต์ใช้งานในภาคสนาม	129
6.1 การทดสอบภาคสนาม	129
6.1.1 วิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุก และข้อมูลการทดสอบภาคสนามที่นำมาใช้ในการหาน้ำหนัก	131
6.2 ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากข้อมูลการใช้งานจริง	131
6.2.1 ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักรถบรรทุก	133
6.2.2 ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุก	135
6.3 สรุปผลการทดลอง	139
7 สรุปผลการศึกษา	141
7.1 ความเป็นไปได้ของการหาน้ำหนักรถแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถ	141
7.2 ประสิทธิภาพและผลของปัจจัยต่างๆ	141
7.2.1 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อความแม่นยำในการหาน้ำหนักรถบรรทุก	141
7.2.2 ผลของความขรุขระต่อความแม่นยำในการหาน้ำหนัก	142
7.2.3 ความสัมพันธ์ผล ความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง	143
7.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	144
7.3.1 ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้จริง	144
7.3.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม	144
รายการอ้างอิง	145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	148

สารบัญตาราง

ญ

		หน้า
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของสะพาน	46
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติของรถบรรทุก	46
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบผลตอบสนองของสะพาน	50
ตารางที่ 4.1	ค่าน้ำหนักเพลาหน้า และน้ำหนักเพลาหลังของรถบรรทุกที่พิจารณาในการศึกษาด้วย แบบจำลองคอมพิวเตอร์	54
ตารางที่ 4.2	ค่าความเร็ว และระยะห่างเพลาของรถบรรทุกที่พิจารณาในการศึกษาด้วยแบบจำลอง คอมพิวเตอร์	55
ตารางที่ 4.3	คุณสมบัติของสะพาน	56
ตารางที่ 4.4	คุณสมบัติของรถบรรทุก	57
ตารางที่ 4.5	ค่าพารามิเตอร์ในกรณีที่ได้คำตอบไม่ถูกต้อง	63
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ในกรณีที่ได้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสูงสุด 3 กรณีแรก	88
ตารางที่ 5.1	คุณสมบัติของสะพานข้ามคลองบางน้อย	96
ตารางที่ 5.2	ค่าเปรียบเทียบของแบบจำลองสะพาน	104
ตารางที่ 5.3	คุณสมบัติรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ	106
ตารางที่ 5.4	ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM) กรณีรถวิ่งกลางสะพาน	108
ตารางที่ 5.5	ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM) กรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน	109
ตารางที่ 5.6	ผลการหาความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่ง รถ (FAD B-WIM) กรณีรถวิ่งกลางสะพาน	118
ตารางที่ 5.7	ผลการหาความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่ง รถ (FAD B-WIM) กรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน	119
ตารางที่ 5.8	ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM) กรณี รถวิ่งกลางสะพาน	120
ตารางที่ 5.9	ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM) กรณี รถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน	121
ตารางที่ 6.1	คุณสมบัติของสะพานข้ามคลองบางน้อย	129

สารบัญญภาพ

๗

	หน้า
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา	8
รูปที่ 1.2 สะพาน Pont de Normandie	8
รูปที่ 1.3 วิธีการหาความเร็วจากหลักการ FAD	9
รูปที่ 1.4 การระบุจำนวนเพลลาจากค่าความเครียดที่วัดได้ รถบรรทุกในกราฟนี้เป็นรถบรรทุก 5 เพลลา	9
รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนคาน 4 องศาเสรี	14
รูปที่ 2.2 แรงกระทำที่ขั้วเนื่องจากแรงกระทำภายนอก	18
รูปที่ 2.3 ระบบรถบรรทุก-สะพานของสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง	20
รูปที่ 2.4 แบบจำลองคานสำหรับสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง	21
รูปที่ 2.5 ชิ้นส่วนคานที่มีจุดรองรับข้างหนึ่งเป็นข้อหมุนสปริง	21
รูปที่ 2.6 รูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองสะพาน (แสดงเฉพาะสะพานช่วงที่ 1)	22
รูปที่ 2.7 ระบบรถบรรทุก-สะพานของสะพานต่อเนื่อง n ช่วง	23
รูปที่ 2.8 แผนภาพอิสระของระบบรถบรรทุก-สะพาน	25
รูปที่ 2.9 จุดวัดในชิ้นส่วนคาน	33
รูปที่ 2.10 การวัดค่าโมเมนต์ดัดของสะพานจากน้ำหนักรถบรรทุกจริง	34
รูปที่ 2.11 การคำนวณค่าโมเมนต์ดัดของสะพานจากน้ำหนักรถจำลอง ความเร็ว และระยะห่าง ระหว่างเพลลา	35
รูปที่ 2.12 เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่จุดวัดตำแหน่งกึ่งกลางสะพานช่วงที่ 2	36
รูปที่ 2.13 แผนผังการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการวนรอบ	40
รูปที่ 3.1 แบบมาตรฐานของสะพานในส่วนของ (ก) หน้าตัด (ข) แพลน (ค) ตอม่อ และ (ง) ขอบทาง ตามลำดับ	46
รูปที่ 3.2 คานช่วงเดี่ยวรับแรงกระทำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่	47
รูปที่ 3.3 โมเมนต์ดัดจากผลเฉลย, $m_{exact}(t)$ (เส้นประสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัด จริง, $m_{gen}(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/2$	51
รูปที่ 3.4 แรงที่ล้อรถบรรทุก คำนวณจากแบบจำลองควบคู่, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการ คำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุก, $P_{rv}(t)$ (เส้นประสีม่วง)	52
รูปที่ 3.5 แรงที่ล้อรถบรรทุก คำนวณจากแบบจำลองควบคู่, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการ คำนวณจากแบบจำลองสะพาน, $P_{tb}(t)$ (เส้นประสีส้ม)	53
รูปที่ 3.6 แรงที่ล้อรถบรรทุก คำนวณจากแบบจำลองควบคู่, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการ คำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุก, $P_{rv}(t)$ (เส้นประสีม่วง) และการคำนวณจากแบบจำลอง สะพาน, $P_{tb}(t)$ (เส้นประสีส้ม)	53
รูปที่ 4.1ก ตัวอย่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ($L/2$)	55

รูปที่ 4.1ข ตัวอย่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของจุดศูนย์กลางมวลของรถบรรทุก, $y_v(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของเพลาหน้า, $y_1(t)$ (เส้นสีแดง) และการเคลื่อนที่ของเพลาหลัง, $y_2(t)$ (เส้นสีม่วง)	56
รูปที่ 4.2 รูปร่างของสะพาน และรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (ก) รูปร่างของรถบรรทุก (ข) ตำแหน่งล้อ และระยะเพลา (ค) แบบจำลองสะพาน และรถบรรทุกที่จำลองมาจากสะพาน และรถบรรทุกจริง	57
รูปที่ 4.3 แผนผังการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการวนรอบ	59
รูปที่ 4.4ก โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.25L	60
รูปที่ 4.4ข โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.5L	60
รูปที่ 4.4ค โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.75L	60
รูปที่ 4.4ง น้ำหนักเพลาหน้าที่คำนวณได้, $\hat{N}_f(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาหน้าจริง, $P_f(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)	61
รูปที่ 4.4จ น้ำหนักเพลาหลังที่คำนวณได้, $\hat{N}_r(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาหลังจริง, $P_r(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)	61
รูปที่ 4.4ฉ น้ำหนักรวมที่คำนวณได้, $\hat{N}_t(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำรวมจริง, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)	61
รูปที่ 4.5 ผลการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 3 วิธี	62
รูปที่ 4.6ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	64
รูปที่ 4.6ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาที่คำนวณได้ (\hat{S}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	64
รูปที่ 4.6ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหน้าที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	65
รูปที่ 4.6ง ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	65
รูปที่ 4.6จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	66

รูปที่ 4.8ค	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับอัตราส่วน น้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ ...	71
รูปที่ 4.8ง	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับอัตราส่วน น้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ ...	71
รูปที่ 4.8จ	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนัก เพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	72
รูปที่ 4.9ก	แรงกระทำที่ล่อน้ำกรณที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $P_f(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรง กระทำที่ล่อน้ำกรณที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{P}_f(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน)	73
รูปที่ 4.9ข	แรงกระทำที่ล่อน้ำกรณที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $P_r(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรง กระทำที่ล่อน้ำกรณที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{P}_r(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน)	73
รูปที่ 4.9ค	แรงกระทำที่ล่อรวมกรณที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรง กระทำที่ล่อรวมกรณที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{P}_t(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน)	73
รูปที่ 4.10ก	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงกรณที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบ กับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงกรณที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{m}_1(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.25L	74
รูปที่ 4.10ข	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงกรณที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบ กับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงกรณที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{m}_2(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.5L	74
รูปที่ 4.10ค	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงกรณที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบ กับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงกรณที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{m}_3(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.75L	74
รูปที่ 4.11ก	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง , $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.25L	75
รูปที่ 4.11ข	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง , $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.5L	75
รูปที่ 4.11ค	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง , $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.75L	75
รูปที่ 4.11ง	น้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้, $\hat{N}_f(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาน้ำจริง, $P_f(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)	76

รูปที่ 4.11จ	น้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้, $\hat{N}_r(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาลังจริง, $P_r(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)	76
รูปที่ 4.11ฉ	น้ำหนักรวมที่คำนวณได้, $\hat{N}_t(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำรวมจริง, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)	76
รูปที่ 4.12	ผลการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 3 วิธี	77
รูปที่ 4.13ก	ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	78
รูปที่ 4.13ข	ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{S}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	79
รูปที่ 4.13ค	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	79
รูปที่ 4.13ง	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	80
รูปที่ 4.13จ	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	80
รูปที่ 4.14ก	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาลังหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาลังหลัง (N_r) 10 ตัน	81
รูปที่ 4.14ข	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาลังหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาลังหลัง (N_r) 25 ตัน	82
รูปที่ 4.14ค	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาลังหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาลังหลัง (N_r) 40 ตัน	82
รูปที่ 4.14ง	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาลังหน้า (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลังหลัง (N_r) 10 ตัน	82

รูปที่ 4.14จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักรวมหน้า (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน	83
รูปที่ 4.14ข ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักรวมหน้า (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 40 ตัน	83
รูปที่ 4.14ข ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักรวมหน้า (N_f) 10 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน	83
รูปที่ 4.14ข ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักรวมหน้า (N_f) 10 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 40 ตัน	84
รูปที่ 4.15ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักรวมหน้าต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	85
รูปที่ 4.15ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาจริงที่คำนวณได้ (\hat{S}) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักรวมหน้าต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	85
รูปที่ 4.15ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมหน้าที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักรวมหน้าต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	86
รูปที่ 4.15ง ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมหลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักรวมหน้าต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	86
รูปที่ 4.15จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักรวมหน้าต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ	87
รูปที่ 4.16 เปรียบผลตอบสนองที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) กับผลตอบสนองจริง (เส้นสีน้ำเงิน) ของกรณีศึกษาที่ 921 (ก) โมเมนต์ตัดที่ระยะ 0.25L (ข) โมเมนต์ตัดที่ระยะ 0.5L (ค) โมเมนต์ตัดที่ระยะ 0.75L (ง) แรงที่ล้อหน้า (จ) แรงที่ล้อหลัง (ฉ) แรงที่ล้อรวมของรถบรรทุก	88
รูปที่ 4.17 เปรียบผลตอบสนองที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) กับผลตอบสนองจริง (เส้นสีน้ำเงิน) ของกรณีศึกษาที่ 1128 (ก) โมเมนต์ตัดที่ระยะ 0.25L (ข) โมเมนต์ตัดที่ระยะ 0.5L (ค) โมเมนต์ตัดที่ระยะ 0.75L (ง) แรงที่ล้อหน้า (จ) แรงที่ล้อหลัง (ฉ) แรงที่ล้อรวมของรถบรรทุก	89

รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบผลตอบสนองที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) กับผลตอบสนองจริง (เส้นสีน้ำเงิน) ของกรณีศึกษาที่ 1105 (ก) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.25L (ข) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.5L (ค) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.75L (ง) แรงที่ล้อหน้า (จ) แรงที่ล้อหลัง (ฉ) แรงที่ล้อรวมของรถบรรทุก	90
รูปที่ 4.19	การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้กรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ	91
รูปที่ 4.20	การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้กรณีพื้นผิวสะพานขรุขระ	92
รูปที่ 5.1	แบบสะพานมาตรฐานของกรมทางหลวงในส่วนของ (ก) หน้าตัด (ข) แพลน (ค) ตอม่อ และ (ง) ขอบทาง ตามลำดับ	95
รูปที่ 5.2	สะพานข้ามคลองบางน้อยที่ใช้ในการทดสอบ	95
รูปที่ 5.3	ลักษณะรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ	96
รูปที่ 5.4	ขนาดของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ	97
รูปที่ 5.5	การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพานที่ทำการทดสอบ	97
รูปที่ 5.6	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน	98
รูปที่ 5.7	ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 3	98
รูปที่ 5.8	แผนผังแสดงการทำงานของระบบเก็บข้อมูลความเครียด	99
รูปที่ 5.9	กล่องปริจคอมพลีทชั่น	100
รูปที่ 5.10	ดาต้าลอคเกอร์	100
รูปที่ 5.11	เซนเซอร์บอกตำแหน่งรถบรรทุก 1. ลักษณะทั่วไป 2. ตัวรับสัญญาณ 3. ตัวส่งสัญญาณ	100
รูปที่ 5.12	แผนผังแสดงการทำงานของระบบตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ	101
รูปที่ 5.13	การติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถเข้าและออก	102
รูปที่ 5.14	เปรียบเทียบสัญญาณความเครียด กับสัญญาณจากเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งที่ตำแหน่งเข้าและออกจากสะพาน	102
รูปที่ 5.15	ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพาน กรณีวิ่งกลางสะพาน	104
รูปที่ 5.16	ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพาน กรณีวิ่งกลางสะพาน	105
รูปที่ 5.17	ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง 2 L/3 ของสะพาน กรณีวิ่งกลางสะพาน	105
รูปที่ 5.18ก	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ L/3	107
รูปที่ 5.18ข	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ L/2	107
รูปที่ 5.18ค	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 2L/3	107
รูปที่ 5.19	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง	110
รูปที่ 5.20	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลงที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง	110

รูปที่ 5.37	โมเมนต์ดัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และ โมเมนต์ดัดแบบผสม (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด $L/3$	126
รูปที่ 5.38	โมเมนต์ดัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และ โมเมนต์ดัดแบบผสม (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด $L/2$	126
รูปที่ 5.39	โมเมนต์ดัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และ โมเมนต์ดัดแบบผสม (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด $2L/3$	127
รูปที่ 6.1	สะพานข้ามคลองบางน้อยที่ใช้ในการทดสอบ	129
รูปที่ 6.2	ระบบรวบรวมข้อมูล และการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ใต้ท้องสะพาน	130
รูปที่ 6.3	การติดตั้งเซ็นเซอร์รับกดตำแหน่งรถบรรทุก	130
รูปที่ 6.4	ตัวอย่างสัญญาณความเครียด กับสัญญาณจากเซ็นเซอร์รับกดตำแหน่งที่ตำแหน่งรถเข้า และออกจากสะพาน	131
รูปที่ 6.5ก	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/3$	131
รูปที่ 6.5ข	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/2$	132
รูปที่ 6.5ค	โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $2L/3$	132
รูปที่ 6.5จ	น้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้, \hat{N}_f (เส้นสีแดง)	132
รูปที่ 6.5ฉ	น้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้, \hat{N}_r (เส้นสีแดง)	132
รูปที่ 6.5ช	น้ำหนักรวมที่คำนวณได้, \hat{N}_t (เส้นสีแดง)	133
รูปที่ 6.6ก	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ไม่สมบูรณ์กรณีที่ 32, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 40, $m_1(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $L/3$	133
รูปที่ 6.6ข	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ไม่สมบูรณ์กรณีที่ 32, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 40, $m_2(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $L/2$	133
รูปที่ 6.6ค	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ไม่สมบูรณ์กรณีที่ 32, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 40, $m_3(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $2L/3$	134
รูปที่ 6.7ก	สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ค่าสูงสุดไม่ชัดเจนกรณีที่ 16, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 56, $m_1(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $L/3$	134

รูปที่ 6.7ข สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ค่าสูงสุดไม่ชัดเจนกรณีที่ 16, $m_2(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ กับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 56, $m_2(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $L/2$	134
รูปที่ 6.7ค สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ค่าสูงสุดไม่ชัดเจนกรณีที่ 16, $m_3(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ กับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 56, $m_3(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $2L/3$	135
รูปที่ 6.8ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่าง เพลลาจริง	136
รูปที่ 6.8ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วน ระยะห่างเพลลาจริง	136
รูปที่ 6.9ก การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้	137
รูปที่ 6.9ข การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้	137
รูปที่ 6.10ก น้ำหนักเพลลาหน้าที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริง	138
รูปที่ 6.10ข น้ำหนักเพลลาหลังที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริง	138
รูปที่ 6.10ค น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลลา จริง	139

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในการวิเคราะห์ และ ออกแบบโครงสร้างข้อมูลน้ำหนักบรรทุก และ การกระจายน้ำหนักเป็นข้อมูลที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของน้ำหนักบรรทุก และ ความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนเส้นทางคมนาคม (ถนนและสะพาน) นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวยังมีความจำเป็นอย่างมาก ในการวางแผนบำรุงรักษาถนนและสะพานให้มีประสิทธิภาพ รวมทั้งการบังคับใช้กฎหมายเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก ด้วยเหตุผลดังกล่าว น้ำหนักบรรทุกที่มีความถูกต้องจึงมีความสำคัญต่อการ วิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้าง การวางแผนบำรุงรักษา และการวางแผนด้านนโยบายการขนส่ง และการจราจร เพื่อที่จะได้มาถึงข้อมูลดังกล่าว นั้น ระบบ weigh-in-motion (WIM) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

ระบบ weigh-in-motion หรือ WIM คือระบบของอุปกรณ์ที่ใช้หาข้อมูลต่าง ๆ เช่น น้ำหนักเพลา, ระยะห่างระหว่างเพลา และจำนวนเพลาของยานพาหนะ ขณะที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือสะพาน ซึ่งโดยปกติยานพาหนะดังกล่าว มักจะเป็นรถที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุก หรือรถพ่วง เพราะน้ำหนักของรถกลุ่มดังกล่าวจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างถนน และสะพาน

ในต่างประเทศได้มีการนำระบบ WIM มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบ WIM สามารถติดตั้งได้ทั้งกับผิวทาง (ถนน) หรือ สะพาน ในกรณีที่ใช้กับผิวทาง อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คอนกรีตหน้าตัดรูปกล่องสี่เหลี่ยม (culvert) ซึ่งจะวางอยู่ใต้ถนนโดยที่ภายใน culvert นี้จะมีมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ติดตั้งอยู่ การใช้แผ่นโลหะติดตั้งอยู่บนผิวถนนโดยที่แผ่นโลหะดังกล่าวจะถูกรองรับด้วยตัวเซลล์น้ำหนัก (load cell) การใช้มาตรวัดความเครียดแนวตั้ง (vertical strain transducer) ฝังไว้ใต้ผิวทาง หรือการใช้พีโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ฝังไว้ที่ผิวทาง แต่เนื่องจากระบบนี้ มีข้อเสียคือ มีความคลาดเคลื่อนสูง และเมื่อต้องการที่จะซ่อมบำรุง จะต้องทำการลอกผิวทางออก อีกทั้งอาจต้องทำการปิดเส้นทางจราจรระหว่างดำเนินการติดตั้งระบบ

ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงเป็นระบบที่ใช้กับสะพาน ซึ่งจะเป็นการนำตัวเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น มาตรวัดความเครียด (strain gauge) เครื่องตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) ไปติดตั้งไว้ที่คาน (girder) ใต้สะพาน ข้อมูลที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ดังกล่าวสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักของรถที่วิ่งผ่านบนถนนหรือสะพานได้ แม้โดยทั่วไปแล้วระบบที่ติดตั้งกับสะพาน จะให้ค่าน้ำหนักที่แม่นยำกว่าระบบที่ติดตั้งกับผิวทาง แต่ระบบนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ ในการตรวจวัดน้ำหนักจำเป็นต้องไม่มีรถคันอื่นอยู่บนสะพานในขณะที่ทำการตรวจวัดน้ำหนัก อีกทั้งยังต้องอาศัยพารามิเตอร์ของหน้าตัดสะพาน ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักรถ แต่เนื่องด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งสะพาน และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาค่าน้ำหนักรถ

นอกจากนั้นระบบยังต้องการข้อมูลความเร็วของรถบรรทุก และระยะเพลา เพื่อที่จะนำไปคำนวณค่าน้ำหนักรถในแต่ละเพลา และคำนวณค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยที่ข้อมูลดังกล่าวนี้จะได้จากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (axle detector) ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับเพลาที่วางอยู่บนสะพานส่วนมากจะเป็นชนิด อุปกรณ์วัดสัญญาณลม (pneumatic sensor) หรืออุปกรณ์พีโซเซรามิก (piezo ceramic) ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับเพลาเหล่านี้จะถูกรถบรรทุกแล่นทับตลอดเวลาทำให้มีอายุการใช้งานสั้น และ ต้องปิดถนนทุกครั้งที่ต้องตรวจซ่อมจึงไม่สะดวกในการนำมาใช้งาน

ในการศึกษานี้ได้เสนอระบบการตรวจวัดน้ำหนักรถโดยการไม่ใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา โดยการนำข้อมูลความเครียดของสะพานขณะที่มีรถบรรทุกแล่นผ่าน ซึ่งมีการคำนวณอยู่แล้วเพื่อใช้คำนวณน้ำหนักรถ มาทำการวิเคราะห์คำนวณเพื่อหาค่าความเร็วรถ, ค่าระยะห่างระหว่างเพลลา และค่าน้ำหนักเพลลาโดยตรง

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

Laman และ Nowak (1996) จากประเทศอเมริกา ได้นำระบบ WIM มาทำการวัดกับสะพานที่ประกอบด้วยคาน (girder) เหล็ก 5 อัน เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความล้มเหลว ความเครียดจะถูกวัดภายใต้การจราจรปกติ โดยวิธีการของเรนโฟล (rainflow) ข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บรวบรวมและถูกบันทึกด้วยการใช้เครื่องมือ 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ระบบการวัดความเค้น (stress measuring system; SMS) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมความเครียดในอดีตที่ผ่านมา ภายใต้การจราจรปกติและทำการรวบรวมเข้ากับแผนภูมิแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธีเรนโฟล rainflow และโดยวิธีอื่นๆ ชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก (truck weighing system, TWS) ทำการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกและน้ำหนักเพลลาจากความเครียดในอดีต โดยการใช้เส้นอิทธิพล (influence line) ของสะพาน องค์ประกอบต่างๆของรถบรรทุกสามารถหาได้ โดยการใช้ตัวเซนเซอร์ 2 ตัวติดขนานกันไว้กับผิวทาง

Thater, Chang, Schelling และ Fu (1998) ได้นำระบบ WIM มาใช้ในการทำนายผลตอบสนองของทางพลศาสตร์ของรถขณะเคลื่อนที่โดยทำการจำลองในคอมพิวเตอร์แล้วทำการแยกผลทางพลศาสตร์ออกเพื่อหาน้ำหนักทางสถิต ด้วยการใช้นิยามการกรองผลทางพลศาสตร์เทียบเท่า (equivalent dynamic filter technique, EDFT) แยกแรงออกเป็นแรงทางพลศาสตร์และผลตอบสนองเสมือนทางสถิต (pseudo static response) โดยใช้วิธีฟูราสฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (fast Fourier transform) เทียบผลจากการแอนตัวเป็นสัดส่วน เรียกว่าอัตราส่วนการกรองเทียบเท่า (equivalent filtering ratio, EFR) ผลที่ได้พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณ และให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำนายน้ำหนักได้ถึง $\pm 5\%$ ในขณะที่ใช้ระบบ WIM ที่มีอยู่เดิมให้ความถูกต้องแม่นยำในช่วง $\pm 10\%$ เท่านั้น แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถหาน้ำหนักในแต่ละเพลลาได้ และไม่นำคุณสมบัติของสะพานจริงมาพิจารณา

Chan, Law, Yung และ Yuan (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการใช้ปฏิกิริยาตอบสนองของสะพานรูปแบบของคำตอบที่แน่นอน (closed-form solution) สามารถหาได้เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักคงที่ที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) จะถูกนำมาใช้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้จะอยู่บนพื้นฐานของสมการของออยเลอร์ (Euler's equation) ของคาน และแบบจำลองของรถที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยาตอบสนองจะพิจารณาเป็น 2 เพลลา

Zhu, Law (1999) ได้ทำการจำลองรูปแบบสะพานเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วงคาน ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ พฤติกรรมการสั่นไหวของคานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่จะถูกวิเคราะห์โดยหลักการของ Hamilton โดยจุดรองรับภายในจะถูกแทนด้วยสปริงที่มีความแข็งมาก วิธีการหาน้ำหนักจะใช้หลักการของซูเปอร์โพสิชันที่เชิงโหมด (modal superposition) และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งน้ำหนักที่หาได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา จากการศึกษาค่าน้ำหนักที่มีความน่าเชื่อถือสามารถหาได้, ถ้าจำนวนของจุดวัดมีไม่น้อยกว่าจำนวนโหมดการสั่นของ

สะพานความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักสามารถยอมรับได้ และ คำตอบที่ได้จากวิธีหาผลต่างกำลังสองที่มีการหน่วงให้ค่าดีกว่า วิธีหาผลต่างกำลังสองที่ไม่มีการหน่วง

Law, Chan และ Zeng (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยการทดสอบจากแบบจำลองใช้ข้อมูลของปฏิกิริยาตอบสนองของการสั่นไหวของสะพานเพียงอย่างเดียวในรูปของ frequency – time domain โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งรถจะถูกจำลองให้มีรูปแบบเป็น 1 เพลา และ 2 เพลา (กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาไว้คงที่) เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาและมีค่าความหน่วง (viscous damping) สมการการเคลื่อนที่ของคานสามารถหาได้ผ่านการแปลงพิกัดเชิงโหมด (modal coordinate) ผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับฟูเรียร์ทรานส์-ฟอร์ม (Fourier transforms) และน้ำหนักของรถจะถูกแปลงกลับไปสู่โดเมนของเวลา (time domain) ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะถูกตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกันระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้ ด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาจะสามารถทำนายน้ำหนักของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งน้ำหนักของรถได้จากการเฉลี่ยค่าแรงที่หาได้ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้ให้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง 20% อีกทั้งการเฉลี่ยค่าแรงนี้ เมื่อพิจารณาจากแรงที่ได้จึงพบว่าลักษณะของแรงมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง คือมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจนมีค่าลบในบางช่วง ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ไม่มีความเชื่อถือ จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน

Chan, Law และ Yung (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่ โดยการใช้สะพานที่เป็นคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) โดยได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดและเครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (girder) ของสะพานตลอดจนเครื่องตรวจนับจำนวนเพลา (axle sensors) ที่ผิวของทางของสะพาน รถบรรทุก 2 เพลาได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม น้ำหนักที่เพลาทางพลศาสตร์สามารถหาได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถสามารถหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักใช้เวลานานมากถึง 30 นาทีเมื่อใช้ Cpu รุ่น Pentium II 300MHz และน้ำหนักที่หาได้ในโดเมนของเวลามีความแปรปรวนสูงมากจนไม่สามารถเชื่อถือได้ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) แม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำถึง $\pm 5\%$ ก็ตาม

Zhu และ Law (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้ น้ำหนักที่เคลื่อนที่ จะถูกวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีของแผ่นบาง (orthotropic rectangular theory) และหลักการของซูเปอร์โพสิชันที่เชิงโหมด (modal superposition principle) ซึ่งสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา (time domain) โดยน้ำหนักที่หาได้จากวิธีการจำลองรูปแบบเป็นคานกับวิธีการจำลองรูปแบบเป็นแผ่นบางจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน รวมทั้งทำการทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วน ผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดคือ ไม่เกิน 5% ในระดับสัญญาณรบกวนที่ต่ำมาก (1%) แต่เวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักจะต้องใช้เวลานานมากเพราะต้องมีการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) ที่เหมาะสมในการคำนวณแต่ละครั้งอีกทั้งค่าพารามิเตอร์ λ มีผลต่อการทายน้ำหนักค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานและการหาน้ำหนักด้วยการใช้ความเร่งให้ผลที่ดีกว่าการใช้ความเครียด และพบว่าการเยื้องศูนย์มีผลให้ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

Law, Chan และ Zeng (2001) ได้พบว่า การหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่จะมีความคลาดเคลื่อนสูง ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่าสภาวะ บกพร่อง (ill-conditioned) ดังนั้น Law และคณะ จึงได้เพิ่มวิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะทำการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) ที่เหมาะสม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่ได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ λ ที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณที่นานและสิ้นเปลือง อีกทั้งค่าที่เหมาะสมนี้ยังขึ้นกับลักษณะของตัวรถอีกด้วย จึงทำให้การนำไปประยุกต์ใช้ทำได้ลำบาก

Law และ Fang (2001) ได้ทำการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่จากแบบจำลองย่อยส่วน โดยการใช้เทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (dynamic programming) ซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบของสเปซเฟส (state-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอรัล (recursive formula) บนพื้นฐานของการใช้ตัวเซ็นเซอร์หลายๆตัวในการวัดปฏิริยาตอบสนองของสะพาน ซึ่งการคำนวณด้วยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอรัลนี้ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ และความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับ เรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์เช่นกันและไม่สามารถละทิ้งพารามิเตอร์นี้ได้ ซึ่งการใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่ามาก

Zhu และ Law (2002) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการจำลองในคอมพิวเตอรืด้วยวิธีโดเมนของเวลา (time domain method) ด้วยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองแบบคานต่อเนื่อง โดยการใช้ความเครียดและความเร่งที่วัดได้ขณะเคลื่อนที่ของรถและ รวมทั้งใช้วิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) ในการคำนวณเพื่อเพิ่มขอบเขตในการแก้ปัญหาและลดเวลาในการคำนวณ จากผลการทดลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข สามารถหาค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก (noise) ได้ และพบว่าการใช้ความเร่งเป็นพารามิเตอร์ในการหาน้ำหนักแทนการใช้ความเครียด จะต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นในการวิเคราะห์ และวิธีการนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้ทั้งวิธีการหาน้ำหนักแบบวิธีโดเมนของเวลาและวิธีโดเมนของความถี่และเวลา โดยการแก้ปัญหาใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน (singular value composition, SVD) และให้ความคลาดเคลื่อนที่มากน้อยตามระดับของสัญญาณรบกวน โดยให้ความแม่นยำสูงสุดถึง 4% แต่ใช้เวลาในการคำนวณที่นานเนื่องจากขนาดของเมทริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่มาก และยังใช้เวลานานมากในการหาเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) ที่เหมาะสมที่สุดเช่นกันจึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน

Yu และ Chan (2002) ได้ทำการทดสอบหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อยส่วนโดยการใช้ผลตอบสนองของสะพานด้วยโมเมนต์ตัด โดยวิธีที่นำมาใช้ได้แก่วิธีโดเมนของเวลา (time domain method; TDM) และวิธีโดเมนของความถี่และเวลา (frequency time domain method, FTDM) และทำการเปรียบเทียบเทคนิคการแก้ระบบสมการเชิงเส้นสองวิธีได้แก่ เทคนิคการใช้ซูโดอินเวอร์สเมทริกซ์ (pseudo-inverse matrix; PI) และวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน (singular value composition, SVD) รวมทั้งศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ความถี่ที่เลือกใช้ จำนวนโหมดทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถขณะเคลื่อนที่ จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ในการวัด ผลการทายน้ำหนักที่ได้พบว่าการใช้เทคนิคซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชันสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำทั้งในวิธี

TDM และ FTDM โดยเฉพาะในกรณีวิธี FTDM สามารถจัดปัญหาสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ได้ดีกว่าการใช้เทคนิคขูดอินเวอร์สเมทริกซ์ และความคลาดเคลื่อนที่ได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบาย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ถือว่าดีคืออยู่ในช่วงไม่เกิน 5-10% แต่ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) มีผลในการหาค่าพิกัดค่อนข้างมากในแต่ละกรณีกล่าวคือต้องหาค่า λ ค่าที่เหมาะสมที่สุดตลอดการคำนวณนั้นๆ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

Jiang, Au และ Cheung (2003) ได้ทำการศึกษาการหาพารามิเตอร์ของยานพาหนะขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้แก่ มวลของตัวรถช่วงบนและล่าง ค่าความหน่วงของรถ ค่าสติเฟเนส สปริงระหว่างมวลทั้งสอง และค่าสติเฟเนสสปริงอีกค่าสำหรับผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับผิวสะพาน โดยทำการหาพารามิเตอร์เหล่านี้พร้อม ๆ กันโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) โดยจำลองผลตอบสนองของสะพานขึ้น และใช้ความเร่งของการสั่นไหวของสะพานในขั้นตอนหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งให้ผลการหาพารามิเตอร์ของในส่วนของมวลรถที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ ขณะที่พารามิเตอร์ตัวอื่นมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง และการทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำนั้นต้องการจำนวนตำแหน่งของการเก็บข้อมูล (station) หลายตำแหน่ง และการคำนวณใช้เวลานานมาก เนื่องจากระบบการคำนวณใช้วิธีการค้นหาข้อมูล (search) ที่เหมาะสมที่สุดจากขอบเขต (limits) ที่กำหนด

Zhu และ Law (2003) ได้ทำการศึกษาการหาแรงขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยข้อมูลความเร็วรถที่ไม่คงที่ โดยทำการศึกษาแบบการวัดสัญญาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ การใช้สัญญาณความเร่งของการสั่นไหวของสะพาน และการใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน โดยทั้งสองวิธีทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์โดยตรง (exact solution) ร่วมกับวิธีกึ่งสองน้อยที่สุดและเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชันเช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้น โดยทำการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ขณะที่การทดสอบด้วยแบบจำลองยอส่วนนั้นทำการศึกษาโดยใช้สัญญาณความเครียดเท่านั้น โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยของรถในช่วงการเคลื่อนที่บนสะพานมาวิเคราะห์แทนความเร็วจริงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากชะลอรถเพื่อให้มีความเร็วไม่คงที่ และยังพิจารณาผลของความขรุขระและระดับของสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การหาแรงโดยใช้สัญญาณความเร่งนั้นให้ผลที่แม่นยำกับแรงทางสถิติมากกว่าการใช้สัญญาณความเครียดซึ่งมีความแปรปรวนสูง (แรงที่หาได้มีการวัดแกว่งที่สูง) โดยเฉพาะกับรถที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังทำการจำลองรูปแบบสะพานแบบคานต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าแรงที่คำนวณได้บริเวณที่รถผ่านจุดรองรับนั้นจะเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากจะเกิดสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ที่ตำแหน่งเข้าใกล้จุดรองรับ ซึ่งต้องการค่าพารามิเตอร์ในการเรกูลาร์ไรเซชันที่มีค่าน้อยที่ตำแหน่งเวลาที่รถเข้าใกล้จุดรองรับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น และยังพบว่าในการวิเคราะห์สะพานแบบต่อเนื่องนั้น ระดับสัญญาณรบกวนจะมีผลมากต่อการหาแรงเมื่อเทียบกับสะพานแบบช่วงเดียวปกติ

พลกฤษณ์ พนาปุฒิมกุล (2003) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถบนสะพาน เพื่อหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (dynamic programming) ซึ่งได้พิจารณาผลของการบิดโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) และได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการหาน้ำหนักเนื่องจากความเร็วและความขรุขระ พบว่าผลของการหาน้ำหนักกรณีความคลาดเคลื่อนอยู่ขึ้นกับการเลือกใช้เรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ (λ) และค่าน้ำหนักที่หาได้มาจากการเฉลี่ยแรงในช่วงกลางของเวลาที่รถวิ่งบนสะพานทั้งสองเพลลา ซึ่งเป็นการจำกัดการนำไปใช้งานและไม่สามารถให้แม่นยำของแรงในเพลลาได้สูงพอ และเนื่องจากมีการใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางซึ่งจะ

ทำให้มีจำนวนระดับชั้นความเสีร่ มาก ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณหาน้ำหนักทรนนานมาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

ธวัช อัครวิทยากุมิ (2003) ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักทรนเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง โดยตัดผลของการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยการคำนวณน้ำหนักจากค่าโมเมนต์ตัดของหน้าตัด และทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (iteration technique) โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิกโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ค่าน้ำหนักทรนเข้าสู่หาค่าที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรกของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง ผลที่ได้พบว่าน้ำหนักทรนทุกที่ท่ายได้มีความถูกต้องและแม่นยำสูงมาก มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คืออยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และได้ทำการยืนยันข้อมูลด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน แต่ยังคงขาดการทดลองเพื่อพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยสำคัญหลายปัจจัย เช่น ผลของตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางในช่องจราจร ผลของความขรุขระจำนวนเพลลาที่มากขึ้น และผลของสภาพจูดรองรับของสะพาน เป็นต้น

Zhu และ Law (2004) ได้ทำการศึกษาการหาแรงขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบจากแบบจำลอง โดยใช้สัญญาณการสั่นไหวจากโมเมนต์ตัดของสะพาน โดยวิธีที่นำมาศึกษานั้นประกอบด้วย 2 วิธี โดยวิธีแรกใช้พื้นฐานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์โดยตรง (exact solution) ซึ่งจะหาแรงในลักษณะแยกเป็นเพลลา (axle load) และอีกวิธีใช้พื้นฐานทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM solution) ซึ่งจะหาแรงได้ในรูปแบบของแรงในล้อ (wheel load) ซึ่งอิสระต่อกัน โดยทั้งสองวิธีนั้นได้ทำการแก้ปัญหาด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดประกอบกับเทคนิคเรกูลารีไรเซชัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าทั้งสองวิธีนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันนักสำหรับแรงที่เคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยวิธีแรก (exact solution) นั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าสำหรับการเคลื่อนที่ในตำแหน่งที่เยื้องจากกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะแปรปรวนไว้มากต่อตำแหน่งของจุดวัดสัญญาณ แต่ทั้งนี้ยังขึ้นกับจำนวนและรูปแบบตำแหน่งของการติดตั้งจุดวัดสัญญาณความเครียดที่ทั้งสองสะพานอีกด้วย ส่วนจำนวนโหมดการสั่นไหวของสะพานนั้นมีผลน้อยต่อการหาแรง แต่การใช้จำนวนโหมดที่มากย่อมให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้จำนวนโหมดที่น้อย และยังพบว่าการหาแรงในลักษณะแบบเป็นเพลลานั้นให้ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าการหาแรงในลักษณะแยกล้อซึ่งกันและกัน ซึ่งผลการทดสอบโดยรวมแล้วยังพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูง และการอ้างอิงผลที่ได้ด้วยการใช้ตัวคูณปฏิสัมพันธ์ (correlation factor) นั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

พัทรพงษ์ อาสนจินดา (2004) ได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน โดยพิจารณาถึงปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำนายน้ำหนักของทรนทรนทุก อันได้แก่ ผลของความขรุขระ การบิดในสะพานเนื่องจากตำแหน่งตามแนวขวางของการวิ่งในช่องจราจรช่องซ้ายหรือขวา ผลของจำนวนเพลลาที่เพิ่มขึ้นจากเพลลาซึ่งเป็นเพลลาเดี่ยวเป็นเพลลาคู่ และผลของสภาพของจูดรองรับ (support condition) หรือรูปแบบสะพานแบบหลายช่วง รวมทั้งจะทำการศึกษาถึงแรงในล้อทรนเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาน้ำหนักทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น จากการทดสอบทั้งหมด 540 การทดสอบพบว่า การนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำการเฉลี่ยและนำไปทำนายน้ำหนักจะสามารถลดผลของการบิดตัวของสะพานซึ่งเกิดจากตำแหน่งของทรนตามแนวขวางได้ดี และทรนทรนทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการทำนายน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่ดีกว่าทรนทรนทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตามระดับของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน รูปแบบของฐานรองรับของสะพานนั้นมีผลต่อการทำนายน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ โดยสะพานแบบช่วงเดียวที่มีจูดรองรับแบบธรรมดาจะให้ผลการ

ทายน้ำหนักที่ดีกว่าสะพานแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้พบว่ากรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิวไม่มีความขรุขระนั้นให้ผลการทายน้ำหนักรวมที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ส่วนผลการทดสอบกรณีรูปแบบสะพานเป็นแบบต่อเนื่องและกรณีที่รถบรรทุกมีจำนวนเพลาเพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสูงสุด $\pm 20\%$

ภาณุ พุ่งสุข (2005) ได้ทำการทดสอบภาคสนาม โดยการทดสอบได้มีการติดตามวัดความเครียดสำหรับวัดผลตอบสนองของของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเช่นกันโดยจะทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ได้สะพาน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการนำไปงานจริง แล้วจะพบว่ามาตรวัดความเครียดสำหรับติดคอนกรีตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันไม่สะดวกในการติดตั้งได้สะพานเท่าที่ควร ตลอดจนค่าความเครียดที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ขณะใช้งาน เช่น เมื่อเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตเกิดปัญหาของฟองอากาศขนาดเล็กภายในมาตรวัดความเครียด ผลการทดสอบทั้ง 51 การทดสอบ โดยในกรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรกลาง 23 การทดสอบ ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหน้าโดยส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกิน $\pm 50\%$ ผลการทายน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 10\%$ สำหรับน้ำหนักเพลาหลัง และไม่เกิน $\pm 6\%$ สำหรับน้ำหนักรวม กรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรซ้ายทั้ง 24 การทดสอบ ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหน้าโดยส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกิน $\pm 50\%$ การทายน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 10\%$ สำหรับน้ำหนักเพลาหลัง และไม่เกิน $\pm 6\%$ สำหรับน้ำหนักรวม เมื่อพิจารณาผลของการกระแทกของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งข้ามสะพานกรณีวิ่งช่องจราจรซ้ายทั้ง 2 กรณี คือ ผลของการกระแทกก่อนเข้าสะพานและผลของการกระแทกช่วงกลางสะพาน ซึ่งทำการทดสอบ จำนวน 4 การทดสอบ พบว่าผลการทายน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 10\%$ สำหรับน้ำหนักรวม

โดยสรุปงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนามาโดยตลอด ทำให้สามารถหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกได้แม่นยำมากขึ้น มีศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆทำให้สามารถนำใช้งานจริงได้ และใช้งานได้ครอบคลุมมากขึ้น แต่ในงานวิจัยเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือต้องมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งรถ ซึ่งทำให้มีความไม่สะดวกในการนำไปใช้งานจริง

1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา

คณะกรรมาธิการยุโรป (2001) ได้ทำการพัฒนาระบบ WIM ด้วยการใช้สะพานเป็นหลักเรียกว่า bridge WIM หรือ B-WIM โดยทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (free of axle detector หรือ FAD) ซึ่งหลักการนี้ได้ถูกยกขึ้นมาพิจารณาเป็นครั้งแรกโดยสถาบันทดสอบกลางของประเทศฝรั่งเศส (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées หรือ LCPC) ได้ทำการทดสอบสะพาน Pont de Normandie ซึ่งเป็นสะพานที่มีความบางมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องไม่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (axle detector) เนื่องจากเหตุผลของการบำรุงรักษา และ ระบบการกันซึมของสะพาน ระบบ FAD B-WIM จึงถูกคิดค้นขึ้นโดยทำการหาค่าจำนวนเพลา, ระยะเพลา และ ความเร็วของรถบรรทุกด้วยมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งที่ท้องสะพานเท่านั้น



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา



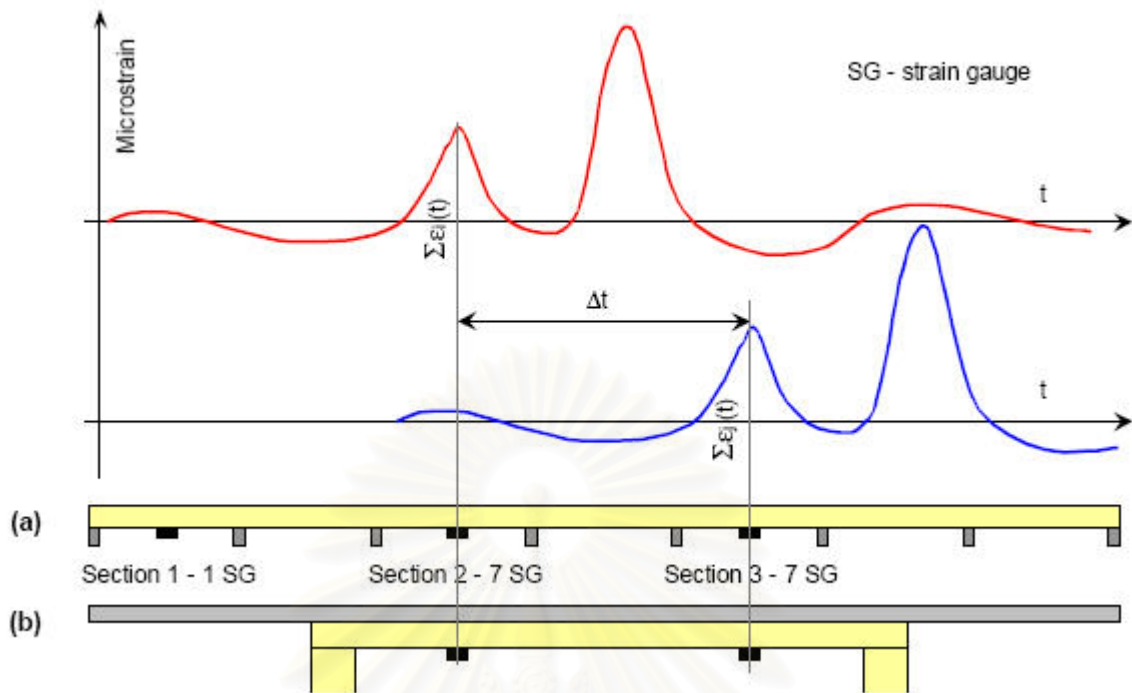
รูปที่ 1.2 สะพาน Pont de Normandie

ในการศึกษาขั้นแรก Dempsey et al (1998) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของระบบ WIM สำหรับสะพาน orthotropic ในเวลาต่อมา Znidaric (1999) ได้พิจารณาการใช้ระบบ WIM สำหรับสะพานแผ่นพื้นช่วงสั้น (short slab bridge) จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าสะพานที่มีช่วงสะพานสั้นจะตรวจจับเพลลาได้ง่ายกว่า สะพานที่มีช่วงสะพานยาว และยังขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ จึงสามารถสรุปเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ FAD โดยที่สะพานนั้นจะสามารถใช้ระบบ FAD ได้อย่างเหมาะสมเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ FAD มีค่าน้อยกว่า 2

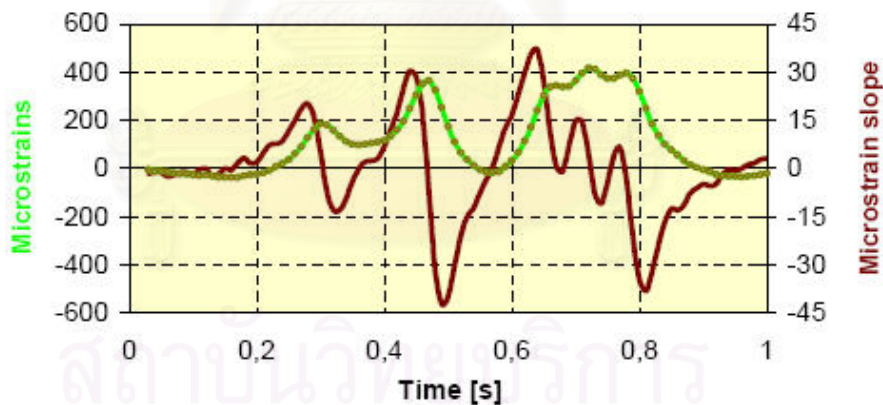
$$FAD = \frac{L \times H}{d_{\min} \times f_i}$$

ซึ่งในหลักการหาค่าความเร็ว, จำนวนเพลลา และ ระยะเพลลา นั้นมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการหาค่าความเร็วจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ของผลต่างเวลาระหว่างมาตรวัดความเครียด 2 มาตรวัด
2. ทำการหาจำนวนเพลลาจากการหาตำแหน่งสูงสุดสัมพัทธ์ (peak) ของความเครียดที่วัดได้
3. ทำการหาค่าระยะเพลลาโดยความเร็ว และ จำนวนเพลลาที่ได้มาข้างต้น



รูปที่ 1.3 วิธีการหาความเร็วจากหลักการ FAD



รูปที่ 1.4 แสดงวิธีการระบุจำนวนเพลลาจากค่าความเครียดที่วัดได้ ในที่กราฟนี้เป็นรถบรรทุก 5 เพลลา

เมื่อทราบตัวแปรเริ่มต้นได้แก่ ความเร็ว, จำนวนเพลลา, ระยะเพลลา จึงทำการหาค่าน้ำหนักเพลลาและค่าน้ำหนักรถบรรทุกโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) รวมอีกครึ่งหนึ่ง จากการทดลองได้ผลว่าระบบการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลานั้นสามารถใช้ได้กับรถบรรทุก 43 คันในจำนวนทั้งหมด 44 คัน โดยรถบรรทุกคันที่ไม่สามารถใช้ระบบนี้ได้เป็นรถบรรทุกเปล่าที่มีระยะเพลลาใกล้มาก และค่าความเร็วที่ได้นั้นก็มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$ ค่าระยะเพลลาไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่คำนวณได้มีความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 20\%$ สำหรับแบบจำลอง 1 มิติ และ ค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่คำนวณได้มีความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 15\%$ สำหรับแบบจำลอง 2 มิติ

โดยสรุปในงานวิจัยของคณะกรรมการยุโรปนี้ ได้ทำการศึกษาถึงดัชนีวัดความเป็นไปได้ในการใช้ระบบ FAD ของสะพาน โดยได้ทำการทดสอบกับสะพาน orthotropic จริง, ทำการศึกษาดผลกระทบต่ออ็อปเจกทีฟฟังก์ชันของตัวแปรต่าง ๆ และได้ทำการทดสอบการหาน้ำหนักทั้งในแบบจำลอง 1 มิติ และ แบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งได้ผลการทายน้ำหนักมีความแม่นยำ $\pm 20\%$ สำหรับแบบจำลอง 1 มิติ และ ความแม่นยำ $\pm 15\%$ สำหรับแบบจำลอง 2 มิติ

จากผลการศึกษาข้างต้นแม้จะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค FAD ในระบบการหาน้ำหนัก รถบรรทุก แต่ผลการทายน้ำหนักยังมีความไม่แม่นยำนัก อีกทั้งการศึกษายังถือเป็นเพียงการศึกษาในระยะเริ่มต้น ยังไม่ได้มีการพิจารณาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องอย่างครอบคลุม เช่น ปัจจัยความเร็วรถ และระยะห่างระหว่างเพลลา เมื่อปัจจัยดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลง จะมีผลอย่างไรต่อค่าน้ำหนัก, ความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลลา อีกทั้งยังไม่ได้พิจารณาปัจจัยความขรุขระ โดยแยกเป็นระบบที่มีความขรุขระของผิวถนน กับระบบที่ไม่มีขรุขระของผิวถนน ซึ่งไม่สามารถทำได้ในการทดสอบทางภาคสนาม

Leming และ Stalford (2002) ได้ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยคำนวณจากค่าการแอ่นตัวของสะพานที่ตำแหน่งกลางสะพานบนโดเมนเวลา พารามิเตอร์ที่คำนวณหาคือ น้ำหนักสถิตล้อหน้าและล้อหลัง น้ำหนักรวม ระยะเพลลาและความเร็วของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยพิจารณาคานและน้ำหนักสถิตเคลื่อนที่เท่านั้น ไม่พิจารณาน้ำหนักทางจลศาสตร์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและมวลของสะพาน โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการแอ่นตัวที่วัดได้และค่าการแอ่นตัวจากการคำนวณ ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จะคำนวณค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตบนและล่างของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของอนุพันธ์ของการแอ่นตัว (ที่ตำแหน่งล้อเข้า-ออก และที่ตำแหน่งกลางสะพาน) จากนั้นได้ทำการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนค่าการแอ่นตัวที่วัดมาได้โดยใช้ที่เวลาต่างๆกันอย่างสุ่ม (random sampling) จะให้ผลค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ลดลงมาก (น้อยกว่า 1%) และเมื่อมีการพิจารณาสัญญาณรบกวนในการคำนวณด้วยแล้วค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% จนกระทั่งสัญญาณรบกวนมากกว่า 10% จะให้ค่าคลาดเคลื่อนระยะเพลลา 5% ค่าคลาดเคลื่อนความเร็ว 1% ค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักล้อหน้า 5% ค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักล้อหลัง 7.9% และค่าคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวม 1% แต่เนื่องจากการกำหนดขอบเขตของค่าตอบ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถ้าค่าจริงไม่ได้อยู่ในช่วง

Leming และ Stalford (2003) ได้ทำการศึกษาการหาน้ำหนักสถิตล้อหน้าและล้อหลัง น้ำหนักรวม ระยะเพลลาและความเร็วของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยคำนวณจากค่าการแอ่นตัวของสะพานที่ตำแหน่งกลางสะพานบนโดเมนเวลา โดยการพิจารณาสะพานใช้แบบจำลองสถิต ในส่วนการพิจารณารถบรรทุกใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ ในการหาค่าตอบใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการแอ่นตัวที่วัดได้และค่าการแอ่นตัวจากการคำนวณ โดยใช้ตำแหน่งวัดการแอ่นตัว 3 ตำแหน่งคือที่ตำแหน่ง 3/4 ของความยาวสะพานกลางสะพานและ 1/4 ของความยาวสะพาน วิธีการคำนวณจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นค่าสถิติเพนสของเพลลา, มวลของเพลลา และนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นเป็นข้อมูลที่จะใช้ในการหาน้ำหนัก, ความเร็วของรถบรรทุก และระยะเพลลาต่อไป ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตบนและล่างของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้ผลค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ต่ำ (น้อยกว่า 1%) และเมื่อมีการพิจารณาสัญญาณรบกวนใน

การคำนวณด้วยแล้ว (1.5%-5%) ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะคลาดเคลื่อนในระดับเดียวกับไม่มีสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามค่าประมาณความถี่ธรรมชาติจะมีแนวโน้มความถูกต้องลดลงเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากขึ้น

ข้อจำกัดของวิธีการทั้ง 2 ของ Leming และ Stalford คือไม่ได้พิจารณาผลของปฏิกิริยาตอบสนองทางพลศาสตร์ระหว่างสะพาน กับ รถบรรทุกในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กระบวนการหาน้ำหนักต้องอาศัยการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรถบรรทุกก่อนซึ่งต้องมีการกำหนดค่าขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานจริง และอาจได้คำตอบคลาดเคลื่อนเมื่อค่าพารามิเตอร์จริงไม่สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ขั้นต่ำ อีกทั้งการทดสอบยังเป็นการทำงานน้ำหนักบรรทุกทุกในแบบจำลองสมมุติในคอมพิวเตอร์ โดยที่ไม่ได้พิจารณาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องอย่างครอบคลุมได้แก่ ผลของความเร็วรถบรรทุก, ระยะห่างระหว่างเพลลา และผลของความขรุขระของผิวทางต่อการพายน้ำหนัก ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตล้วนบ่งชี้ว่ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการหาน้ำหนักบรรทุก นอกจากนี้ยังไม่ได้ทำการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกในแบบจำลองย่อยส่วน หรือในสะพานจริง

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบ bridge weigh-in-motion (B-WIM) แบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (free of axle detector หรือ FAD) ให้สามารถหาน้ำหนักบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรม และ ประสิทธิภาพของระบบ FAD B-WIM ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์
3. เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการนำระบบ FAD B-WIM มาใช้งานจริง และตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบด้วยการหาน้ำหนักบรรทุกทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. พิจารณาโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)
2. พิจารณาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกเป็นแบบจุด
3. การวิเคราะห์จะสมมุติให้ล้อรถกดติดอยู่กับสะพานตลอดเวลา
4. ในการศึกษาจะพิจารณารถบรรทุกวิ่งบนสะพานเพียงคันเดียว และมีความเร็วคงที่

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) และน้ำหนักเพลลาทางสถิต (static axle weight) ของรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน
2. ทำให้ไม่ต้องมีการหยุดรถเพื่อชั่งน้ำหนักซึ่งเป็นการประหยัดเวลาของผู้ขับขี่ ทั้งยังป้องกันการหลีกเลี่ยงการชั่งน้ำหนักของรถบรรทุก
3. ทำให้ทราบว่าหลักการหาน้ำหนักบรรทุกแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลาที่ใช้ มีความคลาดเคลื่อนและมีความเป็นไปได้เพียงพที่จะนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่
4. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริง

1.6 การดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการวิจัยที่ผ่านมา
2. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
3. ทำการพัฒนาระบบ FAD B-WIM โดยการวิเคราะห์หาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ที่เหมาะสม
4. ทำการศึกษาพฤติกรรม และประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จากแบบจำลองของรถและสะพานในคอมพิวเตอร์ภายใต้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ
5. ทำการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งาน และประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยการทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม
6. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการศึกษา
7. จัดทำวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้อธิบายถึง พื้นฐานทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของปัญหาที่ประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ 1.ปฏิกริยาระหว่าง สะพาน-รถบรรทุก (หัวข้อที่ 2.1-2.2) 2.ส่วนของขั้นตอนการหาน้ำหนักโดยใช้กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) (หัวข้อที่ 2.3)

ในขั้นต้นจากข้อมูลคุณลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุก และสะพาน จะทำการจำลองแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถอธิบายปฏิกริยาทางพลศาสตร์ของสะพาน และรถบรรทุก หลังจากนั้นจะทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำเคลื่อนที่ และผลตอบสนองของสะพาน เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองของ สะพานทางทฤษฎี (ความเครียด, โมเมนต์ดัด) จากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก โดยการใช้กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) แทนที่การชั่งน้ำหนัก

ถัดมาจึงทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยใช้ กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งมีฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) คือ ผลต่างกำลังสองระหว่างค่าโมเมนต์ดัดจากการวัด และค่าโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้โดย ทำการหาค่าที่น้อยที่สุดในฟังก์ชันจุดประสงค์นี้ จากกระบวนการดังกล่าวแรงกระทำเคลื่อนที่ ที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดจะถูกหาออกมา

ขั้นตอนสุดท้ายจะมีการใช้เทคนิคการปรับปรุงความแม่นยำ เพื่อปรับปรุงค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่หามาได้ จากขั้นตอนที่สอง ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

2.1 ระบบปฏิกริยาตอบสนองทางพลศาสตร์ระหว่างสะพาน กับรถบรรทุก

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถบรรทุก-สะพาน นั้นจำเป็นที่จะต้องเข้าใจธรรมชาติของสะพานเพื่อที่จะสร้างหลักการของแบบจำลองนั้น

โดยทั่วไปมี 2 วิธีในการจำลองปฏิกริยาตอบสนองระหว่างรถบรรทุก-สะพาน วิธีแรกคือการแก้ปัญหา โดยวิธีการทำซ้ำแบบควบคู่ โดยที่รถบรรทุก และสะพานจะถูกแก้ปัญหาโดยแยกจากกัน และใช้กระบวนการทำซ้ำ ในแต่ละช่วงเวลาเพื่อที่จะหาสมดุลย์ระหว่างรถบรรทุก และ สะพาน

วิธีที่ 2 คือการจำลองปฏิกริยาระหว่างรถบรรทุก และสะพาน โดยที่การจำลองปฏิกริยาดังกล่าวจะถูก แก้ปัญหาแบบควบคู่อย่างสมบูรณ์ ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถรวม สะพาน และ รถบรรทุกให้เป็นระบบควบคู่ระบบเดียวซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้พร้อมกันในแต่ละช่วงเวลาโดยไม่ต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ

2.1.1 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้าง

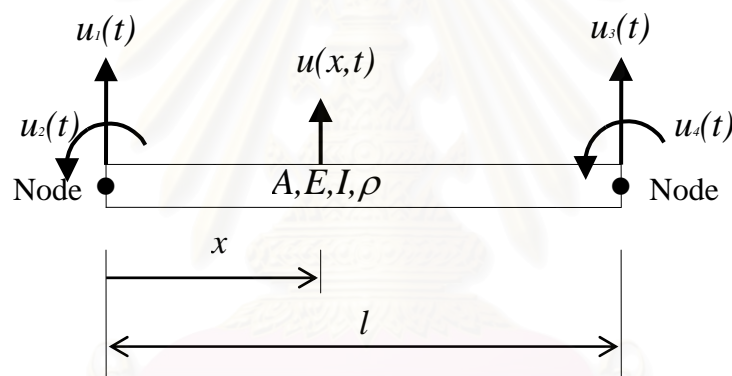
ระบบสะพาน-รถบรรทุก สามารถที่จะจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แยกโหมด (modal decomposition) แต่จะเกิดค่าคลาดเคลื่อนสะสมในผลตอบสนองทางพลศาสตร์ นอกจากนี้วิธีนี้ใช้พื้นฐานจากระบบต่อเนื่อง (continuous system) และเทคนิคการรวมโหมด (mode superposition technique) ซึ่งยากแก่การประยุกต์ใช้ใน โครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์สำหรับระบบแยกส่วน (discrete system) จะ

ถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากโครงสร้างสะพานมีความซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้วิธีการทางไฟไนต์อีลีเมนต์จะถูกประยุกต์มาใช้เพื่อหาแบบจำลองปฏิกริยาระหว่างสะพาน-รถบรรทุก

ความแม่นยำของแบบจำลองได้ถูกศึกษาเทียบกับองศาของการแยกส่วนของโครงสร้าง (degree discretization of structure) สำหรับการวิเคราะห์แรงเคลื่อนที่ (Reiker et al., 1996) ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาคานในหลายสภาวะเงื่อนไขขอบเขต, รวมทั้งจุดรองรับแบบอินเทอร์มีเดียต (intermediate support) และ กระทำด้วยระบบแรงเคลื่อนที่แบบธรรมดา และ แรงกระตุ้นภายนอก สามารถที่จะถูกวิเคราะห์ได้เป็นผลสำเร็จ ด้วยผลตอบสนองที่แม่นยำ เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์เชิงโหมด (Lin และ Trethewy, 1990). นอกจากนี้ผลตอบสนองที่จำลองมานี้ยังไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ตัวอย่าง และ จำนวนของข้อมูล (Zhu และ Law 2004).

2.1.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการระจัดของสะพาน

โครงสร้างสะพานได้ถูกพิจารณาเป็นจำนวน n ช่วงสะพานต่อเนื่อง และ ได้ถูกแบ่งออกโดยวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ซึ่งใช้ชิ้นส่วนคาน 2 ขั้ว (node) และแต่ละขั้วของชิ้นส่วนคานจะมี 2 องศาเสรีคือ การแอ่นตัวในแนวตั้งและการแอ่นตัวในการหมุน



รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนคาน 4 องศาเสรี

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนคาน

E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนคาน

I คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคาน

ρ คือ มวลต่อหน่วยความยาวของคาน

l คือ ความยาวของชิ้นส่วนคาน

ซึ่ง $u(x, t)$ คือการแอ่นตัวในแนวตั้งของชิ้นส่วนคานที่ระยะทาง x (local coordinate) และเวลา t ใดๆ โดยที่จะต้องสอดคล้องกับสมการของคานที่ตำแหน่ง x และที่เวลา t ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (2.1)$$

สำหรับในกรณี EI มีค่าคงที่ สมการ 2.1 จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = 0 \quad (2.2)$$

ซึ่งสามารถหาปริพันธ์ (integrate) ได้เป็น

$$u(x,t) = c_1(t)x^3 + c_2(t)x^2 + c_3(t)x + c_4(t) \quad (2.3)$$

โดยที่ $c_i(t)$ คือค่าคงที่ของการหาปริพันธ์

สมการ 2.3 สามารถใช้ในการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวดิ่งของชิ้นส่วนคานได้ ซึ่งมีเงื่อนไขขอบ (boundary condition) ดังนี้

$$\begin{aligned} u(0,t) &= u_1(t) & u(l,t) &= u_3(t) \\ \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} &= u_2(t) & \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} &= u_4(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นเมื่อแทนลงในสมการ 2.3 จะสามารถหาค่าคงที่ของการหาปริพันธ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} c_4(t) &= u_1(t) \\ c_3(t) &= u_2(t) \\ c_2(t) &= \frac{1}{l^2} [3(u_3 - u_1) - l(2u_2 + u_4)] \\ c_1(t) &= \frac{1}{l^3} [2(u_1 - u_3) + l(u_2 + u_4)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

แทนสมการ 2.5 ลงในสมการ 2.4 และทำการจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของการเคลื่อนที่ที่ x (nodal displacement) จะได้สมการแอนต์ตัวของชิ้นส่วนคานที่ระยะ x และเวลา t ใดๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x,t) &= \left[1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \right] u_1(t) + l \left[\frac{x}{l} - \frac{2x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right] u_2(t) \\ &+ \left[\frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \right] u_3(t) + l \left[-\frac{x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right] u_4(t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ที่อยู่ข้างหน้า $u_i(t)$ คือฟังก์ชันพื้นฐาน (shape function) ของการแอนต์ตัวของชิ้นส่วนคาน

เมทริกซ์มวล (mass matrix) ของชิ้นส่วนคานสามารถคำนวณได้จากการแทนสมการ 2.6 ลงไปในสมการของพลังงานจลน์ (kinetic energy) หรือสมการ 2.7

$$T(t) = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left[\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right]^2 dx \quad (2.7)$$

และสมการ 2.7 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของการเคลื่อนที่ที่ x ทั่วคือ

$$T(t) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{u}} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

โดยที่ \mathbf{M} คือ เมทริกซ์มวล (mass matrix), เวกเตอร์ $\mathbf{u}(t)$ เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนที่ที่ขั้วดังรูปที่ 2.1 และเวกเตอร์ $\dot{\mathbf{u}}$ คืออนุพันธ์ของเวกเตอร์ $\mathbf{u}(t)$ เทียบกับเวลา

หลังจากทำการหาปริพันธ์และจัดรูปแบบเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ขั้ว (nodal displacement) จะได้เมทริกซ์มวลสำหรับชิ้นส่วนคานาดังนี้

$$\mathbf{M} = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ในทำนองเดียวกัน สามารถหาเมทริกซ์สติฟเนส (stiffness matrix) ได้จากการแทนสมการ (2.6) ลงในสมการพลังงานความเครียด (strain energy) หรือสมการ 2.11

$$V(t) = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left[\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \quad (2.11)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของการเคลื่อนที่ขั้วได้

$$V(t) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (2.12)$$

โดยที่ \mathbf{u} ได้กำหนดไว้ในสมการที่ 2.9 ดังนั้นเมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนคานาคือ

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

เมื่อได้เมทริกซ์มวลและเมทริกซ์สติเฟนของแต่ละชิ้นส่วนคานแล้วจึงรวม (assembly) ชิ้นส่วนคานแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันตามองศาเสรีที่ตรงกัน ซึ่งจะได้เมทริกซ์มวลและเมทริกซ์สติเฟนของระบบเมทริกซ์ความหน่วงของสะพานสามารถสังเคราะห์ได้โดยพิจารณาการสั่นอิสระของระบบดังแสดง

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อคูณ \mathbf{M}^{-1} ตลอดสมการ (2.14) จะได้

$$\ddot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u} = 0 \quad (2.15)$$

โดยที่ $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$

และ $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$

แปลงเวกเตอร์การเคลื่อนที่ \mathbf{u} ให้เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนที่ในพิกัดเชิงโหมด, \mathbf{q}

$$\mathbf{u} = \mathbf{V}\mathbf{q} \quad (2.16)$$

โดยที่ \mathbf{V} คือ ไอเกนเวกเตอร์ (eigen vector) ของเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{K}}$

แทนสมการ 2.16 ลงในสมการ 2.15 และคูณตลอดด้วย \mathbf{V}^{-1} จะได้

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{C}}\mathbf{V}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{K}}\mathbf{V}\mathbf{q} = 0 \quad (2.17)$$

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^*\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*\mathbf{q} = 0 \quad (2.18)$$

โดยที่ $\mathbf{K}^* = \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{K}}\mathbf{V}$

$$= \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

สมมติให้เมทริกซ์ \mathbf{C}^* มีคุณสมบัติ orthogonality เช่นเดียวกับ \mathbf{K}^* จะได้

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{C}}\mathbf{V}$$

$$= \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2\xi_2\omega_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 2\xi_n\omega_n \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่ ξ_i คือ สัดส่วนความหน่วง (damping ratio) ของโหมดที่ i
 ω_i คือ ความถี่ธรรมชาติเชิงมุม (angular natural frequency) ของโหมดที่ i

เมื่อทราบค่า ξ_i และ ω_i แล้วจะสามารถหาเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{C}}$ และ \mathbf{C} ได้ ดังนี้

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{V}\mathbf{C}^*\mathbf{V}^{-1} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{M}\bar{\mathbf{C}} \quad (2.22)$$

จากสมการข้างต้นหากกำหนดให้ระบบสมการอธิบายเฉพาะส่วนการเคลื่อนที่ของสะพาน ก็จะสามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{R}(t) = \mathbf{P}_b(t) \quad (2.23)$$

โดยที่

\mathbf{M}_b คือ เมทริกซ์มวลรวมทุกชิ้นส่วนของสะพาน

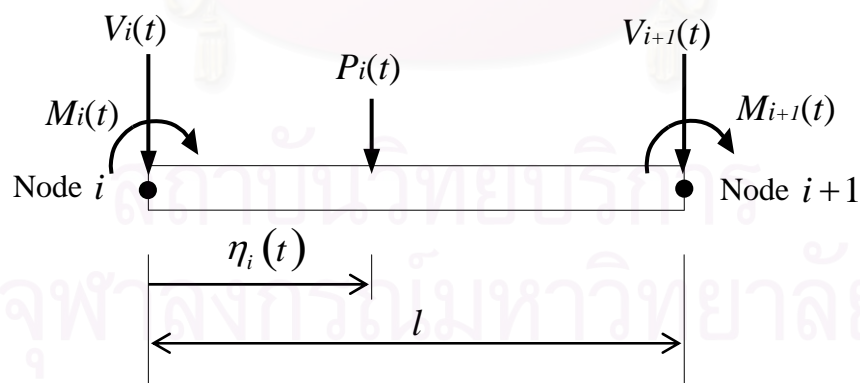
\mathbf{C}_b คือ เมทริกซ์ความหน่วงรวมทุกชิ้นส่วนของสะพาน

\mathbf{K}_b คือ เมทริกซ์สติฟเนสรวมทุกชิ้นส่วนของสะพาน

$\mathbf{R}(t)$ คือ เวกเตอร์ตอบสนองในพิกัดคโลกบอล (global) ของสะพาน

และ $\mathbf{P}_b(t)$ คือ เวกเตอร์แรงกระทำภายนอกของสะพาน

แรงกระทำภายนอกของสะพานคือแรงปฏิกิริยาที่ถูกแปลงเป็นแรงกระทำที่ขั้วของเสาเสาริของสะพาน



รูปที่ 2.2 แรงกระทำที่ขั้วเนื่องจากแรงกระทำภายนอก

รูปที่ 2.2 แสดงชิ้นส่วนคานรับแรงภายนอก และ แรงที่ขั้วเทียบเท่าเนื่องจากแรงนั้น

โดยที่ $\eta_i(t)$ คือ ระยะทางระหว่างแรงกระทำ $P_i(t)$ จากขั้วซ้ายของชิ้นส่วนคาน และแรงที่ขั้วในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
V_i(t) &= \left(1 - \frac{3\eta_i(t)^2}{l^2} + \frac{2\eta_i(t)^3}{l^3} \right) P_i(t) \\
M_i(t) &= \left(\eta_i(t) - \frac{2\eta_i(t)^2}{l} + \frac{\eta_i(t)^3}{l^2} \right) P_i(t) \\
V_{i+1}(t) &= \left(\frac{3\eta_i(t)^2}{l^2} - \frac{2\eta_i(t)^3}{l^3} \right) P_i(t) \\
M_{i+1}(t) &= \left(\frac{\eta_i(t)^3}{l^2} - \frac{\eta_i(t)^2}{l} \right) P_i(t)
\end{aligned} \tag{2.24}$$

โดยที่

$V_i(t), V_{i+1}(t)$ คือ แรงกระทำในแนวดิ่งของข้อที่ i^{th} และ $i+1^{th}$ ของชิ้นส่วนตามลำดับ

$M_i(t), M_{i+1}(t)$ คือ โมเมนต์ดัดของข้อที่ i^{th} และ $i+1^{th}$ ของชิ้นส่วนตามลำดับ

จากสมการข้างต้น ฟังก์ชันพื้นฐาน (shape function) ของชิ้นส่วนที่ j^{th} ที่เปลี่ยนแรงกระทำภายนอกเป็นแรงที่ข้อสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{H}_j = \left\{ \left[1 - 3\left(\frac{\eta}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{\eta}{l}\right)^3 \right] \left[\eta\left(\frac{\eta}{l} - 1\right)^2 \right] \left[3\left(\frac{\eta}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{\eta}{l}\right)^3 \right] \left[\eta\left(\frac{\eta}{l}\right)^2 - \frac{\eta}{l} \right] \right\}^T \tag{2.25}$$

โดยที่ฟังก์ชันพื้นฐานของแรงกระทำภายนอกในพิกัดคลอบลูม (global external load shape function) สมการที่ 2.25 สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$\mathbf{H}_c = \left\{ \begin{array}{ccccccc} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{H}_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{H}_i & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \mathbf{H}_{N_p} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{array} \right\}^T \tag{2.26}$$

โดยที่ \mathbf{H}_c คือ เมทริกซ์ขนาด $NN \times N_p$ โดยที่สมาชิกในเมทริกซ์เป็นศูนย์ ยกเว้นที่องค์ประกอบที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ข้อของชิ้นส่วนคนที่มีแรงกระทำ

NN คือ จำนวนขององศาเสรีของสะพานภายหลังจากการพิจารณาสถานะเงื่อนไขขอบเขต

และ N_p คือ จำนวนของแรงกระทำภายนอก

จากสมการที่ 2.26 แรงปฏิกริยาระหว่างสะพาน และรถบรรทุกสามารถแปลงเป็นแรงกระทำที่ขั้ว โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ขั้ว (nodal load) และ แรงในพิกัดคดลอบคลุม (global load) ดังแสดง

$$\mathbf{P}_b(t) = \mathbf{H}_c(x(t)) \cdot \mathbf{P}_{int}(t) \quad (2.27)$$

โดยที่ $\mathbf{P}_{int}(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_{N_p}(t)\}^T \quad (2.28)$

และ $\mathbf{P}_b(t)$ คือ เวกเตอร์แรงที่ขั้วของสะพาน
 $\mathbf{H}_c(x(t))$ คือ เวกเตอร์แปลงแรงภายนอกเป็นแรงที่ขั้ว
 $\mathbf{P}_{int}(t)$ คือ เวกเตอร์แรงปฏิกริยาระหว่างสะพาน-รถบรรทุก ที่สอดคล้องกับจำนวนเพลลาของรถบรรทุก

ดังนั้น สมการเคลื่อนที่ของสะพานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{R}(t) = \mathbf{H}_c(x(t)) \mathbf{P}_{int}(t) \quad (2.29)$$

2.1.3 การปรับปรุงสติฟเนสเมทริกซ์สำหรับสะพานแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2.3 ระบบรถบรรทุก-สะพานของสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง

ในกรณีที่สะพานมีลักษณะเป็นสะพานต่อเนื่อง สติฟเนสของจุดรองรับจะมีค่าระหว่างสติฟเนสของจุดรองรับแบบข้อหมุน (hinge support) กับสติฟเนสของจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed support) และค่าสติฟเนสที่ปลายสะพานทั้งสองข้างอาจมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นเราจะจำลองสะพานด้วยแบบจำลองของคานที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนสปริง (rotational spring) ซึ่งมีค่าสติฟเนสของการหมุน (rotational stiffness) ที่ฐานรองรับเท่ากับ k_1 , k_2 , k_3 และ k_4 ตามลำดับ ซึ่งแทนที่ค่าสติฟเนสที่ปลายของสะพาน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองคานสำหรับสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง

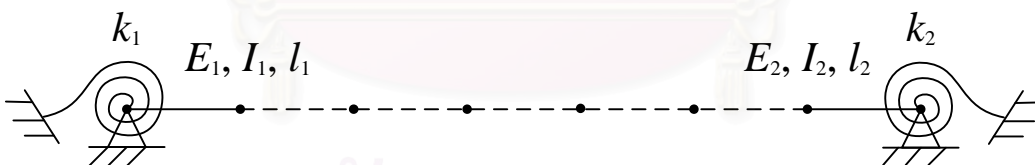
จากแบบจำลองคานในรูปที่ 2.4 เมื่อทำการปรับเทียบ (calibrate) เพื่อหาค่า \$k_1\$, \$k_2\$, \$k_3\$ และ \$k_4\$ ได้แล้ว ก็จะสามารถวิเคราะห์หาค่าของคานตามทฤษฎีไฟไนต์อีลีเมนต์และนำไปใช้หาค่าน้ำหนักบรรทุกได้ตามปกติ

การสร้างแบบจำลองสะพานด้วยชิ้นส่วนคานที่มีจุดรองรับแบบข้อหมุนสปริง ซึ่งมีค่าสติเฟเนสที่ปลายทั้งสองข้าง จะทำโดยการปรับแก้สติเฟเนสเมทริกซ์ $[K]$ ของโครงสร้างที่จะนำไปแทนค่าในสมการเคลื่อนที่

จากสติเฟเนสเมทริกซ์ของชิ้นส่วนคานของออยเลอร์-เบอร์นูลลี ดังสมการที่ 2.13

$$\mathbf{K}^e = \frac{E_e I_e}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

ในการคิดผลของจุดรองรับแบบข้อหมุนสปริง เราจะให้ชิ้นส่วนสปริงเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำที่หัวด้วยแรงกระทำแบบโมเมนต์ดัดเท่านั้น ซึ่งจะมีค่าสติเฟเนสที่ปลายเท่ากับ \$k_1\$ หรือ \$k_2\$ ดังนั้นหากชิ้นส่วนคานที่มีจุดรองรับข้างหนึ่งเป็นข้อหมุนสปริงดังรูปที่ 2.5 จะได้สติเฟเนสเมทริกซ์ของชิ้นส่วนคานชิ้นนี้ดังนี้



รูปที่ 2.5 ชิ้นส่วนคานที่มีจุดรองรับข้างหนึ่งเป็นข้อหมุนสปริง

ชิ้นส่วนคานด้านซ้าย

$$\mathbf{K}^1 = \frac{E_1 I_1}{l_1^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_1 & -12 & 6l_1 \\ 6l_1 & \left(4l_1^2 + \frac{k_1 l_1^3}{E_1 I_1} \right) & -6l_1 & 2l_1^2 \\ -12 & -6l_1 & 12 & -6l_1 \\ 6l_1 & 2l_1^2 & -6l_1 & 4l_1^2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

ชิ้นส่วนคานด้านขวา

$$\mathbf{K}^2 = \frac{E_2 I_2}{l_2^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_2 & -12 & 6l_2 \\ 6l_2 & 4l_2^2 & -6l_2 & 2l_2^2 \\ -12 & -6l_2 & 12 & -6l_2 \\ 6l_2 & 2l_2^2 & -6l_2 & \left(4l_2^2 + \frac{k_2 l_2^3}{E_2 I_2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.6 รูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองสะพาน (แสดงเฉพาะสะพานช่วงที่ 1)

จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ หากเราจำลองสะพานด้วยการแบ่งชิ้นส่วนคานออกเป็นจำนวน n ชิ้นส่วนดังรูปที่ 2.6 มีคุณสมบัติของหน้าตัดและวัสดุ คือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของสะพาน (I) เช่นเดียวกัน และแบ่งความยาวช่วงแต่ละชิ้นส่วนเท่า ๆ กัน (l) โดยให้ชิ้นส่วนปลายด้านซ้ายสุดและขวาสุดเป็นชิ้นส่วนที่ 1 และชิ้นส่วนที่ n ตามลำดับ จะได้สติฟเนสเมทริกซ์ของชิ้นส่วนแรกและชิ้นส่วนสุดท้ายดังนี้

ชิ้นส่วนแรก

$$\mathbf{K}^1 = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & \left(4l^2 + \frac{k_1 l^3}{EI}\right) & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (2.33)$$

ชิ้นส่วนสุดท้าย

$$\mathbf{K}^n = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & \left(4l^2 + \frac{k_2 l^3}{EI}\right) \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad (2.34)$$

ดังนั้นเราจะสามารถสร้างสติฟเนสเมทริกซ์รวมของโครงสร้างสะพานช่วงที่ 1 ได้จากการรวม (assembly) สติฟเนสเมทริกซ์ของแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน โดยที่ชิ้นส่วนแรกจะมีสติฟเนสเมทริกซ์ดังสมการที่ 2.33 ชิ้นส่วนสุดท้ายดังสมการที่ 2.34 และชิ้นส่วนที่เหลือในช่องกลางก็ใช้สติฟเนสเมทริกซ์ของออยเลอร์-เบอร์นูลลีตามปกติ และนำสติฟเนสเมทริกซ์ทุก ๆ ชิ้นส่วนมารวมกันตามหลักสติฟเนสโดยตรง (direct stiffness) ก็จะได้สติฟเนส เมทริกซ์รวม โดยที่สติฟเนสเมทริกซ์รวมของทุก ๆ n ชิ้นส่วนที่ได้ จะเป็นเมทริกซ์ที่มีมิติเท่ากับ $(2n+2) \times (2n+2)$ ดังนี้

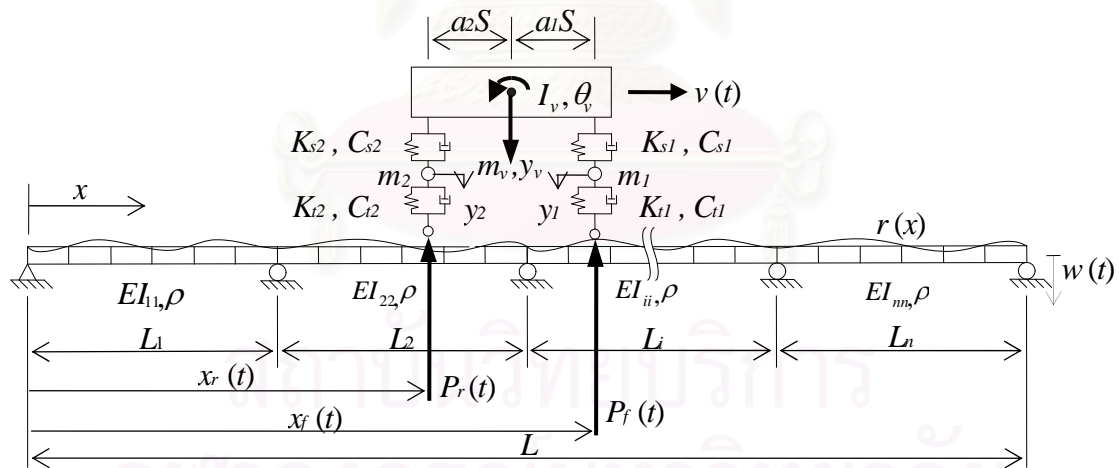
$$[\mathbf{K}]_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^1 & & & \\ & \mathbf{K}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{K}^n \end{bmatrix}_{(2n+2) \times (2n+2)} \quad (2.35)$$

โดยที่สติฟเนสเมทริกซ์รวมที่ได้จะเป็นสติฟเนสเมทริกซ์ของสะพานต่อเนื่องช่วงที่ 1 ซึ่งในการวิเคราะห์ต้องนำโครงสร้างของสะพานทั้ง 3 ช่วงมารวมกัน ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & & \\ & \mathbf{K}_2 & \\ & & \mathbf{K}_3 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

จากนั้นก็ให้นำสติฟเนสเมทริกซ์ไปแทนค่าในสมการเคลื่อนที่ในสมการที่ 2.29 และนำไปสู่ขั้นตอนการหาน้ำหนักตามปกติ

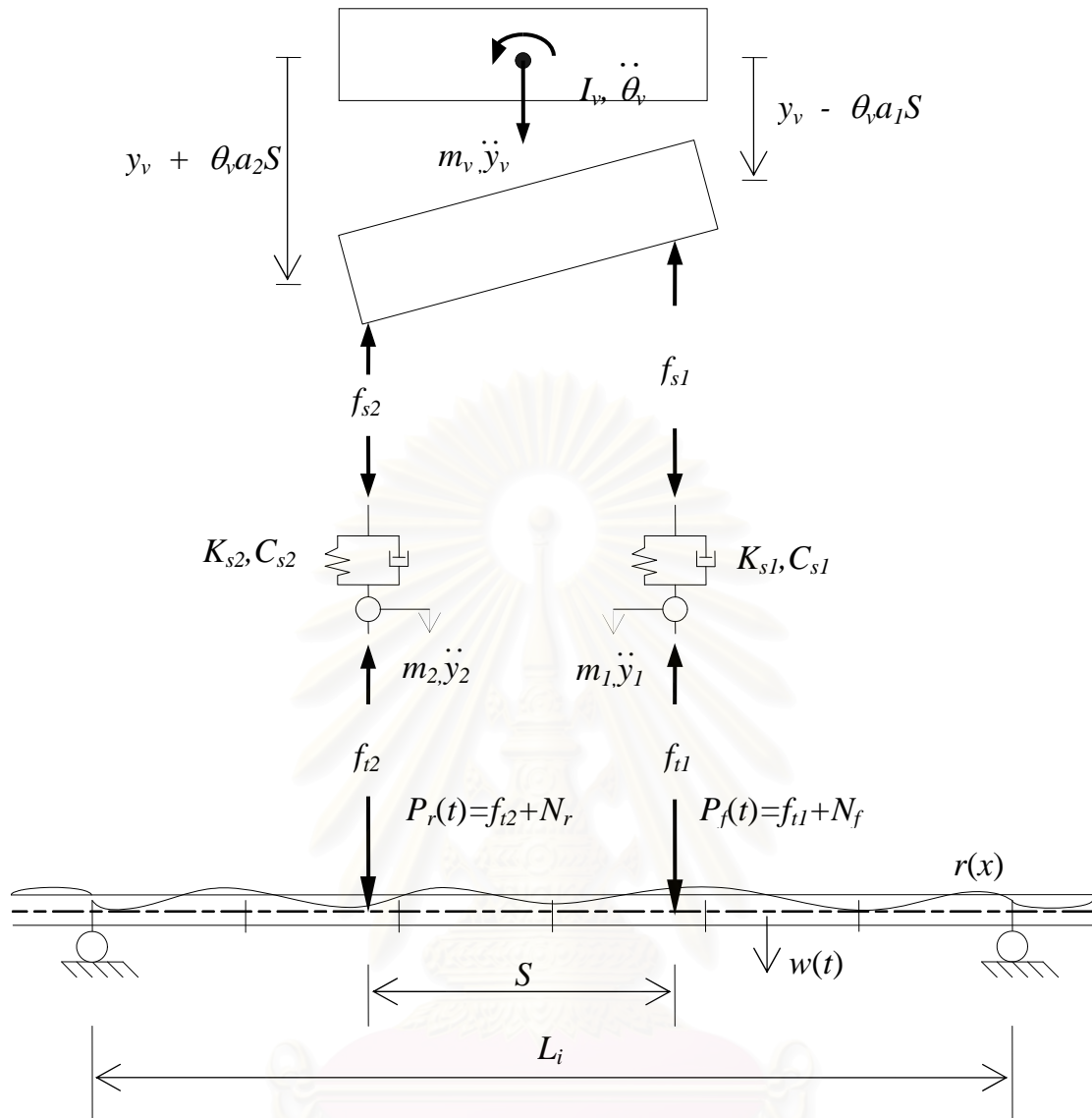
2.1.4 แบบจำลองและการสร้างสมการการระจัดของรถบรรทุก



รูปที่ 2.7 ระบบรถบรรทุก-สะพานของสะพานต่อเนื่อง n ช่วง

รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองรถบรรทุก-สะพาน ซึ่งรถบรรทุกแล่นข้ามสะพานด้วยความเร็ว $v(t)$ แบบจำลองรถบรรทุกมี 4 องศาเสรีประกอบด้วย 3 องศาเสรีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งคือ การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเพลหน้า, เพลหลัง และ มวลของรถ และ 1 องศาเสรีการเคลื่อนที่แบบหมุนของมวล โดยที่ สมการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ ระบบสมการพลศาสตร์ของรถบรรทุกในแต่ละองศาเสรีดังแสดงในรูป 2.8

โดยที่	m_v	คือ มวลของรถบรรทุก
	I_v	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยมวลหมุนของรถบรรทุก
	m_1	คือ มวลของชุดกันสะเทือนเพลาหน้า
	m_2	คือ มวลของชุดกันสะเทือนเพลาหลัง
	K_{s1}, K_{s2}	คือ สติเฟเนสของชุดกันสะเทือนเพลาหน้าและหลัง
	C_{s1}, C_{s2}	คือ ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลาหน้าและหลัง
	K_{t1}, K_{t2}	คือ สติเฟเนสของชุดล้อสัมผัสพื้นหน้าและหลัง
	C_{t1}, C_{t2}	คือ ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสพื้นหน้าและหลัง
	S	คือ ระยะเพลา
	L	คือ ความยาวช่วงของสะพาน
	$x_f(t), x_r(t)$	คือ ตำแหน่งของเพลาหน้าและหลังที่เวลา t ใดๆ
	$P_f(t), P_r(t)$	คือ แรงของเพลาหน้าและหลังที่เวลา t ใดๆ
	v	คือ ความเร็วรถบรรทุก
	θ_v	คือ การหมุนของมวลรถบรรทุก
	y_v	คือ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของรถบรรทุก
	y_1, y_2	คือ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเพลาหน้าและหลัง
	$w(t)$	คือ การแอ่นตัวพลศาสตร์ในแนวตั้งของรถบรรทุก
	$r(x)$	คือ ความขรุขระของพื้นถนนที่ตำแหน่ง x
	a_1, a_2	คือ อัตราส่วนศูนย์กลางของรถบรรทุกของเพลาหน้าและเพลาหลัง



รูปที่ 2.8 แผนภาพอิสระของระบบรถบรรทุก-สะพาน

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่งของมวลรถบรรทุก

$$\sum F = m_v \ddot{y}_v \quad ; \quad -f_{s1} - f_{s2} = m_v \ddot{y}_v \tag{2.37}$$

โดยที่

$$f_{s1} = K_{s1}(y_v - \theta_v a_1 S - y_1) + C_{s1}(\dot{y}_v - \dot{\theta}_v a_1 S - \dot{y}_1)$$

$$f_{s2} = K_{s2}(y_v + \theta_v a_2 S - y_2) + C_{s2}(\dot{y}_v + \dot{\theta}_v a_2 S - \dot{y}_2)$$

แทนค่า f_{s1}, f_{s2} ลงในสมการที่ 2.37 ได้สมการสมดุลของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของรถบรรทุก

$$\begin{aligned}
& m_v \ddot{y}_v + (C_{s1} + C_{s2}) \dot{y}_v + (K_{s1} + K_{s2}) y_v \\
& + (-C_{s1} a_1 S + C_{s2} a_2 S) \dot{\theta}_v + (-K_{s1} a_1 S + K_{s2} a_2 S) \theta_v \\
& + (-C_{s1}) \dot{y}_1 + (-K_{s1}) y_1 + (-C_{s2}) \dot{y}_2 + (-K_{s2}) y_2 = 0
\end{aligned} \tag{2.38}$$

พิจารณาการหมุนของมวลที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง

$$\sum M_c = I_v \ddot{\theta}_v \quad ; \quad f_{s1} a_1 S - f_{s2} a_2 S = I_v \ddot{\theta}_v \tag{2.39}$$

แทนค่า f_{s1}, f_{s2} ลงในสมการที่ 2.38 ได้สมการสมดุลของการเคลื่อนที่แบบหมุนของรถบรรทุก

$$\begin{aligned}
& I_v \ddot{\theta}_v + (-C_{s1} a_1 S + C_{s2} a_2 S) \dot{y}_v + (-K_{s1} a_1 S + K_{s2} a_2 S) y_v \\
& + (C_{s1} a_1^2 S^2 + C_{s2} a_2^2 S^2) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1^2 S^2 + K_{s2} a_2^2 S^2) \theta_v \\
& + (C_{s1} a_1 S) \dot{y}_1 + (K_{s1} a_1 S) y_1 + (-C_{s2} a_2 S) \dot{y}_2 + (-K_{s2} a_2 S) y_2 = 0
\end{aligned} \tag{2.40}$$

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่งของมวล m_1 (ส่วนของล้อหน้า)

$$\sum F = m_1 \ddot{y}_1 \quad ; \quad f_{s1} - f_{t1} = m_1 \ddot{y}_1 \tag{2.41}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
f_{t1} &= K_{t1} (y_1 - \Delta_1) + C_{t1} (\dot{y}_1 - \dot{\Delta}_1) \\
\Delta_1 &= (w_1(x_f(t), t) + r(x_f(t))) \\
\dot{\Delta}_1 &= (\dot{w}_1(x_f(t), t) + \dot{r}(x_f(t)))
\end{aligned} \tag{2.42}$$

แทนค่า f_{s1}, f_{t1} ลงในสมการที่ 2.41 ได้สมการสมดุลของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวล m_1

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{y}_1 + (-C_{s1}) \dot{y}_v + (-K_{s1}) y_v + (C_{s1} a_1 S) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1 S) \theta_v \\
& + (C_{s1}) \dot{y}_1 + (K_{s1}) y_1 = -f_{t1}
\end{aligned} \tag{2.43}$$

พิจารณาสมมูลย์ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวล m_2 (ส่วนของล้อหลัง)

$$\sum F = m_2 \ddot{y}_2 \quad ; \quad f_{s2} - f_{t2} = m_2 \ddot{y}_2 \quad (2.44)$$

โดยที่

$$f_{t2} = K_{t2}(y_2 - \Delta_2) + C_{t2}(\dot{y}_2 - \dot{\Delta}_2)$$

$$\Delta_2 = (w_2(x_r(t), t) + r(x_r(t))) \quad (2.45)$$

$$\dot{\Delta}_2 = (\dot{w}_2(x_r(t), t) + \dot{r}(x_r(t)))$$

แทนค่า f_{s2}, f_{t2} ลงในสมการที่ 2.44 ได้สมการสมมูลย์ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวล m_2

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{y}_2 + (-C_{s2})\dot{y}_v + (-K_{s2})y_v + (-C_{s2}a_2S)\dot{\theta}_v + (-K_{s2}a_2S)\theta_v \\ + (C_{s2})\dot{y}_2 + (K_{s2})y_2 = -f_{t2} \end{aligned} \quad (2.46)$$

ดังนั้นสมการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้โดยใช้สมการที่ 2.38, 2.40, 2.43 และ 2.46 ดังนี้

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}(t) = \mathbf{P}_v(t) \quad (2.47)$$

โดยที่

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & (-C_{s1}a_1 + C_{s2}a_2)S & -C_{s1} & -C_{s2} \\ (-C_{s1}a_1 + C_{s2}a_2)S & (C_{s1}a_1^2 + C_{s2}a_2^2)S^2 & C_{s1}a_1S & -C_{s2}a_2S \\ -C_{s1} & C_{s1}a_1S & C_{s1} & 0 \\ -C_{s2} & -C_{s2}a_2S & 0 & C_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & (-K_{s1}a_1 + K_{s2}a_2)S & -K_{s1} & -K_{s2} \\ (-K_{s1}a_1 + K_{s2}a_2)S & (K_{s1}a_1^2 + K_{s2}a_2^2)S^2 & K_{s1}a_1S & -K_{s2}a_2S \\ -K_{s1} & K_{s1}a_1S & K_{s1} & 0 \\ -K_{s2} & -K_{s2}a_2S & 0 & K_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}(t) = \{y_v(t) \quad \theta_v(t) \quad y_1(t) \quad y_2(t)\}^T$$

\mathbf{P}_v คือ พจน์ของแรงประกอบด้วยเวกเตอร์แรงปฏิกิริยา และ เวกเตอร์แรงทางสถิต ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$\mathbf{P}_v(t) = -\begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{int}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_f \\ N_r \end{Bmatrix}$$

โดยที่

$$P_f(t) = (f_{r1}(t) + N_f) = K_{r1}(y_1(t) - \Delta_1(t)) + C_{r1}(\dot{y}_1(t) - \dot{\Delta}_1(t)) + N_f$$

$$P_r(t) = (f_{r2}(t) + N_r) = K_{r2}(y_2(t) - \Delta_2(t)) + C_{r2}(\dot{y}_2(t) - \dot{\Delta}_2(t)) + N_r$$

และ

$$N_f = (m_1 + a_2 m_v)g$$

$$N_r = (m_2 + a_1 m_v)g$$

2.1.5 ความขรุขระของสะพาน

ในงานวิจัยนี้ความขรุขระของผิวถนนได้ใช้สมการในมาตรฐาน ISO 8606 (ISO, 1995) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วรถบรรทุกโดยอธิบายในรูปของ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมความเร็ว (the velocity power spectrum density ; PSD) และ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมระยะทาง (PSD) ซึ่งรูปแบบทั่วไปของค่า PSD ของระยะทางของความขรุขระพื้นผิวถนนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_d(f) = S_d(f_0) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha} \quad (2.48)$$

โดยที่ f_0 คือความถี่อ้างอิง (0.1 รอบ/เมตร)

α คือเลขยกกำลังของ PSD

f คือความถี่ของความขรุขระ (รอบ/เมตร)

สมการที่ 2.48 ให้ค่าประมาณระดับความขรุขระของถนนจากค่า $S_d(f_0)$ ในรูปแบบสะพานนี้ (สะพาน Type B) ใช้สมมติฐานค่า PSD ของความเร็วมีค่าคงที่ และ ค่า $\alpha = 2$ นอกจากนี้มาตรฐาน ISO ยังสามารถให้ค่า PSDs สำหรับประเภทถนนที่ต่างกัน

จากมาตรฐาน ISO นี้, ความขรุขระของผิวถนนในขอบเขตเวลา (time domain) สามารถจำลองโดย
ประยุกต์การแปลงผกผันฟูเรียร์ (inverse fast Fourier transformation) บน $S_d(f_0)$ ดังนี้

$$r(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4S(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i x + \theta_i) \quad (2.49)$$

โดยที่ $f_i = i\Delta f$ คือค่า f ที่จุดกึ่งกลางของช่วงที่ i

$$\Delta f = 1/(N\Delta)$$

Δ คือระยะห่างช่วงระหว่างพิกัดของแนวพื้นผิว

N คือจำนวนของจุดข้อมูล

θ_i คือเทของมุมเฟสสุ่มอิสระกระจายตัวสม่ำเสมอระหว่าง 0 ถึง 2π

2.1.6 แบบจำลอง และการสร้างสมการการกระจัดของปฏิริยาตอบสนองระหว่างสะพานกับรถบรรทุก

เพื่อที่จะสร้างปฏิริยาระหว่างรถบรรทุก-สะพาน ให้เป็นสมการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุก-สะพาน ทุกองศาเสรีทั้งของรถบรรทุก และ สะพานจะต้องถูกแก้สมการพร้อมๆกัน ดังนั้นสมการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุก-สะพานคือสมการที่รวม มวล, ความหน่วง, สติฟเนส และ พจน์ของแรงปฏิริยา ที่สอดคล้องกับทุกองศาเสรีเข้าด้วยกัน

จากสมการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุก-สะพาน ในกรณีที่มีจำนวนเพลลา $N_p = 2$ สามารถเขียนเวกเตอร์แรงปฏิริยาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{int}(t) &= \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} K_{t1}(y_1(t) - w_1(x_f(t), t) - r(x_f(t))) + C_{t1}(\dot{y}_1(t) - \dot{w}_1(x_f(t), t) - \dot{r}(x_f(t))) \\ K_{t2}(y_2(t) - w_2(x_r(t), t) - r(x_r(t))) + C_{t2}(\dot{y}_2(t) - \dot{w}_2(x_r(t), t) - \dot{r}(x_r(t))) \end{Bmatrix} \\ &\quad + \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) g \\ (m_2 + a_1 m_v) g \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.50)$$

สามารถสังเกตได้ว่าพจน์ของแรงปฏิริยาของสมการที่ 2.50 ประกอบด้วยองศาเสรีทั้งของรถบรรทุก และ สะพาน ดังนั้นสมการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก และ สะพานจะถูกจัดเรียงใหม่ได้ดังนี้

ถ้าค่าผลตอบสนองของสะพาน $\mathbf{R}(t)$ สามารถหามาได้ การแ่นตัวของสะพานที่ตำแหน่ง x และ เวลา t สามารถคำนวณได้จาก

$$w(x, t) = \mathbf{H}_c^T(x(t)) \cdot \mathbf{R}(t) \quad (2.51)$$

ทำการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของการแอ่นตัวของสะพานเทียบกับเวลาได้

$$\dot{w}(x,t) = \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{R}(t) \cdot \dot{x}(t) + \mathbf{H}_c^T(x(t)) \cdot \dot{\mathbf{R}}(t) \quad (2.52)$$

แทนค่าสมการที่ 2.51 และ 2.52 ลงในสมการที่ 2.50 ได้

$$P_f(t) = K_{t1} (y_1(t) - \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \cdot \mathbf{R}(t) - r(x_f(t))) + C_{t1} \left(\dot{y}_1(t) - \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_f(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{R}(t) \cdot v(t) - \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \cdot \dot{\mathbf{R}}(t) \right) + (m_1 + a_2 m_v) g$$

$$P_r(t) = K_{t2} (y_2(t) - \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \cdot \mathbf{R}(t) - r(x_r(t))) + C_{t2} \left(\dot{y}_2(t) - \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_r(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{R}(t) \cdot v(t) - \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \cdot \dot{\mathbf{R}}(t) \right) + (m_2 + a_1 m_v) g \quad (2.53)$$

สมการที่ 2.53 สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังแสดง

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \end{Bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} K_{t1} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) + C_{t1} \cdot v(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_f(t))}{\partial x} \\ K_{t2} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) + C_{t2} \cdot v(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_r(t))}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \{\mathbf{R}(t)\} \\ &\quad - \begin{bmatrix} C_{t1} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \\ C_{t2} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \end{bmatrix} \cdot \{\dot{\mathbf{R}}(t)\} - \begin{bmatrix} K_{t1} \cdot r(x_f(t)) \\ K_{t2} \cdot r(x_r(t)) \end{bmatrix} + \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) \cdot g \\ (m_2 + a_1 m_v) \cdot g \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.54)$$

นำสมการที่ 2.54 ไปแทนในสมการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก (2.47) จะได้สมการสำหรับองศาเสรีของ

รถบรรทุก

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{R}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T - \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{v} \cdot \partial \mathbf{H}^T(x) / \partial x & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix} \quad (2.55)
\end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{v1} &= \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & I_v \end{bmatrix}; \mathbf{M}_{v2} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \\
\mathbf{C}_{v11} &= \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & (-C_{s1}a_1 + C_{s2}a_2)S \\ (-C_{s1}a_1 + C_{s2}a_2)S & (C_{s1}a_1^2 + C_{s2}a_2^2)S^2 \end{bmatrix}; \\
\mathbf{C}_{v12} &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & -C_{s2} \\ C_{s1}a_1S & -C_{s2}a_2S \end{bmatrix}; \\
\mathbf{C}_{v21} &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & C_{s1}a_1S \\ -C_{s2} & -C_{s2}a_2S \end{bmatrix}; \mathbf{C}_{v22} = \begin{bmatrix} C_{s1} & 0 \\ 0 & C_{s2} \end{bmatrix}; \\
\mathbf{K}_{v11} &= \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & (-K_{s1}a_1 + K_{s2}a_2)S \\ (-K_{s1}a_1 + K_{s2}a_2)S & (K_{s1}a_1^2 + K_{s2}a_2^2)S^2 \end{bmatrix}; \\
\mathbf{K}_{v12} &= \begin{bmatrix} -K_{s1} & -K_{s2} \\ K_{s1}a_1S & -K_{s2}a_2S \end{bmatrix}; \\
\mathbf{K}_{v21} &= \begin{bmatrix} -K_{s1} & K_{s1}a_1S \\ -K_{s2} & -K_{s2}a_2S \end{bmatrix}; \mathbf{K}_{v22} = \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 \\ 0 & K_{s2} \end{bmatrix}; \\
\mathbf{C}_t &= \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{t2} \end{bmatrix}; \mathbf{K}_t = \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{t2} \end{bmatrix}; \\
\mathbf{r} &= \begin{Bmatrix} r(x_f(t)) \\ r(x_r(t)) \end{Bmatrix}; \mathbf{Y} = \{y_v \quad \theta_v \quad y_1 \quad y_2\}^T.
\end{aligned}$$

ทำการแทนสมการที่ 2.54 ลงในสมการเคลื่อนที่ของสะพาน 2.29 เหมือนในสมการที่ 2.55 จะได้สมการสำหรับองศาเสรีของสะพาน

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{R}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{C}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
& + \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{K}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} \\
& = \begin{Bmatrix} -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{M}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.56}$$

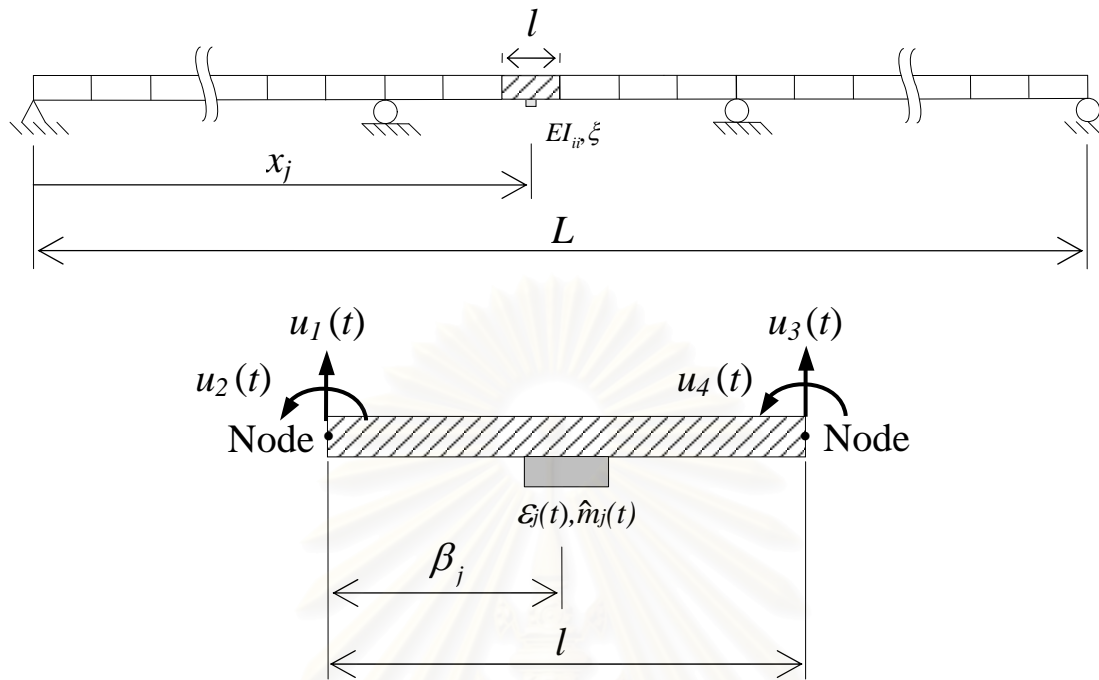
โดยที่ $\mathbf{M}_s = \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) g \\ (m_2 + a_1 m_v) g \end{Bmatrix}$

ทำการรวมสมการที่ 2.55 และ 2.56 สมการเคลื่อนที่ในพิกัดคโลกอบคลุมของระบบปฏิบัติการถาวรทุก-สะพานสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{R}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{C}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
& + \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{K}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) - \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} \\
& = \begin{Bmatrix} -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{M}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.57}$$

สมการ 2.57 คือสมการปฏิบัติการถาวรทุก-สะพาน และ สมการ 2.54 คือสมการของเพลาหน้าและหลัง ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักทางสถิติของรถบรรทุก และ แรงปฏิบัติการระหว่างรถบรรทุกและสะพาน สมการปฏิบัติการถาวรทุก-สะพานสามารถแก้ปัญหาได้ที่ละขั้นๆ โดยวิธีการหาปริพันธ์โดยตรง (the direct integration method) ซึ่งได้แก่วิธีการของนิวมาร์ค เบต้า (the Newmark's β method) หรือ วิธีการแบบแยกโดยการสร้างสเตท-สเปซ (the state-space formulation)

2.2 ผลตอบสนองของสะพานในรูปของความเครียด และโมเมนต์ดัด



รูปที่ 2.9 จุดวัดในชิ้นส่วนคาน

พิจารณาสะพานในชิ้นส่วนซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัด ที่ต้องการทราบค่าผลตอบสนองความเครียด หรือ โมเมนต์ดัดของสะพาน ดังรูปที่ 2.9 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งผิวล่างของชิ้นส่วนคานในรูป สามารถพิจารณาได้จาก

$$\varepsilon_j(x_j, t) = -\gamma_j \left. \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right|_{x=x_j} \quad (2.58)$$

โดยที่ γ_j คือระยะระหว่างผิวล่างของสะพาน กับแกนสะเทินของหน้าตัดคานที่ตำแหน่งวัด x_j แทนค่า $w(x, t)$ ลงในสมการ 2.58 ได้

$$\varepsilon_j(\beta_j, t) = -\left(\frac{\gamma_j}{l^3}\right) \cdot [(12\beta_j - 6l)u_1(t) + l(6\beta_j - 4l)u_2(t) - (12\beta_j - 6l)u_3(t) + l(6\beta_j - 2l)u_4(t)] \quad (2.59)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด $\hat{m}_j(t)$ และความเครียด $\varepsilon_j(t)$ สมการ 2.59 สามารถแปลงกลับเป็นโมเมนต์ดัดได้

$$\hat{m}_j(t) = EI \cdot \frac{\varepsilon_j(t)}{\gamma_j} \quad (2.60)$$

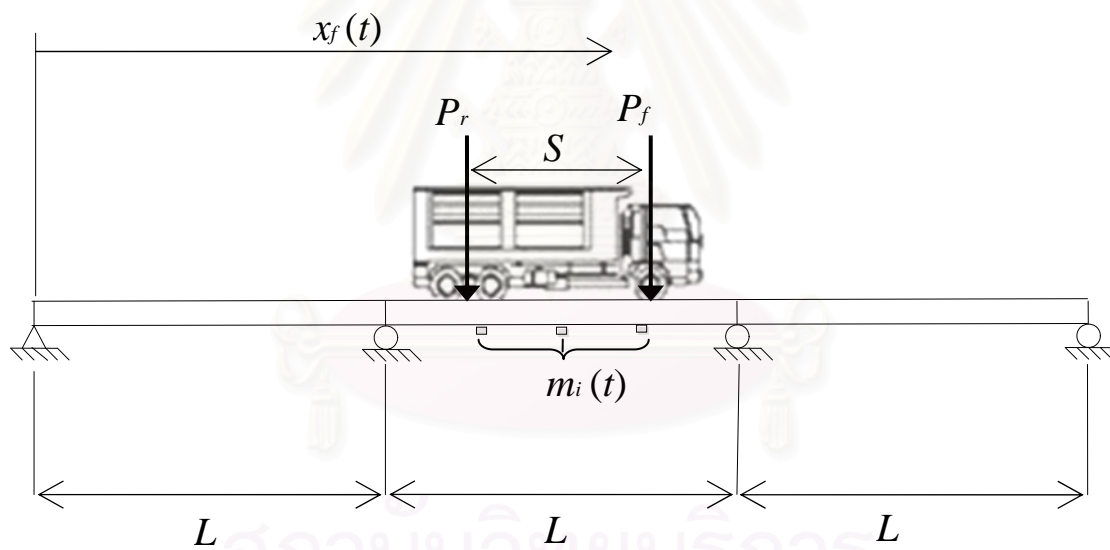
ดังนั้นสมการที่ 2.60 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\hat{m}_j(\beta_j, t) = -\left(\frac{EI}{l^3}\right) \left\{ \begin{matrix} (12\beta_j - 6l) & l(6\beta_j - 4l) & -(12\beta_j - 6l) & l(6\beta_j - 2l) \end{matrix} \right\} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{Bmatrix} \quad (2.61)$$

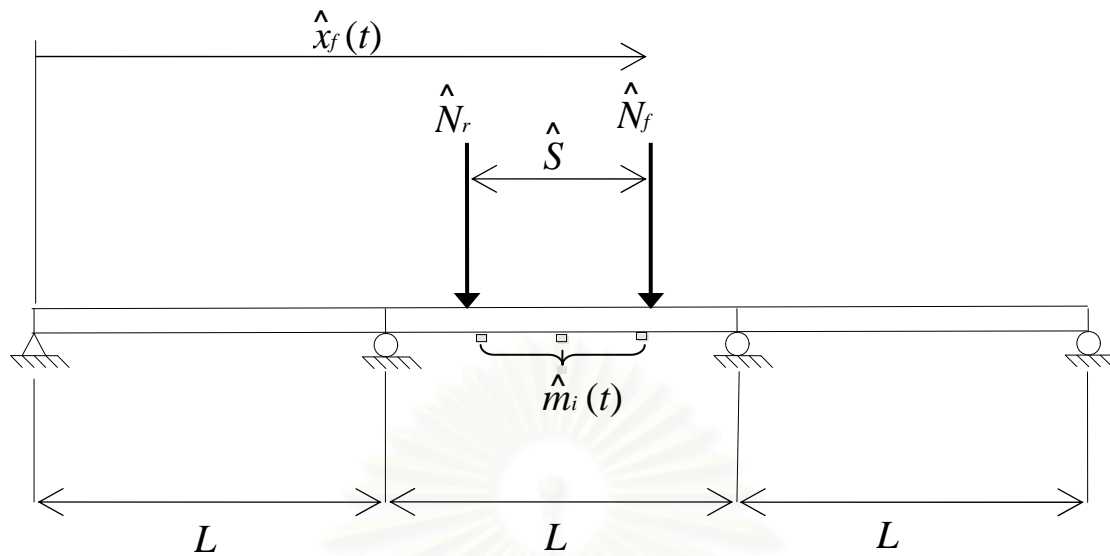
โดยที่ $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ และ $u_4(t)$ คือการเคลื่อนที่ของข้อ (nodal displacement) ที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนคาน และ β_j คือตำแหน่งเฉพาะที่ (local location) ของจุดวัด สามารถพิจารณาได้จาก ตำแหน่งพิกัดคานรวม (global location) x_j

2.3 การคำนวณน้ำหนักรถบรรทุก การหาความเร็วรถ และการหาระยะห่างระหว่างเพล

2.3.1 การหาน้ำหนักสถิติของรถบรรทุกด้วยวิธีการเส้นอิทธิพล (influence line method)



รูปที่ 2.10 การวัดค่าโมเมนต์ตัดของสะพานจากน้ำหนักรถบรรทุกจริง



รูปที่ 2.11 การคำนวณค่าโมเมนต์ดัดของสะพานจากน้ำหนักรถจำลอง ความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลา

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเส้นอิทธิพล (influence line method) ทำการหาน้ำหนักสถิตของรถบรรทุก (\hat{N}_f, \hat{N}_r), ความเร็วรถบรรทุก (\hat{v}) และ ระยะห่างระหว่างเพลา (\hat{S}) โดยการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้ (รูปที่ 2.10) กับค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณ (รูปที่ 2.11) โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดจากการคำนวณเป็นฟังก์ชันของน้ำหนักเพลา ตำแหน่งเพลา และระยะเพลา ซึ่งตำแหน่งเพลาเป็นฟังก์ชันของความเร็วรถบรรทุก และเวลา เวกเตอร์ของโมเมนต์ดัด $\mathbf{Z}(t)$ ที่ตำแหน่งจุดวัด k ของสะพานคือ

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{Bmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ \vdots \\ m_k(t) \end{Bmatrix} \quad (2.62)$$

โดยที่ $m_k(t)$ คือโมเมนต์ดัดที่วัดได้ของสะพานที่ตำแหน่ง x_k ขณะที่เวกเตอร์โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากตัวแปรที่ต้องการคือ $\hat{\mathbf{Z}}(t)$

$$\hat{\mathbf{Z}}(t) = \begin{Bmatrix} \hat{m}_1(t) \\ \hat{m}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{m}_k(t) \end{Bmatrix} \quad (2.63)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) ที่จะถูกหาค่าต่ำสุด (หรือหาค่าเหมาะที่สุด) คือค่ากำลังสองของผลต่างระหว่าง ค่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้ กับค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณ

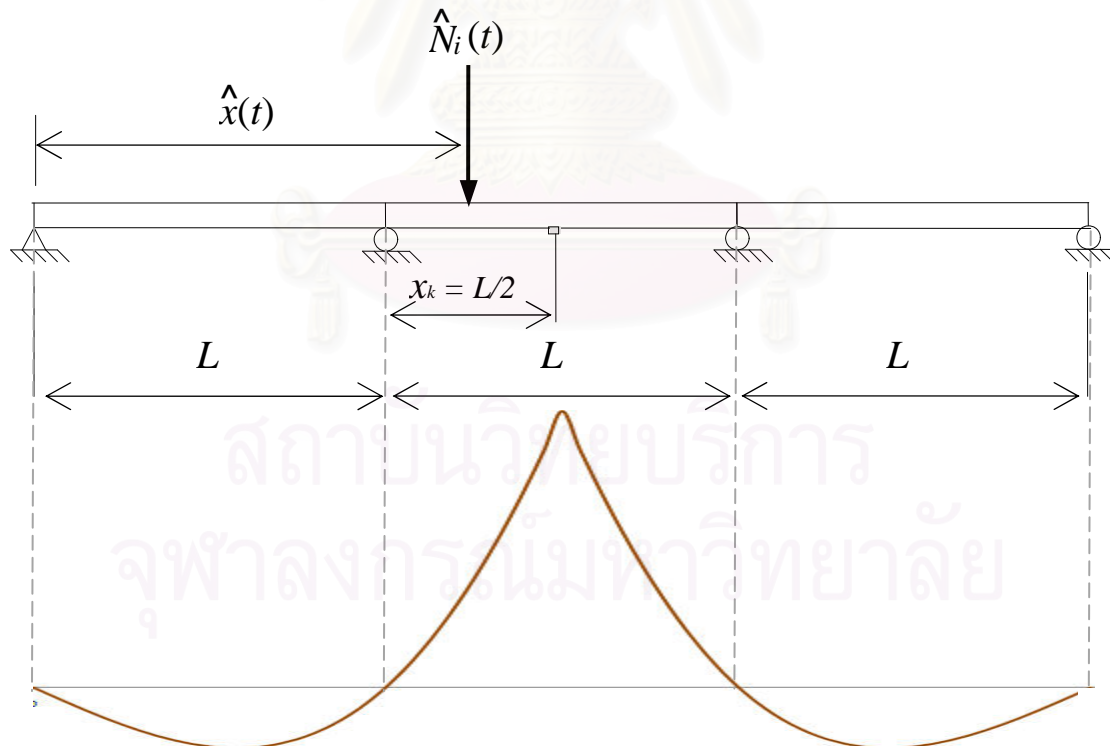
$$E = \sum_{i=1}^N [(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i)^T \mathbf{B} (\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i)] \quad (2.64)$$

โดยที่เวกเตอร์ $\mathbf{Z}_i = \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_k \end{Bmatrix}_i$ และ $\hat{\mathbf{Z}}_i = \begin{Bmatrix} \hat{m}_1 \\ \hat{m}_2 \\ \vdots \\ \hat{m}_k \end{Bmatrix}_i$ จะอยู่ในรูปของพจน์ไม่ต่อเนื่อง (discrete form)

เมทริกซ์ \mathbf{B} เป็นเมทริกซ์น้ำหนัก (weighting matrix) ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติเป็นบวกแน่นอน (positive definite) และ N คือจำนวนของข้อมูล

โมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณในวิธีนี้ ได้ใช้หลักการของเส้นอิทธิพลของน้ำหนักสถิต ซึ่งสมมุติน้ำหนักคงที่ของแรงกระทำเคลื่อนที่ หลักการที่เรียบง่ายของวิธีนี้มีข้อเสียคือไม่สามารถหาน้ำหนักแรงกระทำทางพลศาสตร์ของรถบรรทุกได้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาน้ำหนักของรถบรรทุก 2 เพลาแล่นบนสะพานต่อเนื่อง 3 ช่วง โดยค่าที่วัดได้คือค่าความเครียดของสะพานที่ตำแหน่งท้องถิ่น ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่าโมเมนต์ดัดของสะพานที่ตำแหน่งวัดได้ (สมการ 2.60) ดังนั้นฟังก์ชันเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งวัดได้จึงถูกพิจารณา



รูปที่ 2.12 เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่จุดวัดตำแหน่งกึ่งกลางสะพานช่วงที่ 2

และเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ตัดสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งแรง และความยาวช่วงสะพานได้ดังนี้

$$IL_k(\hat{x}) = \begin{cases} f_1(\hat{x}, L) & , \hat{x} < L \\ f_2(\hat{x}, L) & , L \leq \hat{x} < x_k = 3L/2 \\ f_3(\hat{x}, L) & , x_k \leq \hat{x} < 2L \\ f_4(\hat{x}, L) & , 2L \leq \hat{x} \end{cases} \quad (2.65)$$

โดยที่ \hat{x} คือตำแหน่งของแรงกระทำ
 x_k คือตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัด ซึ่งเท่ากับ $3L/2$ ในรูปที่ 2.12

ดังนั้นค่าโมเมนต์ตัดเมื่อมีน้ำหนักสถิตกระทำ \hat{N} จึงมีค่าเท่ากับ

$$\hat{m}_k(x) = \hat{N} \cdot IL_k(\hat{x}) \quad (2.66)$$

เมื่อมีจำนวนแรงกระทำเท่ากับจำนวนเพลลาของรถบรรทุก (ซึ่งเท่ากับ 2) สามารถรวมค่าโมเมนต์ตัดของสะพานได้โดยใช้หลักการรวมผล (superposition method) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_1(x) \\ \hat{m}_2(x) \\ \vdots \\ \hat{m}_k(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{N}_f \cdot IL_1(\hat{x}_f) + \hat{N}_r \cdot IL_1(\hat{x}_r) \\ \hat{N}_f \cdot IL_2(\hat{x}_f) + \hat{N}_r \cdot IL_2(\hat{x}_r) \\ \vdots \\ \hat{N}_f \cdot IL_k(\hat{x}_f) + \hat{N}_r \cdot IL_k(\hat{x}_r) \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความเร็วรถบรรทุกที่ใช้ในการคำนวณมีค่าคงที่ จึงสามารถเขียนสมการของตำแหน่งเพลลาหน้า ($\hat{x}_f(t)$) และตำแหน่งเพลลาหลัง ($\hat{x}_r(t)$) ในรูปของความเร็รถบรรทุก (\hat{v}), เวลา (t) และระยะห่างระหว่างเพลลา (\hat{S}) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{x}_f &= \hat{v} \cdot t \\ \hat{x}_r &= \hat{v} \cdot t - \hat{S} \end{aligned} \quad (2.68)$$

เขียนสมการ 2.67 ในรูปของความเร็รถบรรทุก (\hat{v}), เวลา (t) และระยะห่างระหว่างเพลลา (\hat{S}) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_1(x) \\ \hat{m}_2(x) \\ \vdots \\ \hat{m}_k(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{N}_f \cdot \mathbf{IL}_1(\hat{v} \cdot t) + \hat{N}_r \cdot \mathbf{IL}_1(\hat{v} \cdot t - \hat{S}) \\ \hat{N}_f \cdot \mathbf{IL}_2(\hat{v} \cdot t) + \hat{N}_r \cdot \mathbf{IL}_2(\hat{v} \cdot t - \hat{S}) \\ \vdots \\ \hat{N}_f \cdot \mathbf{IL}_k(\hat{v} \cdot t) + \hat{N}_r \cdot \mathbf{IL}_k(\hat{v} \cdot t - \hat{S}) \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

ซึ่งเวกเตอร์ทางซ้ายของสมการ 2.69 คือเวกเตอร์โมเมนต์ตัดในสมการที่ 2.63 จากสมการที่ 2.69 นี้จะเห็นว่าค่าโมเมนต์ตัดเป็นฟังก์ชันของน้ำหนักสถิต และความเร็วมอเตอร์ เมื่อพิจารณาบรรทัดที่ 2 เพลาล้นข้ามสะพานต่อเนื่องดังกล่าวจะมีตัวแปรในฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) 4 ตัวแปรคือ น้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้า ($\hat{P}_f(t)$), น้ำหนักเพลาล้น ($\hat{P}_r(t)$), ความเร็วมอเตอร์ (\hat{v}) และ ระยะห่างระหว่างเพลาน้ำหนักหน้า (\hat{S}) ดังนั้นสมการที่ 2.64 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E(\hat{P}_f, \hat{P}_r, \hat{v}, \hat{S}) = \sum_{i=1}^N [(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i(\hat{N}_f, \hat{N}_r, \hat{v}, \hat{S}))^T \mathbf{B}(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i(\hat{N}_f, \hat{N}_r, \hat{v}, \hat{S}))] \quad (2.70)$$

จากสมการ 2.70 จะสามารถหาค่า E ที่ต่ำที่สุดที่จะให้ตัวแปรที่ต้องการออกมาได้

2.3.2 วิธีการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถที่เสนอใช้ในงานวิจัยนี้ (proposed method)

วิธีการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกที่เสนอใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธีการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบใช้ขอบเขต และเงื่อนไขทางกายภาพในการวนรอบการคำนวณ ซึ่งเป็นการหาน้ำหนักโดยใช้คำสั่ง fminunc (find minimum of unconstrained multivariable function) ทำการคำนวณโดยที่มีการกำหนดขอบเขต และเงื่อนไขทางกายภาพเพิ่มเติม เพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ และใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้ขอบเขตทางกายภาพดังกล่าวจะมีทั้งสิ้น 4 ขอบเขตของตัวแปร โดยที่ค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณต้องอยู่ในขอบเขตที่เป็นไปได้อคือ

- 1) ค่าความเร็วที่คำนวณได้ต้องอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 เมตร/วินาที ($0 < \hat{v} \leq 100$ เมตร/วินาที)
- 2) ค่าระยะห่างเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้ต้องอยู่ในช่วง 1 ถึง 20 เมตร ($1 < \hat{S} \leq 20$ เมตร)
- 3) ค่าน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้ต้องอยู่ในช่วง 1 ถึง 20 ตัน ($1 < \hat{N}_f \leq 20$ ตัน)
- 4) ค่าน้ำหนักเพลาล้นที่คำนวณได้ต้องอยู่ในช่วง 1 ถึง 80 ตัน ($1 < \hat{N}_r \leq 80$ ตัน)

นอกจากนี้การวนรอบในการคำนวณยังใช้เงื่อนไขทางกายภาพอีก 2 เงื่อนไขคือ

- 1) อัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำหนักต่อน้ำหนักเพลาล้นต้องมีค่าไม่เกิน 0.65 ($\hat{N}_f / \hat{N}_r < 0.65$) ซึ่งจากงานวิจัยทดลองหาน้ำหนักรถบรรทุกภาคสนามของ ภาณุ พุ่งสุข (2005) ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเพลาน้ำหนักและล้น ที่ได้จากการชั่งน้ำหนักทางสถิตของรถบรรทุกหนัก 20, 23 และ 26 ตัน มีค่า 0.284, 0.234 และ 0.280 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเพลาน้ำหนัก

หน้าและหลังของรถบรรทุกทั่วไปมีค่าต่ำกว่าค่าเงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ จึงสามารถใช้ค่าอัตราส่วน 0.65 เป็นเงื่อนไขดังกล่าวได้

- 2) ค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณต้องมีค่าแตกต่างจาก ค่าความเร็วเปรียบเทียบซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าระยะห่างระหว่างเพลลาที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน 6% โดยที่การคำนวณค่าความเร็วเปรียบเทียบได้แสดงในสมการที่ 2.71 และ 2.72

$$\text{relative error} = \frac{(v_L - \hat{v})}{\hat{v}} \times 100\% \quad (2.71)$$

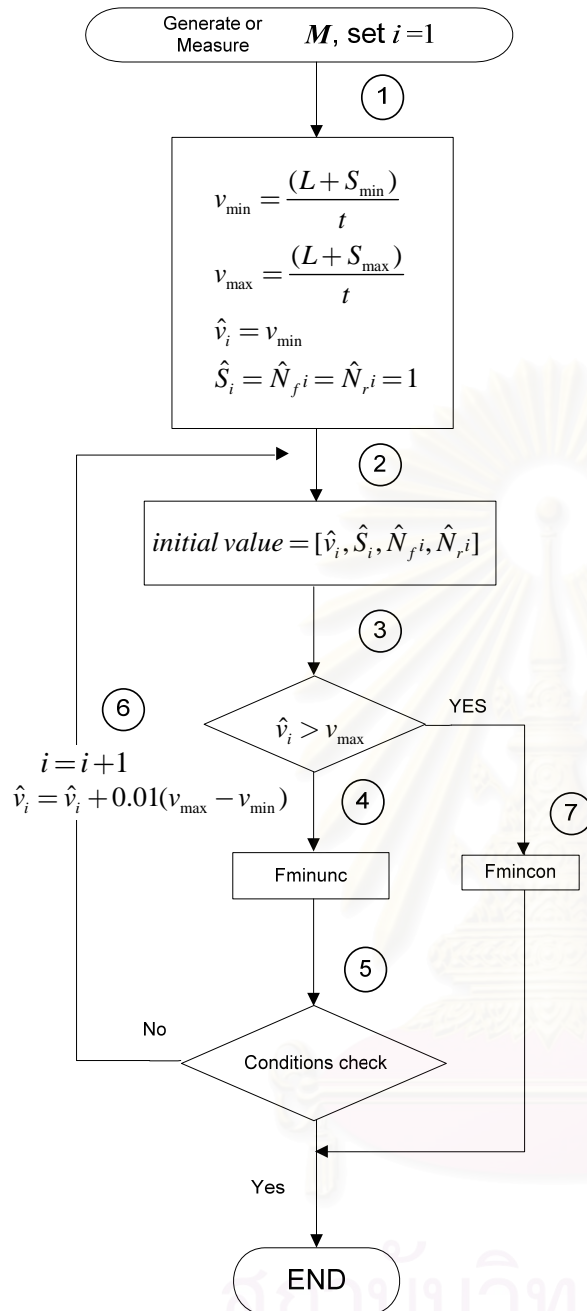
$$v_L = \frac{(L + \hat{S})}{t} \quad (2.72)$$

โดยที่

\hat{v}	คือ ค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณจากคอมพิวเตอร์
v_L	คือ ค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบมีค่าดังสมการที่ 2.72
L	คือ ค่าความยาวของสะพาน
\hat{S}	คือ ค่าระยะห่างเพลลาที่ได้จากการคำนวณจากคอมพิวเตอร์
t	คือ ระยะเวลาที่รถบรรทุกแล่นผ่านสะพาน

ทำการคำนวณโดยใช้ค่าเริ่มต้นซึ่งได้แก่ค่าความเร็ว ค่าระยะห่างเพลลา ค่าน้ำหนักเพลลาหน้า และค่าน้ำหนักเพลลาหลังของรถบรรทุก โดยที่ค่าความเร็วเริ่มต้นกำหนดให้เท่ากับค่าความเร็วน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ในส่วนของค่าระยะห่างเพลลา ค่าน้ำหนักเพลลาหน้า และค่าน้ำหนักเพลลาหลังเริ่มต้นกำหนดให้เท่ากับ 1 ทำการคำนวณในแต่ละรอบ เมื่อเกิดการวนรอบการคำนวณ จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วเริ่มต้นที่ละ 1% ของผลต่างระหว่างความเร็วมากที่สุด กับความเร็วน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ทำการคำนวณวนรอบจนกว่าจะได้คำตอบที่มีค่าตัวแปรต่างๆ อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดให้ หรือเมื่อค่าความเร็วเริ่มต้นมีค่ามากกว่าค่าความเร็วมากที่สุดที่เป็นไปได้ (แต่ค่าตัวแปรยังไม่อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด) จะส่งค่าไปคำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน Fmincon แบบไม่มีเงื่อนไขในการวนรอบ และจะถือว่าคำตอบที่ได้จากการคำนวณนี้ เป็นคำตอบของวิธีหาค่าน้ำหนักแบบมีเงื่อนไขการวนรอบ ซึ่งขั้นตอนการคำนวณหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกแบบใช้เงื่อนไขในการวนรอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. กำหนดค่าความเร็วน้อยที่สุด และค่าความเร็วมากที่สุดที่เป็นไปได้ โดยที่กำหนดให้ค่าระยะห่างเพลาน้อยที่สุดเท่ากับ 2 เมตร และค่าระยะห่างเพลามากที่สุดเท่ากับ 12 เมตร รวมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณต่าง ๆ
2. ให้ค่าเริ่มต้นในการคำนวณ เท่ากับค่าที่กำหนดให้
3. ตรวจสอบเงื่อนไขความเร็วเริ่มต้น ว่ามีค่าเกินกว่าค่าความเร็วมากที่สุดหรือไม่
4. ทำการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุก โดยใช้ฟังก์ชัน Fminunc
5. ตรวจสอบขอบเขต และเงื่อนไขที่ใช้ในการวนรอบได้แก่
 - 1) $0 < \hat{v} \leq 100$ เมตร/วินาที
 - 2) $1 < \hat{S} \leq 20$ เมตร
 - 3) $1 < \hat{N}_f \leq 20$ ตัน
 - 4) $1 < \hat{N}_r \leq 80$ ตัน
 - 5) $\hat{N}_f / \hat{N}_r < 0.65$
 - 6) $relative\ error = \frac{(v_L - \hat{v})}{\hat{v}} \times 100\% < 6\%$
6. ทำการวนรอบการคำนวณเมื่อคำตอบที่ได้ยังไม่อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด ด้วยการเพิ่มค่าความเร็วเริ่มต้นในการคำนวณ เพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป
7. หากคำตอบที่ได้ยังไม่อยู่ในเงื่อนไขในการคำนวณ แต่ความเร็วเริ่มต้นมีค่าเกินกว่าค่าความเร็วมากที่สุดที่เป็นไปได้ ให้คำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน Fmincon แบบไม่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบ และถือว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบของกระบวนการนี้

รูปที่ 2.13 แผนผังการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการวนรอบ

2.3.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization)

2.3.3.1 หลักการทั่วไป

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) เป็นวิธีการหลักในการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (unconstrained optimization) ในการหาค่าเหมาะที่สุด วิธีการ BFGS นี้เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกึ่งนิวตัน (Quasi-Newton algorithm) โดยที่หลักการของวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนามาจากวิธีการของนิวตันซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3.3.2 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธีนิวตัน (Newton's method)

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของนิวตัน เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการหาค่าตอบของสมการหนึ่งตัวแปร และมากกว่าหนึ่งตัวแปร วิธีการนี้สามารถใช้หาค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดสัมพัทธ์ (local minima and local maxima) โดยการพิจารณาว่าถ้าจำนวนจริง x^* เป็นตำแหน่งคงที่ (stationary point) ของฟังก์ชัน $f(x)$ ดังนั้น x^* จะเป็นคำตอบของอนุพันธ์ $f'(x) = 0$ และวิธีการหนึ่งที่จะสามารถหา x^* ได้ คือการใช้วิธีนิวตันหาอนุพันธ์ $f'(x)$ กระจายฟังก์ชัน $f(x)$ ด้วยการกระจายแบบเทย์เลอร์ (Taylor's expansion) ถึงเทอมอนุพันธ์อันดับที่สอง

$$f(x + \delta x) \cong f(x) + f'(x)\delta x + \frac{1}{2} f''(x)\delta x^2 \quad (2.73)$$

ซึ่งสมการ 2.73 จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ δx เป็นคำตอบของสมการ

$$f'(x) + f''(x)\delta x = 0 \quad (2.74)$$

และ $f''(x)$ มีค่าเป็นบวก (positive) ดังนั้นฟังก์ชัน $f(x)$ จะต้องเป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ลำดับที่สองได้ ดังนั้น x_n จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f'(x_n)}{f''(x_n)} \quad \text{โดยที่ } n \geq 0 \quad (2.75)$$

ซึ่งค่า x_{n+1} จะลู่เข้าสู่ค่า x^*

สมการที่ 2.75 นี้สามารถใช้ได้ในสมการหลายตัวแปร โดยการแทนที่อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของฟังก์ชัน $f'(x)$ ด้วย เกรเดียนต์ (gradient), $\nabla f(x)$ และในทำนองเดียวกันทำการแทนที่ส่วนกลับของอนุพันธ์ลำดับที่สองของฟังก์ชัน, $1/f''(x)$ ด้วย เมทริกซ์ผกผันของเฮสเซียนเมทริกซ์ (inverse of the Hessian matrix), $[Hf(x)]^{-1}$ ในสมการที่ 2.75 ได้

$$x_{n+1} = x_n - [Hf(x_n)]^{-1} \nabla f(x_n), n \geq 0 \quad (2.76)$$

โดยทั่วไปแล้ววิธีนิวตันจะถูกดัดแปลงโดยเพิ่มขั้นตอนการคำนวณขนาดเล็ก $0 < \gamma < 1$ แทนที่จะใช้

$$\gamma = 1$$

$$x_{n+1} = x_n - \gamma \cdot [Hf(x_n)]^{-1} \nabla f(x_n), n \geq 0 \quad (2.77)$$

ในความหมายทางเรขาคณิตวิธีนิวตันคือการประมาณ $f(x)$ ในแต่ละขั้นตอน โดยการทำซ้ำโดยฟังก์ชันกำลังสองรอบๆ x_n และทำการคำนวณซ้ำต่อไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่าต่ำสุด หรือสูงสุดโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง (ถ้า $f(x)$ เป็นฟังก์ชันกำลังสอง ค่าต่ำสุดหรือสูงสุดจะถูกหาได้อย่างถูกต้องโดยใช้เพียงขั้นตอนเดียว)

วิธีนิวตันจะลู่เข้าสู่ค่าต่ำสุด หรือค่าสูงสุดลัมพัทธ์เร็วกว่าวิธี gradient descent ซึ่งทุกๆค่าต่ำสุดมีบริเวณใกล้เคียง N ถ้าเราเริ่มต้นโดย $x_0 \in N$ วิธีนิวตันที่ใช้ขนาดขั้นตอน $\gamma = 1$ จะลู่เข้าเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (ถ้าเฮสเซียนเมทริกซ์สามารถหาเมทริกซ์ผกผันได้ในบริเวณนั้น)

$$p_n = x_{n+1} - x_n = -\gamma \cdot [Hf(x_n)]^{-1} \nabla f(x_n) \quad \text{โดยที่ } n \geq 0 \quad (2.78)$$

การหาเมทริกซ์ผกผันของเฮสเซียนเมทริกซ์ใช้กระบวนการทำงานมาก ดังนั้นในสมการเชิงเส้นบ่อยครั้งจะหาคำตอบโดยประมาณ (แต่มีความแม่นยำสูง) เช่นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกึ่งนิวตัน (quasi Newton's method) จะทำการหาเฮสเซียนเมทริกซ์โดยประมาณแทนการคำนวณเฮสเซียนเมทริกซ์จริง

2.3.3.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธีกึ่งนิวตัน (quasi Newton's method)

ในวิธีกึ่งนิวตันเฮสเซียนเมทริกซ์ของฟังก์ชันไม่จำเป็นต้องถูกนำมาพิจารณา เฮสเซียนเมทริกซ์จะถูกหาโดยเวกเตอร์เกรเดียนต์แทน วิธีกึ่งนิวตันจึงใช้หลักการของวิธีซีแคนต์ (secant method) หลักการของวิธีนี้ เริ่มต้นเหมือนหลักการของวิธีนิวตันโดยการกระจายฟังก์ชันด้วยวิธีการกระจายแบบเทย์เลอร์ ถึงเทอมอนุพันธ์อันดับที่สอง

$$f(x_0 + \Delta x) \cong f(x_0) + \nabla f(x_0)^T \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T H \Delta x \quad (2.79)$$

โดยที่ ∇f คือเกรเดียนต์ของฟังก์ชัน $f(x)$

H คือเฮสเซียนเมทริกซ์

ทำการประมาณเกรเดียนต์ด้วยวิธีการกระจายแบบเทย์เลอร์ถึงเทอมอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งได้

$$\nabla f(x_0 + \Delta x) \cong \nabla f(x_0) + H \Delta x \quad (2.80)$$

สมการที่ 2.80 คือสมการซีแคนต์ (secant equation) หาคำตอบของสมการนี้โดย

$$\nabla f(x_0 + \Delta x) = 0 \quad \text{ได้}$$

$$\Delta x_0 = -H^{-1} \nabla f(x_0) \quad (2.81)$$

แต่ H คือตัวแปรไม่ทราบค่า ในปัญหาหนึ่งตัวแปรการหา H โดยใช้วิธีนิวตันก็คือวิธีซีเค็นต์นั่นเอง ในปัญหาหลายตัวแปรการหา H จะมีหลากหลายวิธี โดยทั่วไปเมทริกซ์เริ่มต้นของ H นิยมใช้เมทริกซ์เอกลักษณ์ I ซึ่งบ่อยครั้งจะทำให้คำตอบที่คำนวณได้ลู่เข้าเร็วมาก ตัวแปรไม่ทราบค่า x_k ที่ถูกปรับปรุงค่าจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณแบบนิวตัน โดยการหาเฮสเซียนเมทริกซ์ต่อไป ลำดับการคำนวณของวิธีกึ่งนิวตันสามารถแสดงได้ดังนี้

1. สมมติเมทริกซ์เริ่มต้นของ H เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ $H_1 = I$
2. คำนวณค่า $\Delta x_k = -\alpha_k H_k^{-1} \nabla f(x_k)$ โดยที่ α จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของโวลฟ์ (Wolfe conditions)
3. คำนวณค่า $x_{k+1} = x_k + \Delta x_k$
4. เกรเดียนต์ที่ถูกปรับปรุงค่าใหม่จะถูกหาโดย $\nabla f(x_{k+1})$ และ $y_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k)$
5. เฮสเซียนเมทริกซ์ H_{k+1} จะถูกหาออกมาได้ หรือหาค่าผกผันของเฮสเซียนเมทริกซ์โดยตรง $[Hf(x_n)]_{k+1}^{-1} = H_{k+1}^{-1}$

2.3.3.4 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธี BFGS

วิธี BFGS เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกึ่งนิวตัน ที่ถูกพัฒนาโดย Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno ในปี ค.ศ. 1970 เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เทคนิคไต่เขา (hill-climbing optimization techniques) เพื่อหาตำแหน่งคงที่ซึ่งมีเกรเดียนต์เท่ากับศูนย์ของฟังก์ชัน หลักการของวิธีนี้เริ่มจากพิจารณา Δx_k คือทิศทางของการค้นหาที่ลำดับ k สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.81

$$H_k \Delta x_k = -\nabla f(x_k) \quad (2.82)$$

การค้นหาเชิงเส้นในทิศทาง Δx_k ใช้หาตำแหน่งถัดไป x_{k+1} และแทนที่จะหาเฮสเซียนเมทริกซ์ที่ตำแหน่ง x_{k+1} เฮสเซียนเมทริกซ์จะถูกประมาณโดยการเพิ่ม 2 เมทริกซ์ดังนี้

$$H_{k+1} = H_k + U_k + V_k \quad (2.83)$$

โดยที่ทั้งเมทริกซ์ U_k และ V_k เป็นเมทริกซ์ที่มีหนึ่งแรงค์ ลำดับการคำนวณของวิธี BFGS สามารถแสดงได้ดังนี้

1. สมมติเมทริกซ์เริ่มต้นของ H เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ $H_1 = I$
2. หาค่า Δx_k โดยแก้สมการ $H_k \Delta x_k = -\nabla f(x_k)$
3. ทำการค้นหาเชิงเส้นโดยใช้ค่า α_k ที่เหมาะสมทำการปรับปรุง $x_{k+1} = x_k + \alpha_k \Delta x_k$
4. คำนวณค่า $y_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k)$
5. คำนวณเฮสเซียนเมทริกซ์ในลำดับ $k + 1$ โดยสูตรของ BFGS $H_{k+1} = H_k + (y_k y_k^T) / (y_k^T \Delta x_k) - (H_k \Delta x_k \Delta x_k^T H_k) / (\Delta x_k^T H_k \Delta x_k)$ (2.84)

การลู่เข้าของคำตอบสามารถตรวจสอบได้โดยนอร์มของเกรเดียนต์ $|\nabla f(x_k)|$ ในทางปฏิบัติเฮชเซียนเมทริกซ์เริ่มต้นจะใช้เมทริกซ์เอกลักษณ์ I และในขั้นตอนแรกของการคำนวณรอบถัดไป จะต้องคำนวณเมทริกซ์ผกผันของเฮชเซียนเมทริกซ์ (inverse of the Hessian matrix, H_{k+1}^{-1}) ซึ่งโดยทั่วไปจะประยุกต์ใช้สูตรของเซอร์แมน-มอร์ริสัน (Sherman-Morrison formula) กับสมการที่ 2.84 ได้

$$H_{k+1}^{-1} = H_k^{-1} + (1 + y_k^T H_k^{-1} y_k / \Delta x_k^T y_k) / (\Delta x_k \Delta x_k^T) (\Delta x_k^T y_k) - (\Delta x_k y_k^T H_k^{-1} + H_k^{-1} y_k \Delta x_k^T) / (\Delta x_k^T y_k) \quad (2.85)$$

ในที่สุดช่วงคำตอบที่เชื่อถือได้จะหาได้จากเมทริกซ์ผกผันของเฮชเซียนเมทริกซ์ของการคำนวณรอบสุดท้าย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

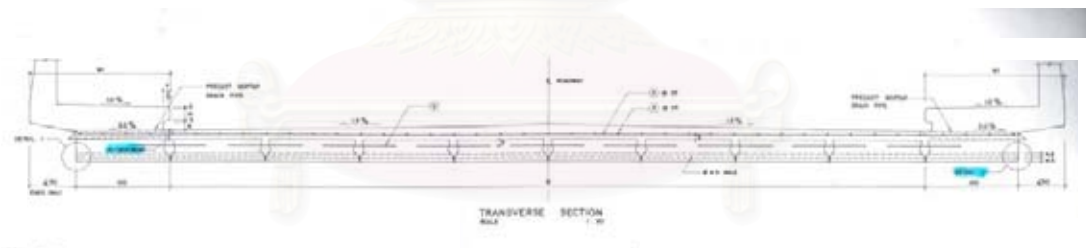
บทที่ 3

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในคอมพิวเตอร์

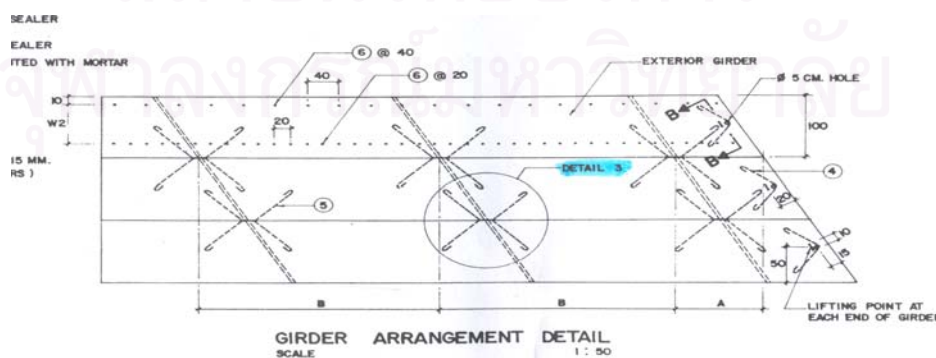
ในบทนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างสะพาน และรถบรรทุก ที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 2 การตรวจสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือตรวจสอบความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองของสะพานที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ กับผลตอบสนองของสะพานที่ได้จากผลเฉลยของสมการคณิตศาสตร์ ส่วนที่สองเป็นการตรวจสอบปฏิกิริยาควบคู่ระหว่างแบบจำลองของสะพานกับแบบจำลองของรถบรรทุก

ในการศึกษาการร่อนน้ำหนักจากแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ในบทที่ 4 ได้ใช้แบบสะพานมาตรฐานของกรมโยธาธิการ โดยมีลักษณะเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) ความยาวช่วงสะพาน 10 เมตร ลักษณะสะพานเป็นแบบคานช่วงเดี่ยว โดยรูปแบบโครงสร้างใช้ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปขนาดกว้าง 1 เมตร วางเรียงกันทับหน้าด้วยคอนกรีต (topping) มีความหนารวม 45 เซนติเมตร กว้าง 10 เมตร โดยคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 70×50 เซนติเมตร² ซึ่งยึดอยู่บนหัวเสาต่อม่อสะพานแบบคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 35×35 เซนติเมตร² แบบแปลนของสะพานได้แสดงในรูปที่ 3.1 และได้แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสะพานที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ในตารางที่ 3.1

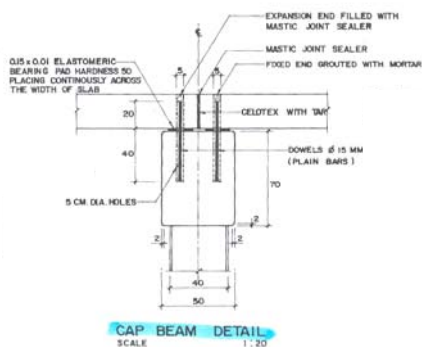
ในส่วนของคุณสมบัติต่างๆ ของรถบรรทุกได้มาจากงานวิจัยของ วุฒิชัย อ่อนนุ่ม (2001) ซึ่งทำการทดสอบการสั่นไหวของรถบรรทุก โดยการติดตั้ง accelerometers ที่ตำแหน่งของโครงสร้างรถ (chassis) แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้อมาวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุก เพื่อนำไปประเมินหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของรถบรรทุก ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 3.2



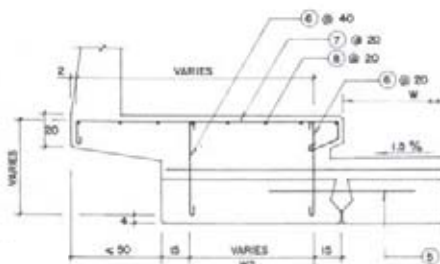
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 แบบมาตรฐานของสะพานในส่วนของ (ก) หน้าตัด (ข) แพลน (ค) ตอม่อ และ (ง) ขอบทาง ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสะพาน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความยาวสะพาน	L	10	เมตร
จำนวนตำแหน่งที่ติดตั้งวัดความเครียด	m	3	ตำแหน่ง
ความถี่ของข้อมูลในการคำนวณ	$sampF$	500	รอบ/วินาที
จำนวนชิ้นส่วนของสะพานที่ถูกแบ่ง	no_ele	50	ชิ้นส่วน
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนคาน คุณสมบัติความเฉื่อยของหน้าตัดสะพาน	EI	1.96×10^9	นิวตัน-เมตร ²
น้ำหนักของสะพานต่อความยาว คุณสมบัติที่หน้าตัดของสะพาน	ρA	10800	กิโลกรัม/เมตร
อัตราส่วนความหน่วงของสะพาน	ξ	0.02	-

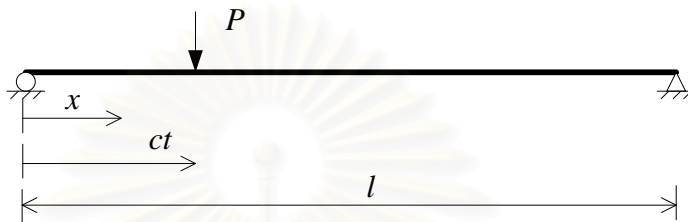
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของรถบรรทุก

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก	g	9.81	เมตร/วินาที ²
โมเมนต์ความเฉื่อยมวลหมุนของรถบรรทุก	I_v	4.87×10^4	กิโลกรัม/เมตร ²
มวลของรถบรรทุก	m_v	23800	กิโลกรัม
ระยะห่างระหว่างเพลลา	S	4.65	เมตร
มวลของชุดกันสะเทือนเพลลาหน้า	m_1	500	กิโลกรัม
มวลของชุดกันสะเทือนเพลลาหลัง	m_2	700	กิโลกรัม
สติเฟนสของชุดกันสะเทือนเพลลาหน้า	K_{s1}	$2 \times 4.75 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
สติเฟนสของชุดกันสะเทือนเพลลาหลัง	K_{s2}	$2 \times 8.49 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
สติเฟนสของชุดล้อสัมผัสเพลลาหน้า	K_{t1}	$2 \times 2.69 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
สติเฟนสของชุดล้อสัมผัสเพลลาหลัง	K_{t2}	$2 \times 6.41 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลลาหน้า	C_{s1}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลลาหลัง	C_{s2}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสเพลลาหน้า	C_{t1}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสเพลลาหลัง	C_{t2}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)

3.1 การตรวจสอบผลตอบสนองของสะพานจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ กับผลเฉลยของสมการคณิตศาสตร์

การตรวจสอบผลตอบสนองเป็นการตรวจสอบความแตกต่างระหว่าง ผลตอบสนองของสะพานที่ได้จากการสังเคราะห์จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ กับผลตอบสนองของสะพานที่ได้จากผลเฉลยของสมการคณิตศาสตร์ โดยที่มีแรงหนึ่งหน่วยเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ผ่านสะพาน ซึ่งผลตอบสนองของสะพานที่นำมาใช้ในการตรวจสอบคือค่าโมเมนต์ดัดที่ระยะของกึ่งกลางสะพาน ($L/2$)

การคำนวณผลเฉลยของสมการคณิตศาสตร์นั้นจะคำนวณจากคานช่วงเดียว มีแรงภายนอกกระทำดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 คานช่วงเดียวรับแรงกระทำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

แรงภายนอกเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาด้วยความเร็วคงที่ c สมการการเคลื่อนที่ของคานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + 2\rho\xi\omega_b \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = \delta(x-ct)P \quad (3.1)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบดังสมการ 3.2

$$w(0,t) = 0 \quad ; \quad w(l,t) = 0 \quad (3.2)$$

$$\left. \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=0} = 0 \quad ; \quad \left. \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=l} = 0$$

และมีเงื่อนไขเริ่มต้นดังสมการ 3.3

$$w(x,0) = 0 \quad ; \quad \left. \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad (3.3)$$

โดยที่ $w(x,t)$ คือ การแอ่นตัวของคานที่ระยะ x และเวลา t

ρ คือ มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาว

ω_b คือ ความถี่ธรรมชาติของคาน

ξ คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วง

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคาน

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

- l คือ ความยาวช่วงคาน
 P คือ แรงที่กระทำต่อคาน
 c คือ ความเร็วของแรงที่เคลื่อนที่
 $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชัน Dirac delta

การแก้สมการที่ 3.1 ใช้วิธีการ integral transformation โดยคูณแต่ละพจน์ของสมการด้วย $\sin \frac{j\pi x}{l}$ แล้วหาปริพันธ์เทียบกับระยะทาง x ตั้งแต่ 0 ถึงความยาว l แล้วจึงใช้คุณสมบัติของ Fourier sine integral แปลงให้สมการที่ 3.1 ไม่อยู่ในรูปของอนุพันธ์ของระยะทาง ความสัมพันธ์ระหว่างการแ่นตัวของคานกับ Fourier integral transformation สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V(j,t) &= \int_0^l w(x,t) \sin \frac{j\pi x}{l} dx, \quad j=1,2,3,\dots \\
 w(x,t) &= \frac{2}{l} \sum_{j=1}^{\infty} V(j,t) \sin \frac{j\pi x}{l}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

โดยที่ $V(j,t)$ คือ integral transformation ของ $w(x,t)$

จากการหาปริพันธ์ของสมการ 3.1 สามารถจัดรูปให้อยู่ในพจน์ของ $V(j,t)$ ได้ดังแสดง

$$\rho \ddot{V}(j,t) + 2\rho\xi\omega_b \dot{V}(j,t) + \frac{j^4\pi^4}{l^4} EIV(j,t) = P \sin \frac{j\pi ct}{l}
 \tag{3.5}$$

โดยที่ $\int_0^l \delta(x-ct) P \sin \frac{j\pi x}{l} dx = P \sin \frac{j\pi ct}{l}$ จากคุณสมบัติของฟังก์ชัน dirac delta

เนื่องจากความถี่ธรรมชาติเชิงโหมดของแต่ละโหมดเท่ากับ

$$\omega_{(j)}^2 = \frac{j^4\pi^4}{l^4} \frac{EI}{\rho}
 \tag{3.6}$$

จัดรูปสมการที่ 3.5 ให้อยู่ในรูปของความถี่ธรรมชาติเชิงโหมด ดังแสดงในสมการที่ 3.7

$$\ddot{V}(j,t) + 2\xi\omega_b \dot{V}(j,t) + \omega_{(j)}^2 V(j,t) = \frac{P}{\rho} \sin j\omega t
 \tag{3.7}$$

โดยที่ $\omega = \frac{\pi c}{l}$

แก่สมการที่ 3.7 ด้วยวิธีการ Laplace-Carson integral transformation โดยการคูณแต่ละพจน์ของสมการด้วย e^{-pt} แล้วหาปริพันธ์เทียบกับเวลา t ตั้งแต่ 0 ถึง ∞ ความสัมพันธ์ของ transformation นี้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.8

$$V^*(j, p) = p \int_0^{\infty} V(j, t) e^{-pt} dt \quad (3.8)$$

$$V(j, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a_0 - i\infty}^{a_0 + i\infty} e^{tp} \frac{V^*(j, p)}{p} dp$$

จากการหาปริพันธ์ของสมการ 3.7 และ ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.8 สามารถจัดรูปให้อยู่ในพจน์ของ $V^*(j, p)$ ได้ดังแสดง

$$p^2 V^*(j, p) + 2\xi\omega_b p V^*(j, p) + \omega_{(j)}^2 V^*(j, p) = \frac{Pj\omega}{\rho} \left(\frac{p}{p^2 + j^2\omega^2} \right) \quad (3.9)$$

แก่สมการที่ 3.9 ได้ผลเฉลยดังนี้

$$V^*(j, p) = \frac{Pj\omega}{\rho} \left(\frac{p}{p^2 + j^2\omega^2} \right) \left(\frac{1}{p^2 + 2\xi\omega_b p + \omega_{(j)}^2} \right) \quad (3.10)$$

แปลงผลเฉลย $V^*(j, p)$ ให้อยู่ในรูปของ $V(j, t)$ และ $w(x, t)$ ด้วยสมการที่ 3.8 และ 3.4 ตามลำดับ โดยผลเฉลยในรูปของ $w(x, t)$ ได้แสดงในสมการที่ 3.11

$$w(x, t) = w_0 \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{1}{j^2(j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2)} \right) \cdot \left[j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha(j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2)}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega'_{(j)} t - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega'_{(j)} t) \right] \cdot \sin \frac{j\pi x}{l} \quad (3.11)$$

โดยที่ $\alpha = \frac{\omega}{\omega_{(1)}} = \frac{cl}{\pi} \left(\frac{\rho}{EI} \right)^{1/2} = \frac{c}{c_{cr}}$

$$\beta = \frac{\xi\omega_b}{\omega_{(1)}} = \frac{\xi\omega_b l^2}{\pi^2} \left(\frac{\rho}{EI} \right)^{1/2} = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{\delta}{2\pi}$$

c_{cr} คือ ความเร็ววิกฤตของคาน

δ คือ logarithmic decrement ของการหน่วงของคาน

เนื่องจาก $M(x,t) = -EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนโมเมนต์ดัดของคานาที่ระยะ $L/2$ เนื่องจากแรง P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ดังนี้

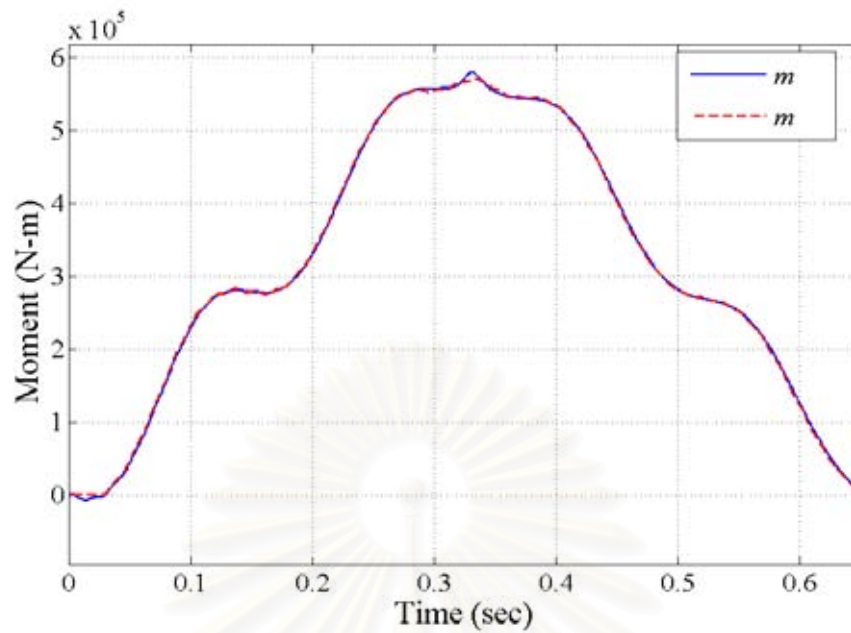
$$M(x,t) = M_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{8j^2}{\pi^2} \sin \frac{j\pi x}{l} \left(\frac{1}{j^2(j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2)} \right) \cdot \left[j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha(j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2)}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega'_{(j)} t - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega'_{(j)} t) \right] \quad (3.12)$$

โดยที่ $M_0 = \frac{Pl}{4}$ คือโมเมนต์สถิตที่ตำแหน่ง $L/2$ เนื่องจากแรง P อยู่ที่ระยะ $L/2$

เมื่อได้ผลการผลเฉลยของค่าโมเมนต์ดัดที่ระยะกึ่งกลางสะพาน ($L/2$) แล้ว ทำการสร้างเส้นอิทธิพล (influence line) ของโมเมนต์ดัดจากสมการดังกล่าว โดยกำหนดให้แรง P เท่ากับน้ำหนักบรรทุก 25 ตัน ถัดมาสร้างสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงเมื่อมีรถบรรทุกหนัก 25 ตัน เคลื่อนที่ข้ามสะพาน พารามิเตอร์ต่างๆ ของรถบรรทุกดัดแปลงจากพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.2 โดยพิจารณาเป็นรถเพลทเดี่ยวเพื่อลดผลทางพลศาสตร์ของเพลทหลังรวมทั้งลดผลของความหน่วง และสติเฟนสของระบบกันสะเทือนทั้งหมดด้วย พารามิเตอร์ของรถบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบผลตอบสนองของสะพานได้แสดงดังตารางที่ 3.3 และการเปรียบเทียบผลตอบสนองได้แสดงในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบผลตอบสนองของสะพาน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความเร็วของรถบรรทุก	c	15	เมตร/วินาที
โมเมนต์ความเฉื่อยมวลหมุนของรถบรรทุก	I_v	4.87×10^4	กิโลกรัม/เมตร ²
มวลของรถบรรทุก	m_v	23800	กิโลกรัม
ระยะห่างระหว่างเพลท	S	4.65	เมตร
มวลของชุดกันสะเทือนเพลทหน้า	m_1	1200	กิโลกรัม
มวลของชุดกันสะเทือนเพลทหลัง	m_2	0	กิโลกรัม
สติเฟนสของชุดกันสะเทือนเพลทหน้า	K_{s1}	0	นิวตัน/เมตร
สติเฟนสของชุดกันสะเทือนเพลทหลัง	K_{s2}	0	นิวตัน/เมตร
สติเฟนสของชุดล้อสัมผัสมวลเพลทหน้า	K_{t1}	0	นิวตัน/เมตร
สติเฟนสของชุดล้อสัมผัสมวลเพลทหลัง	K_{t2}	0	นิวตัน/เมตร
ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลทหน้า	C_{s1}	0	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลทหลัง	C_{s2}	0	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสมวลเพลทหน้า	C_{t1}	0	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสมวลเพลทหลัง	C_{t2}	0	นิวตัน/(เมตร/วินาที)



รูปที่ 3.3 โมเมนต์ดัดจากผลเฉลย, $m_{\text{exact}}(t)$ (เส้นประสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_{\text{gen}}(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/2$

จากรูปเปรียบเทียบจะพบว่าค่าโมเมนต์ดัดจากแบบจำลอง และโมเมนต์ดัดจากผลเฉลยทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกันมาก แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการศึกษาได้

3.2 การตรวจสอบปฏิริยาควบคุมระหว่างแบบจำลองสะพานกับแบบจำลองรถบรรทุก

การตรวจสอบแบบจำลองในหัวข้อนี้ เป็นการตรวจสอบปฏิริยาควบคุมระหว่างแบบจำลองสะพาน กับแบบจำลองรถบรรทุก จากการหาผลตอบสนองของสะพาน และรถบรรทุกด้วยวิธีการหาปริพันธ์โดยตรงจากสมการเคลื่อนที่แบบควบคุม (สมการที่ 2.57 หัวข้อที่ 2.1.6) ได้ผลตอบสนองของทั้งสะพาน และของรถบรรทุกในช่วงเวลาต่างๆ พร้อมๆกัน ในการตรวจสอบนำผลตอบสนองของสะพาน และของรถบรรทุก มาสร้างแรงในแบบจำลองของสะพาน และแบบจำลองรถบรรทุกแยกออกจากกัน การสร้างแรงจากผลตอบสนองในแบบจำลองรถบรรทุกสร้างโดยการแทนค่าผลตอบสนองลงในสมการที่ 3.13 และ 3.14 ดังแสดง

$$m_1 \ddot{y}_1 + (-C_{s1}) \dot{y}_v + (-K_{s1}) y_v + (C_{s1} a_1 S) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1 S) \theta_v \quad (3.13)$$

$$+(C_{s1}) \dot{y}_1 + (K_{s1}) y_1 = -f_{11}$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + (-C_{s2}) \dot{y}_v + (-K_{s2}) y_v + (-C_{s2} a_2 S) \dot{\theta}_v + (-K_{s2} a_2 S) \theta_v \quad (3.14)$$

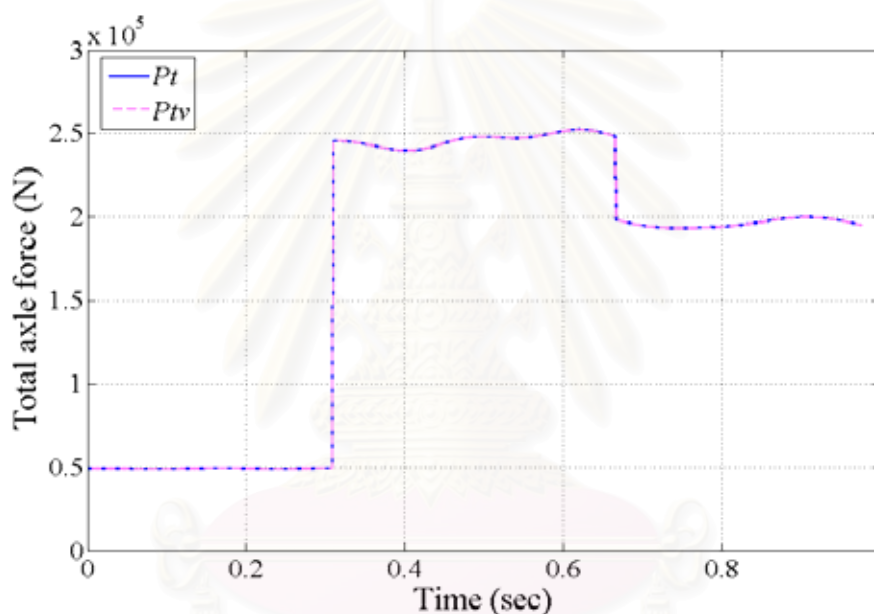
$$+(C_{s2}) \dot{y}_2 + (K_{s2}) y_2 = -f_{12}$$

โดยที่

$$P_f(t) = (f_{r1}(t) + N_f) \quad (3.15)$$

$$P_r(t) = (f_{r2}(t) + N_r)$$

ผลตอบสนองที่ใช้ในการตรวจสอบได้จากการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์สร้างกรณีรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยมีพารามิเตอร์ของสะพานดังแสดงในตารางที่ 3.1 และพารามิเตอร์ของรถบรรทุกแสดงในตารางที่ 3.2 โดยที่รถบรรทุกแล่นด้วยความเร็ว 15 เมตร/วินาที (54 กม.ชม.) ถัดมานำผลตอบสนองของรถบรรทุกแทนค่าลงในสมการที่ 3.13-3.15 จะได้แรงที่กระทำต่อล้อรถบรรทุก รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบแรงที่ล้อรถบรรทุกโดยการคำนวณจากแบบจำลองควบคุม และคำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุก

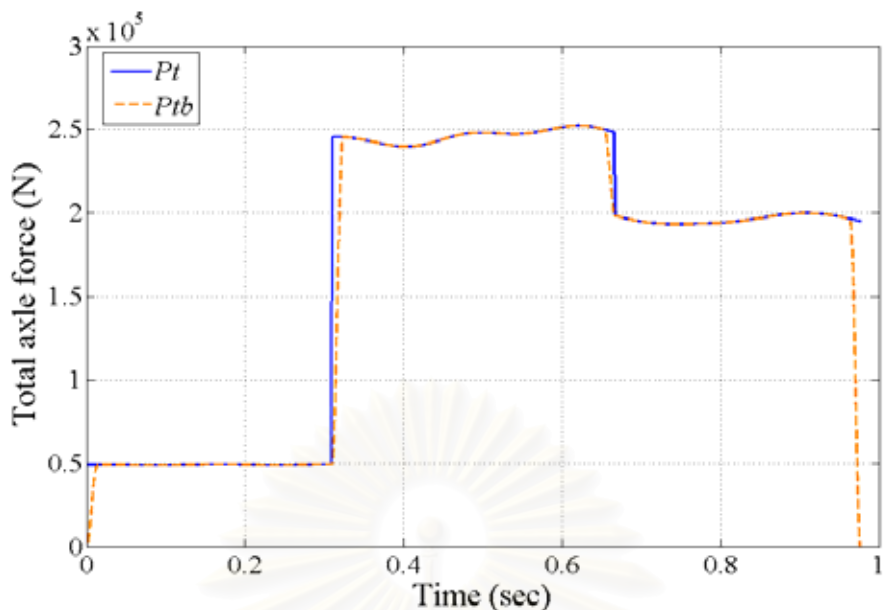


รูปที่ 3.4 แรงที่ล้อรถบรรทุก คำนวณจากแบบจำลองควบคุม, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการคำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุก, $P_r(t)$ (เส้นประสีม่วง)

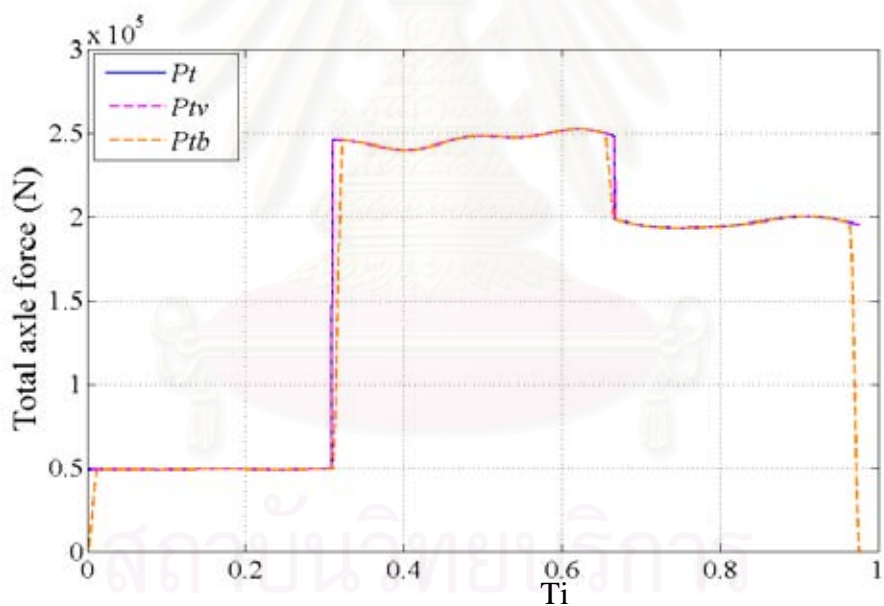
โดยจะเห็นได้ว่าแรงที่คำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุกมีความใกล้เคียงกับ แรงที่คำนวณจากแบบจำลองควบคุมมาก ถัดมาคำนวณแรงที่ล้อรถบรรทุกกระทำต่อสะพานด้วยผลตอบสนองของสะพานดังสมการที่ 3.16

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{R}(t) = \mathbf{P}_b(t) \quad (3.16)$$

โดยที่ $\mathbf{P}_b(t)$ คือแรงที่ชั่วของสะพานในแต่ละช่วงเวลา แทนค่าผลตอบสนองของสะพานลงในสมการที่ 3.16 แล้วนำแรงที่ชั่วในพิกัดตั้งฉากกับแกนสะพานมารวมกันในแต่ละช่วงเวลาจะได้แรงที่ล้อรถบรรทุกกระทำต่อสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 เปรียบเทียบแรงที่ล้อรถบรรทุกคำนวณจากแบบจำลองควบคุม, แบบจำลองรถบรรทุก และแบบจำลองสะพาน



รูปที่ 3.5 แรงที่ล้อรถบรรทุก คำนวณจากแบบจำลองควบคุม, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการคำนวณจากแบบจำลองสะพาน, $P_{tb}(t)$ (เส้นประสีส้ม)



รูปที่ 3.6 แรงที่ล้อรถบรรทุก คำนวณจากแบบจำลองควบคุม, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการคำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุก, $P_{tv}(t)$ (เส้นประสีม่วง) และการคำนวณจากแบบจำลองสะพาน, $P_{tb}(t)$ (เส้นประสีส้ม)

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 จะเห็นได้ว่าแรงที่ล้อรถบรรทุกจากการคำนวณโดยแบบจำลองสะพานจะมีความคลาดเคลื่อน เมื่อล้อรถบรรทุกเคลื่อนที่เข้า และออกจากสะพาน เนื่องจากแรงดังกล่าวได้จากการรวมแรงที่ชั่วขณะของแบบจำลองสะพานในแต่ละช่วงเวลา โดยที่ไม่ได้รวมแรงจากจุดรองรับของสะพาน แต่เมื่อพิจารณาช่วงเวลาอื่นๆ พบว่าแรงในแบบจำลองของสะพานมีความใกล้เคียงกับแรงจากแบบจำลองควบคุม และแรงที่คำนวณจากแบบจำลองรถบรรทุกมาก ดังนั้นการจำลองปฏิริยาควบคุมของแบบจำลองสะพาน และรถบรรทุก จึงมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้

บทที่ 4

ประสิทธิภาพการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุก กรณีศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

บทนี้จะกล่าวถึงการคำนวณน้ำหนักบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรอยโดยศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ การทดลองเริ่มจากการใช้โปรแกรมจำลองสัญญาณผลตอบสนองของสะพาน (ความเครียด และโมเมนต์ดัด) เมื่อมีรถบรรทุกแล่นผ่าน ซึ่งได้จากการแก้สมการการเคลื่อนที่แบบควบคุมระหว่างรถบรรทุก และสะพาน (สมการที่ 4.1) ในแต่ละช่วงเวลา

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{R}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{R}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) - \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} \quad (4.1) \\
 & = \begin{Bmatrix} -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{M}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

ทำการจำลองสัญญาณโมเมนต์ดัดขึ้นมาในแต่ละกรณี โดยที่ทำการแปรผันคุณสมบัติของรถบรรทุกต่างๆ ได้แก่ แปรผันความเร็วของรถบรรทุก 10 กรณี, แปรผันระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก 5 กรณี และแปรผันน้ำหนักเพลลาหน้าและหลัง 23 กรณี รวมเป็นการทดลองทั้งสิ้น 1,150 กรณี โดยที่ค่าน้ำหนักเพลลาหน้าและหลังของรถบรรทุกที่พิจารณาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ค่าความเร็ว และระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่พิจารณาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และ

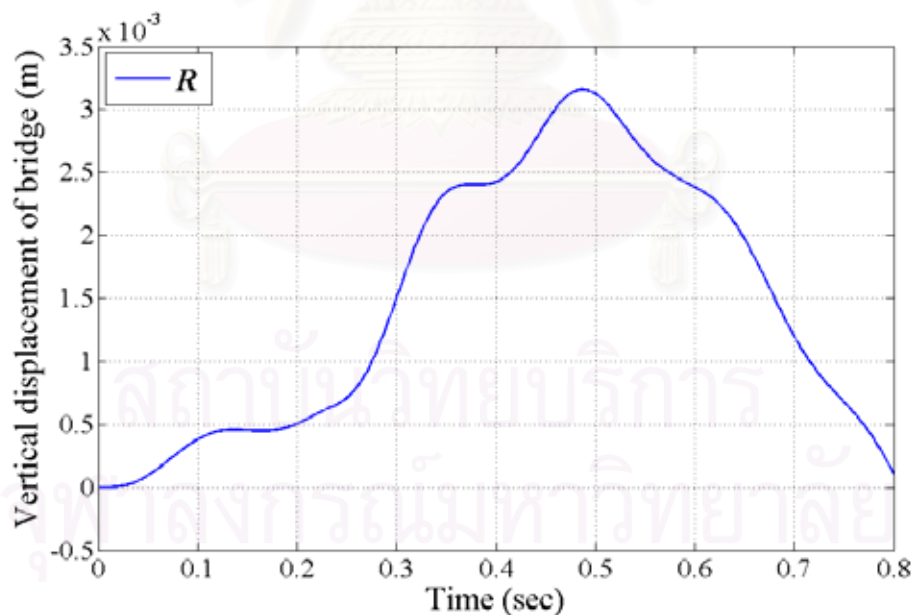
ตารางที่ 4.1 ค่าน้ำหนักเพลลาหน้า และน้ำหนักเพลลาหลังของรถบรรทุกที่พิจารณาในการศึกษาด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

น้ำหนักเพลลาหน้า : N_f (ตัน)	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
	น้ำหนักรวม : N_r (ตัน)				
น้ำหนักเพลลาหลัง : N_r (ตัน)					
10.00	12.00	14.00	16.00		
17.50	19.50	21.50	23.50	25.50	27.50
25.00	27.00	29.00	31.00	33.00	35.00
32.50	34.50	36.50	38.50	40.50	42.50
40.00	42.00	44.00	46.00	48.00	50.00

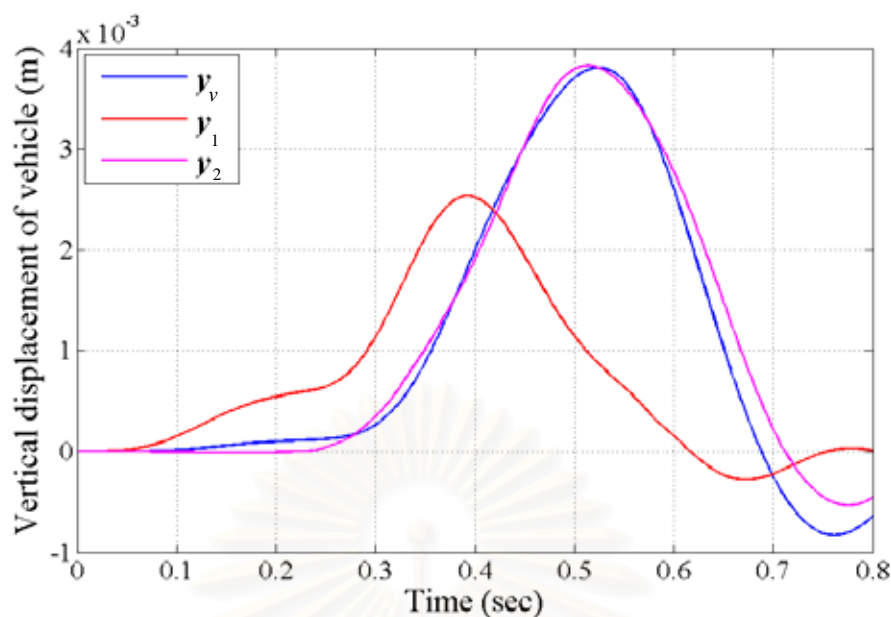
ตารางที่ 4.2 ค่าความเร็ว และระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่พิจารณาในการศึกษาด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ลำดับ	ความเร็ว ; v		ระยะห่างเพลลา ; S
	เมตร/วินาที	กิโลเมตร/ชั่วโมง	เมตร
1	3.50	12.60	2.00
2	7.00	25.20	4.00
3	10.50	37.80	6.00
4	14.00	50.40	8.00
5	17.50	63.00	10.00
6	21.00	75.60	
7	24.50	88.20	
8	28.00	100.80	
9	31.50	113.40	
10	35.00	126.00	

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของรถบรรทุก และสะพาน จากการจำลองผลตอบสนองในกรณีที่ 496 ซึ่งเป็นกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็ว 17.50 เมตร/วินาที (63 กม./ชม.), ระยะห่างเพลลา 4 เมตร, น้ำหนักเพลลาหน้า 6 ตัน และน้ำหนักเพลลาหลัง 25 ตัน โดยที่ผลตอบสนองที่แสดงในรูปนี้คือการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของรถบรรทุก และสะพาน



รูปที่ 4.1ก ตัวอย่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ($L/2$)



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของจุดศูนย์กลางมวลของรถบรรทุก, $y_v(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของเพลาหน้า, $y_1(t)$ (เส้นสีแดง) และการเคลื่อนที่ของเพลาหลัง, $y_2(t)$ (เส้นสีม่วง)

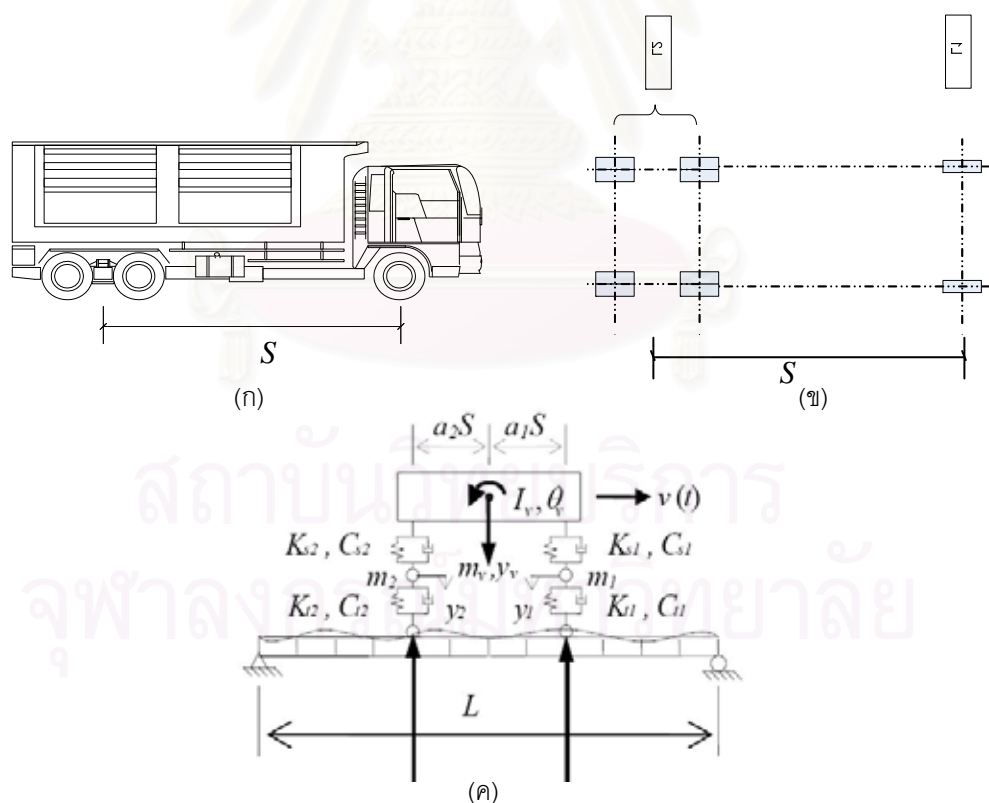
แบบจำลองสะพานที่ใช้ในการทดลอง ได้ใช้แบบสะพานมาตรฐานของกรมโยธาธิการ เช่นเดียวกับแบบจำลองสะพานที่ใช้ในบทที่ 3 และได้แสดงค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ต่างๆ ของสะพานในตารางที่ 4.3 ส่วนคุณสมบัติทางพลศาสตร์ต่างๆ ของรถบรรทุกได้มาจากงานวิจัยของ วุฒิชัย อ่อนน้อม (2001) ซึ่งได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 3 เช่นเดียวกัน ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ต่างๆ ของรถบรรทุกได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้รูปร่างของสะพานและของรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสะพาน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความยาวสะพาน	L	10	เมตร
จำนวนตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด	m	3	ตำแหน่ง
จำนวนชิ้นส่วนของสะพานที่ถูกแบ่ง	no_ele	50	ชิ้นส่วน
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนคาน คูณโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดสะพาน	EI	1.96×10^9	นิวตัน-เมตร ²
ความหนาแน่นของสะพานต่อความยาว คูณพื้นที่หน้าตัดของสะพาน	ρA	10800	กิโลกรัม
อัตราส่วนความหน่วงของสะพาน	ξ	0.02	-

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของรถบรรทุก

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก	g	9.81	เมตร/วินาที ²
โมเมนต์ความเฉื่อยมวลหมุนของรถบรรทุก	I_v	4.87×10^4	กิโลกรัม/เมตร ²
มวลของรถบรรทุก	m_v	23800	กิโลกรัม
มวลของชุดกันสะเทือนเพลาหน้า	m_1	500	กิโลกรัม
มวลของชุดกันสะเทือนเพลาหลัง	m_2	700	กิโลกรัม
สติเฟเนสของชุดกันสะเทือนเพลาหน้า	K_{s1}	$2 \times 4.75 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
สติเฟเนสของชุดกันสะเทือนเพลาหลัง	K_{s2}	$2 \times 8.49 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
สติเฟเนสของชุดล้อสัมผัสเพลาหน้า	K_{t1}	$2 \times 2.69 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
สติเฟเนสของชุดล้อสัมผัสเพลาหลัง	K_{t2}	$2 \times 6.41 \times 10^6$	นิวตัน/เมตร
ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลาหน้า	C_{s1}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดกันสะเทือนเพลาหลัง	C_{s2}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสเพลาหน้า	C_{t1}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)
ความหน่วงของชุดล้อสัมผัสเพลาหลัง	C_{t2}	$2 \times 2.00 \times 10^4$	นิวตัน/(เมตร/วินาที)



รูปที่ 4.2 รูปร่างของสะพาน และรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษาด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (ก) รูปร่างของรถบรรทุก (ข) ตำแหน่งล้อ และระยะเพลา (ค) แบบจำลองสะพาน และรถบรรทุกที่จำลองมาจากสะพาน และรถบรรทุกจริง

4.1 การคำนวณหาหน้าหนักของรถบรรทุก

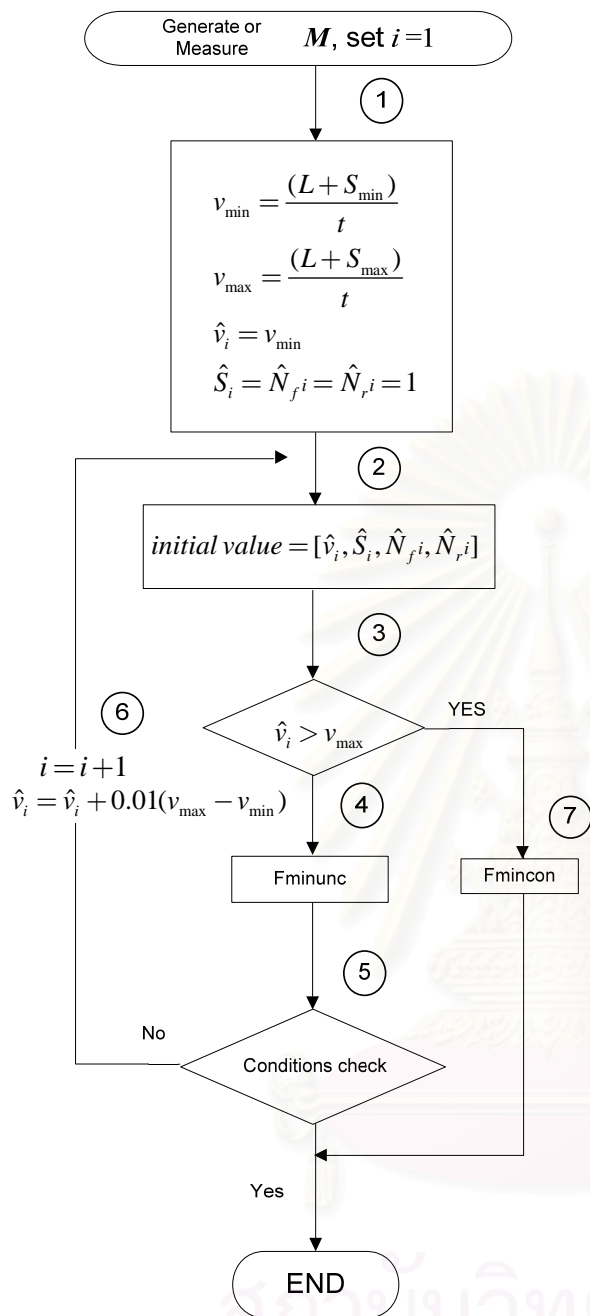
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาหน้าหนักรถบรรทุกจากวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธีได้แก่

1. การหาหน้าหนักรถบรรทุกโดยใช้คำสั่ง Fminunc แบบไม่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ (Fminunc)
2. การหาหน้าหนักรถบรรทุกโดยใช้คำสั่ง Fmincon แบบไม่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ (Fmincon)
3. การหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ ที่เสนอใช้ในงานวิจัยนี้ (proposed method)

โดยที่คำสั่ง Fminunc และ Fmincon ต่างก็เป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปในโปรแกรม MatLab ซึ่งคำสั่ง Fminunc (Find minimum of unconstrained multivariable function) เป็นฟังก์ชันในการหาค่าต่ำที่สุดของอ็อปเจ็คทีฟฟังก์ชัน โดยที่ไม่กำหนดขอบเขตของตัวแปร ส่วนคำสั่ง Fmincon (Find minimum of constrained nonlinear multivariable function) เป็นฟังก์ชันในการหาค่าต่ำที่สุดของอ็อปเจ็คทีฟฟังก์ชันโดยกำหนดขอบเขตของตัวแปรต่างๆ ให้อยู่ในขอบเขตที่เป็นไปได้ เช่นน้ำหนักรวมของรถบรรทุกต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0 ตัน และไม่มากกว่า 50 ตัน เป็นต้น ซึ่งทั้งสองคำสั่งนี้ต่างก็ใช้วิธีการหาค่าต่ำที่สุดแบบ BFGS ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3.4

ซึ่งในการหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณทั้งแบบใช้คำสั่ง Fminunc และคำสั่ง Fmincon เป็นการหาหน้าหนักโดยที่ไม่ได้ทำการเพิ่มเงื่อนไขในการคำนวณ และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของคำสั่งเป็นค่าที่โปรแกรมกำหนดให้ (default)

ในส่วนรายละเอียดของวิธีการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ ที่เสนอใช้ในงานวิจัยนี้ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2 ซึ่งขั้นตอนการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้เงื่อนไขในการวนรอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3

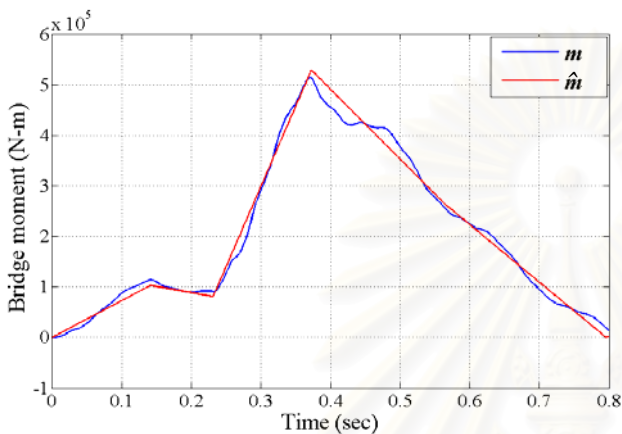


1. กำหนดค่าความเร็วน้อยที่สุด และค่าความเร็วมากที่สุดที่เป็นไปได้ โดยที่กำหนดให้ค่าระยะห่างเพลาน้อยที่สุดเท่ากับ 2 เมตร และค่าระยะห่างเพลามากที่สุดเท่ากับ 12 เมตร รวมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณต่าง ๆ
2. ให้ค่าเริ่มต้นในการคำนวณ เท่ากับค่าที่กำหนดให้
3. ตรวจสอบเงื่อนไขความเร็วเริ่มต้น ว่ามีค่าเกินกว่าค่าความเร็วมากที่สุดหรือไม่
4. ทำการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุก โดยใช้ฟังก์ชัน Fminunc
5. ตรวจสอบขอบเขต และเงื่อนไขที่ใช้ในการวนรอบได้แก่
 - 1) $0 < \hat{v} \leq 100$ เมตร/วินาที
 - 2) $1 < \hat{S} \leq 20$ เมตร
 - 3) $1 < \hat{N}_f \leq 20$ ตัน
 - 4) $1 < \hat{N}_r \leq 80$ ตัน
 - 5) $\hat{N}_f / \hat{N}_r < 0.65$
 - 6) $relative\ error = \frac{(v_L - \hat{v})}{\hat{v}} \times 100\% < 6\%$
6. ทำการวนรอบการคำนวณเมื่อคำตอบที่ได้ยังไม่อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด ด้วยการเพิ่มค่าความเร็วเริ่มต้นในการคำนวณ เพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป
7. หากคำตอบที่ได้ยังไม่อยู่ในเงื่อนไขในการคำนวณ แต่ความเร็วเริ่มต้นมีค่าเกินกว่าค่าความเร็วมากที่สุดที่เป็นไปได้ ให้คำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน Fmincon แบบไม่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบ และถือว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบของกระบวนการนี้

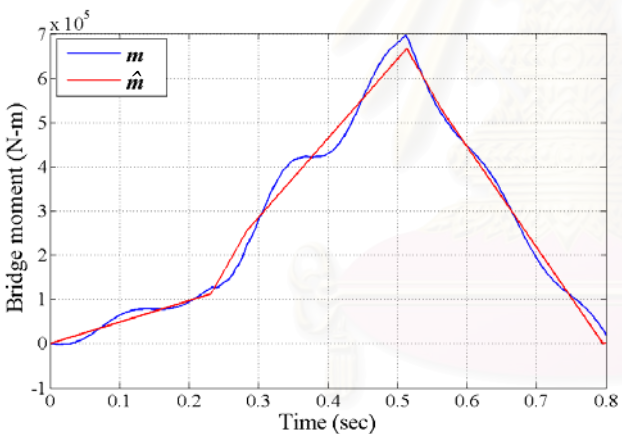
รูปที่ 4.3 แผนผังการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้ขอบเขตและเงื่อนไขในการวนรอบ

4.2 ผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ

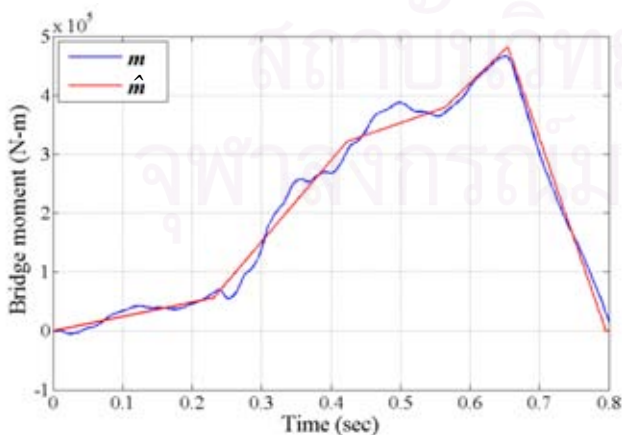
การทดลองหาน้ำหนักรถบรรทุกในหัวข้อนี้ จะสมมติว่าพื้นผิวถนนของสะพานไม่มีความขรุขระ และ ทำการศึกษาประสิทธิภาพการหาน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวม ระยะห่างเพลาล และความเร็วของรถบรรทุก โดย ทำการศึกษาจากการทดลองหาน้ำหนัก 1,150 กรณีดังกล่าวมาข้างต้น รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างผลการหาน้ำหนัก ของรถบรรทุกกรณีนี้ 496 ซึ่งเป็นกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็ว 17.50 เมตร/วินาที (63 กม./ชม.) ระยะห่างเพลาล 4 เมตร น้ำหนักเพลาลหน้า 6 ตัน และน้ำหนักเพลาลหลัง 25 ตัน



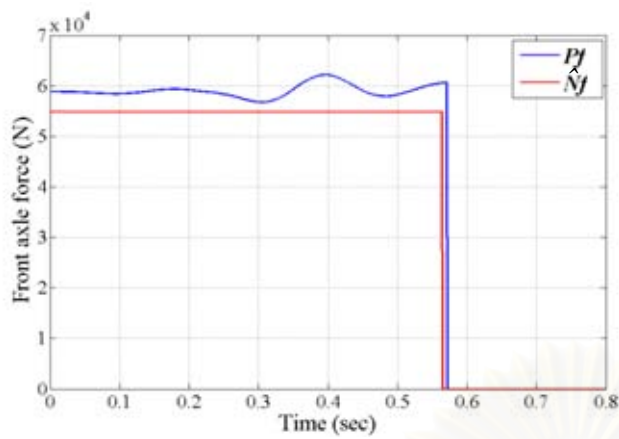
รูปที่ 4.4ก โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.25L



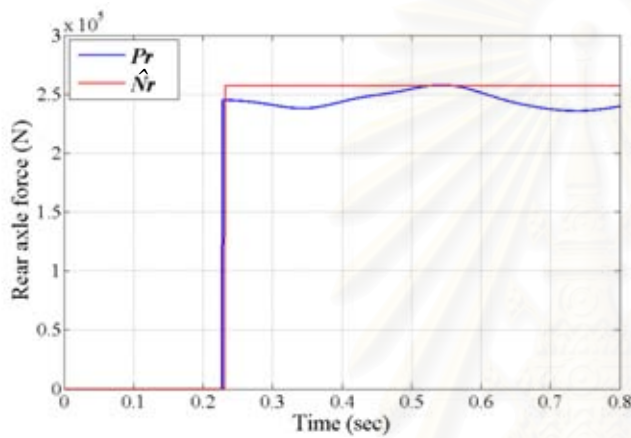
รูปที่ 4.4ข โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.5L



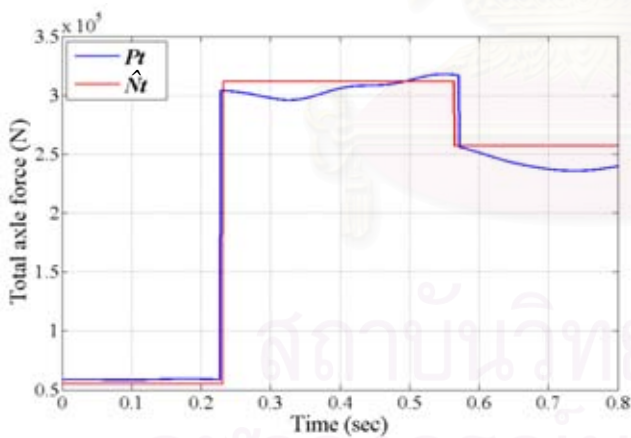
รูปที่ 4.4ค โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.75L



รูปที่ 4.4ง น้ำหนักเพลาน้ำหนัที่คำนวณได้, \hat{N}_f (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาน้ำหนัจริง, $P_f(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)



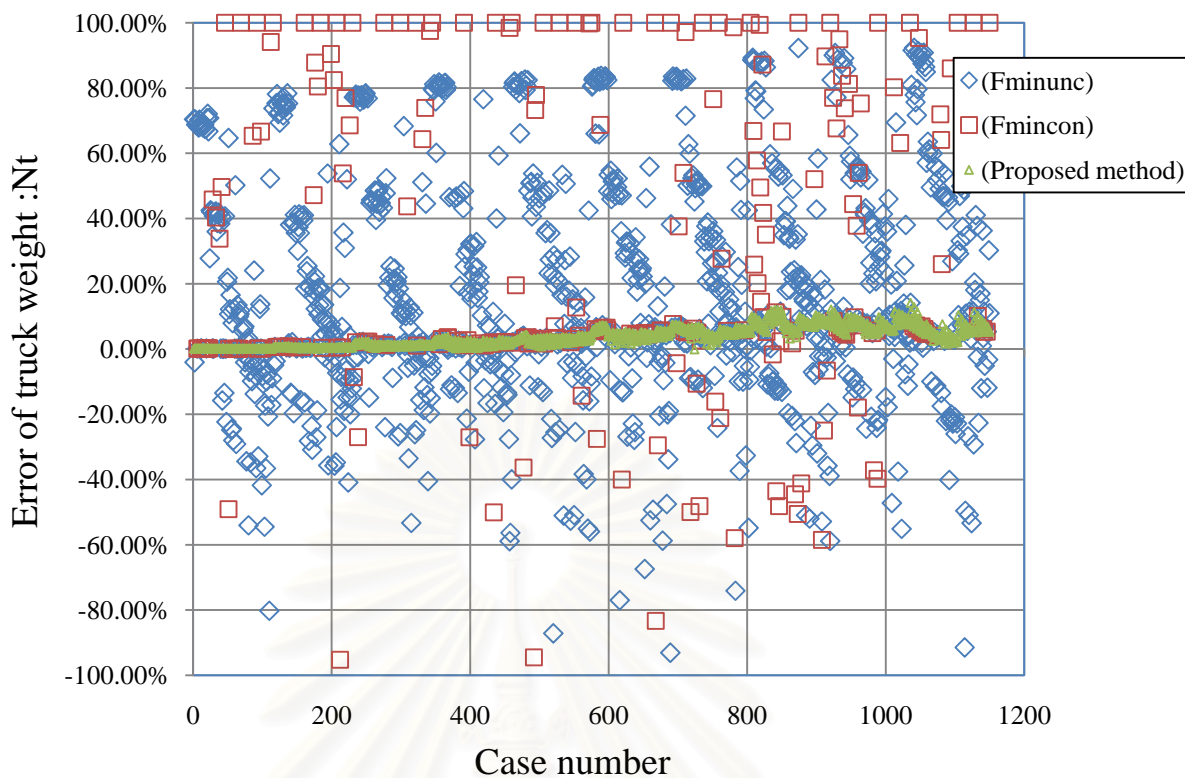
รูปที่ 4.4จ น้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้, \hat{N}_r (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาลังจริง, $P_r(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)



รูปที่ 4.4ข น้ำหนักรวมที่คำนวณได้, \hat{N}_t (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำรวมจริง, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)

4.2.1 ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ

จากการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระทั้ง 3 วิธีได้ผลการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 3 วิธี

จากผลการคำนวณดังกล่าวพบว่า การคำนวณน้ำหนักบรรทุกวิธีที่ 1 (Fminunc) ได้คำตอบที่ใกล้เคียงจริง 260 คำตอบจาก 1,150 ตัวอย่างการคำนวณ หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณ 22.61% ส่วนการคำนวณน้ำหนักบรรทุกวิธีที่ 2 (Fmincon) ได้คำตอบที่ใกล้เคียงจริง 122 คำตอบ หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณ 10.61% ในขณะที่การคำนวณน้ำหนักบรรทุกวิธีที่ 3 (Proposed method) ซึ่งใช้คำสั่ง Fminunc แบบใช้เงื่อนไขการวนรอบ ได้คำตอบที่ใกล้เคียงจริง 1,131 คำตอบ หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณถึง 98.35% โดยกรณีที่ได้คำตอบไม่ถูกต้อง 19 กรณี มีการแปรผันค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

เมื่อทำการหาคำตอบซ้ำโดยที่เปลี่ยนขนาดความเร็วเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นในการวนรอบจาก $1\%(V_{\max} - V_{\min})$ เป็น $0.1\%(V_{\max} - V_{\min})$ พบว่าสามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกซึ่งเดิมไม่สามารถหาคำตอบได้เพิ่มขึ้น 7 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 53, 62, 105, 109, 637, 752 และ 1039 ในส่วนของกรณีที่ 1093 เมื่อเปลี่ยนวิธีการน้ำหนักเป็นแบบ Fmincon แบบมีเงื่อนไขก็สามารถหาคำตอบได้

จากนั้นเมื่อพิจารณากรณีที่ยังไม่สามารถหาคำตอบได้ (ตัวอักษรสีแดงในตารางที่ 4.5) จะพบความคล้ายคลึงกันคือ อัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังมีค่าน้อยมาก (0.05-0.1) เมื่อทำการหาน้ำหนักโดยปลดเงื่อนไขขอบเขตล่างของน้ำหนักเพลาน้ำ (คือน้ำหนักเพลาน้ำต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 ตัน) ออก พบว่ากรณีที่ไม่สามารถหาคำตอบ 11 กรณีนั้น สามารถหาคำตอบได้ทั้งหมด โดยคำตอบที่ได้มีค่าน้ำหนักเพลาน้ำน้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังที่น้อยมากๆ จะมีผลต่อการคำนวณน้ำหนักบรรทุก โดยที่จะไม่สามารถหาคำตอบได้ และจะคำนวณเสมือนว่ารถคันนั้นๆ มีเพลาน้ำเดียว ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่น่าจะเกิดขึ้นได้สำหรับรถบรรทุกในความเป็นจริง จึงไม่ถือว่าเป็นข้อจำกัดของการคำนวณน้ำหนักบรรทุกวิธีที่ 3 (proposed method) แต่อย่างใด

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ในกรณีที่ได้คำตอบไม่ถูกต้อง

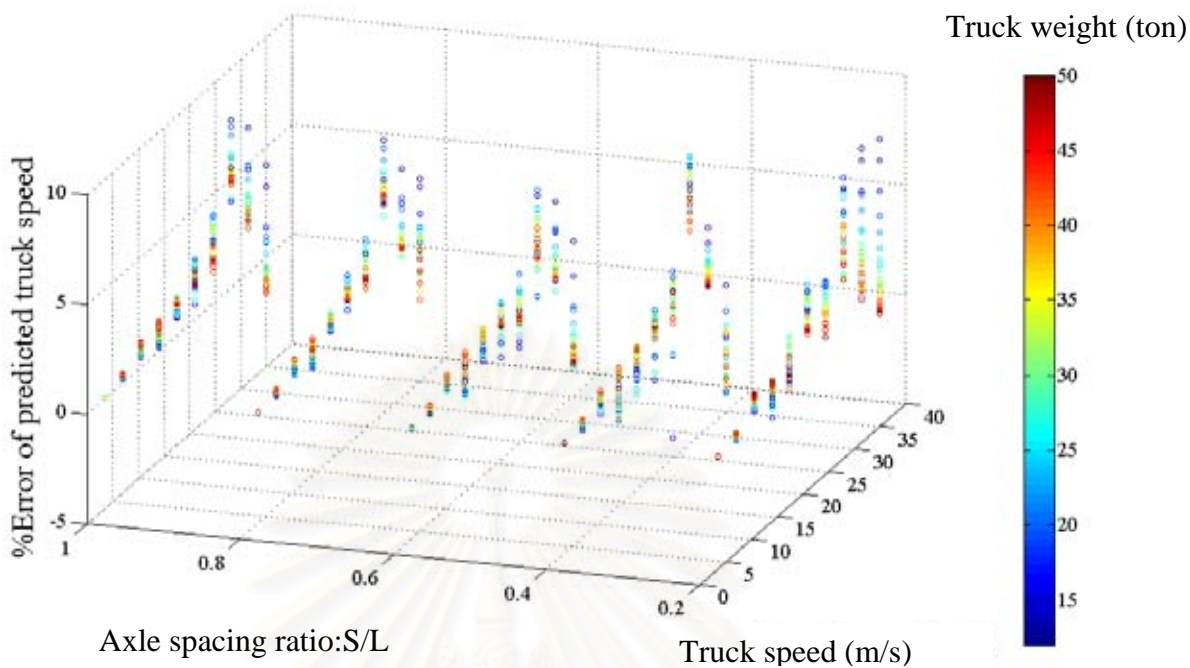
ลำดับ	ความเร็ว v เมตร/วินาที	ระยะห่างเพลลา S เมตร	น้ำหนักเพลลาหน้า N_f ตัน	น้ำหนักเพลลาหลัง N_r ตัน	อัตราส่วนน้ำหนักเพลลาหน้า ต่อน้ำหนักเพลลาหลัง N_f/N_r (ตัน)
53	3.50	6.00	4.00	17.50	0.23
62	3.50	6.00	8.00	17.50	0.46
105	3.50	10.00	6.00	25.00	0.24
109	3.50	10.00	8.00	25.00	0.32
464	17.50	2.00	2.00	32.50	0.06
465	17.50	2.00	2.00	40.00	0.05
637	21.00	6.00	8.00	17.50	0.46
752	24.50	6.00	8.00	17.50	0.46
808	28.00	2.00	2.00	25.00	0.08
809	28.00	2.00	2.00	32.50	0.06
810	28.00	2.00	2.00	40.00	0.05
923	31.50	2.00	2.00	25.00	0.08
924	31.50	2.00	2.00	32.50	0.06
925	31.50	2.00	2.00	40.00	0.05
930	31.50	2.00	4.00	40.00	0.10
1039	35.00	2.00	2.00	32.50	0.06
1040	35.00	2.00	2.00	40.00	0.05
1086	35.00	6.00	2.00	40.00	0.05
1093	35.00	6.00	6.00	17.50	0.34

4.2.2 พฤติกรรมของผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ

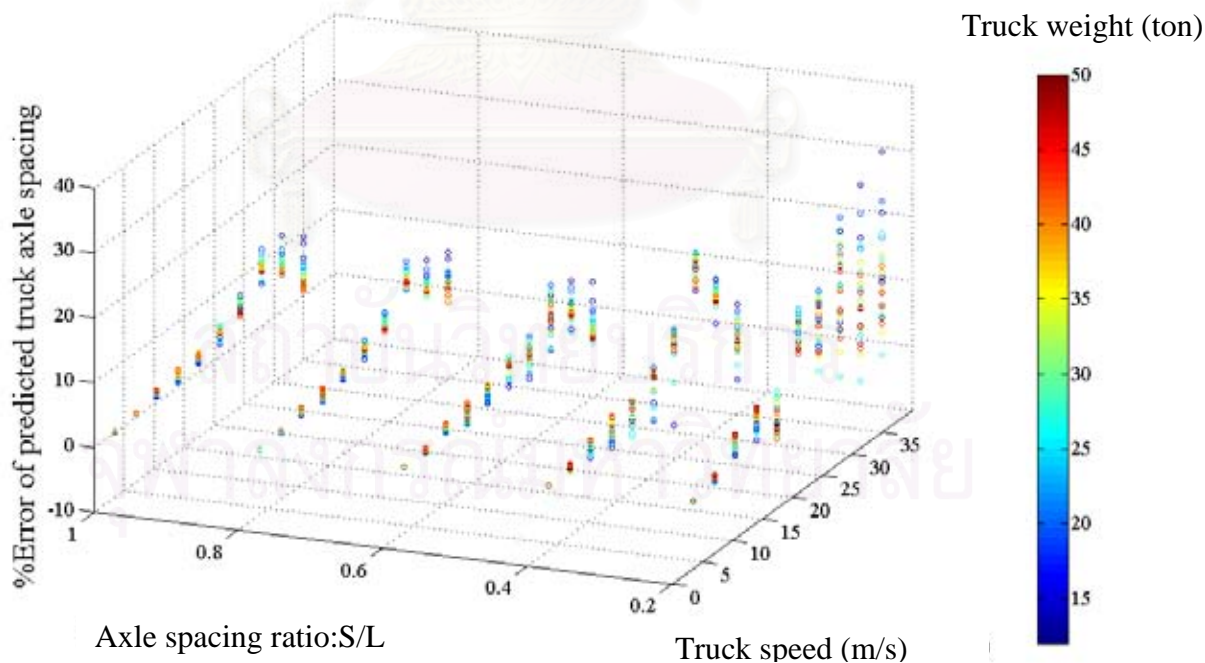
จากการพิจารณาประสิทธิภาพการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระในหัวข้อที่ 4.2.1 แล้ว พบว่าวิธีการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกวิธีที่ 3 (proposed method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณนั้นสามารถหาคำตอบได้ทุกกรณี ในหัวข้อนี้จึงนำผลการหาน้ำหนัก และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรถบรรทุกมาพิจารณาถึงพฤติกรรม และแนวโน้มต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหาน้ำหนักของรถบรรทุก

4.2.2.1 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับความเร็ว อัตราส่วนระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

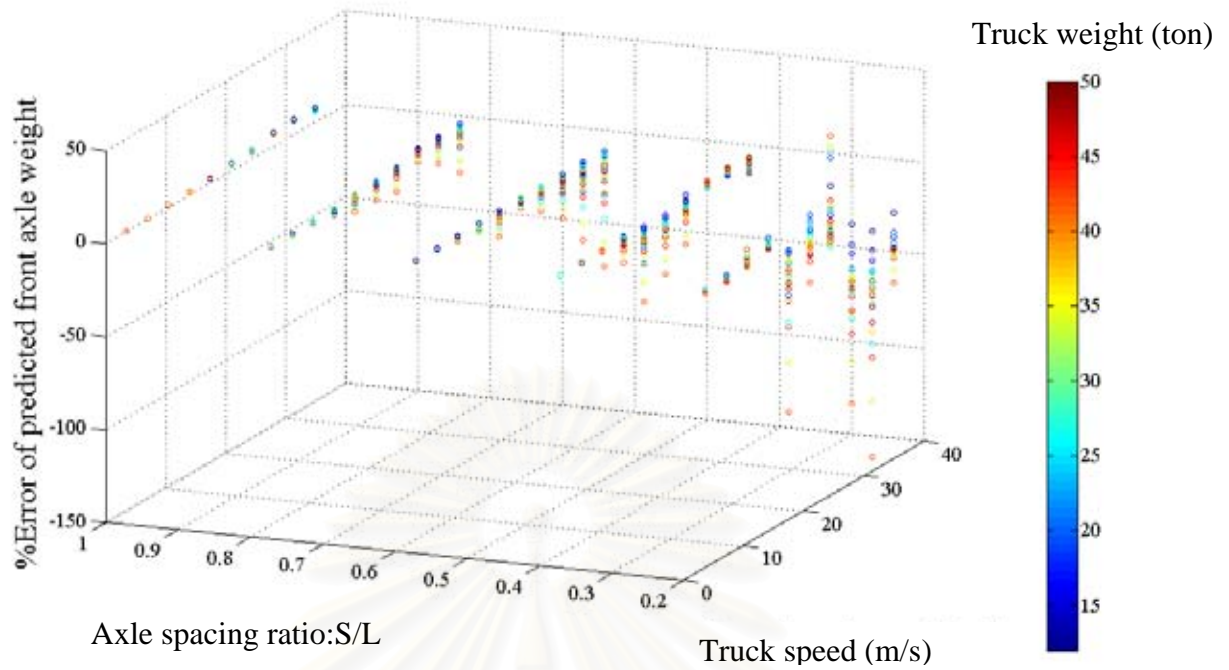
ผลความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ระยะห่างเพลลา น้ำหนักเพลลาหน้า น้ำหนักเพลลาหลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับความเร็วจริง อัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริงต่อความยาวสะพาน (axle spacing ratio : S/L) และน้ำหนักเพลลารวมจริงแสดงในรูปที่ 4.6



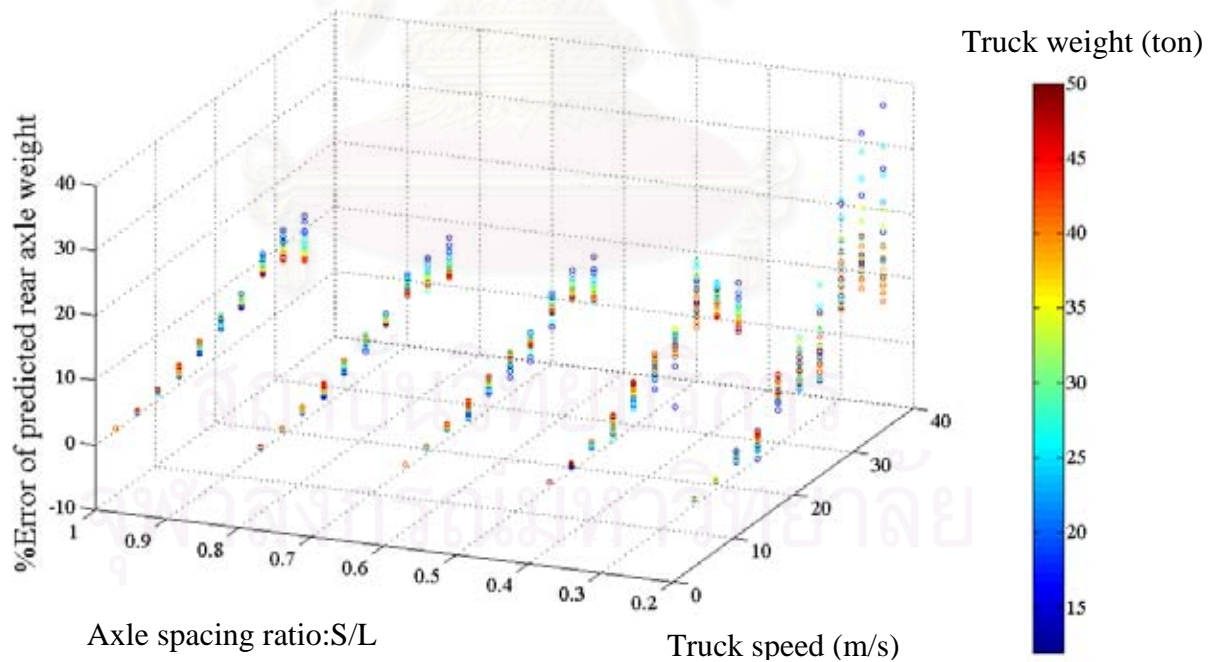
รูปที่ 4.6ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักบรรทุกจริง (N_r) ต่างๆ



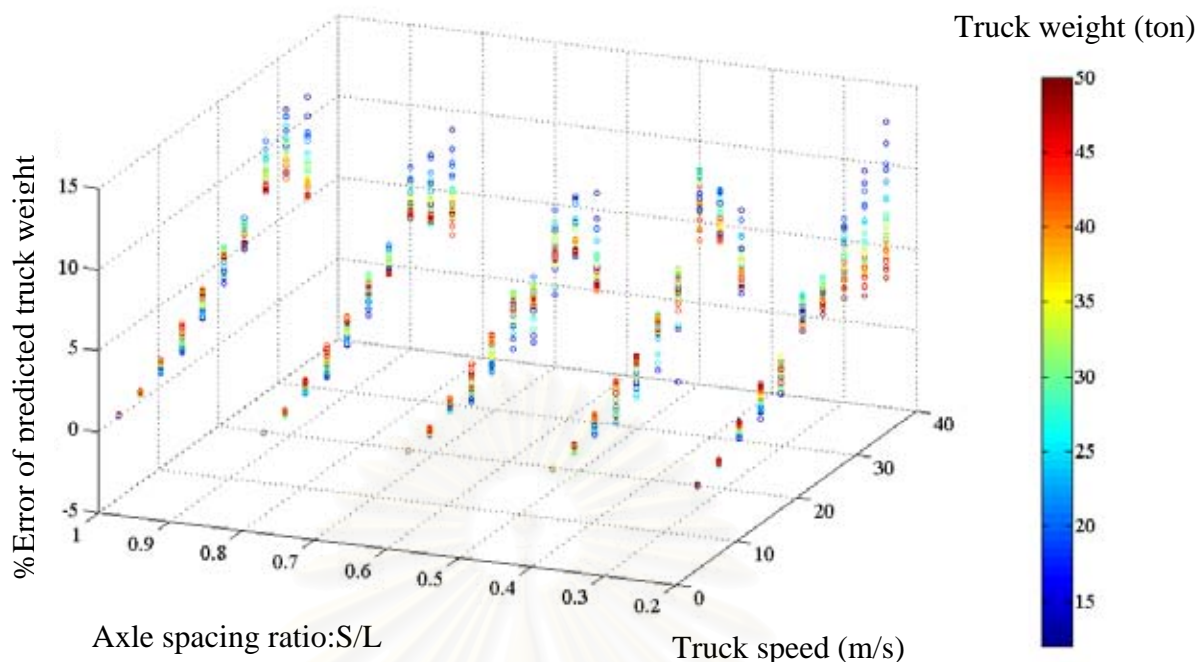
รูปที่ 4.6ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาคำนวณได้ (\hat{S}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักบรรทุกจริง (N_r) ต่างๆ



รูปที่ 4.6ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหน้าที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_T) ต่างๆ



รูปที่ 4.6ง ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_T) ต่างๆ



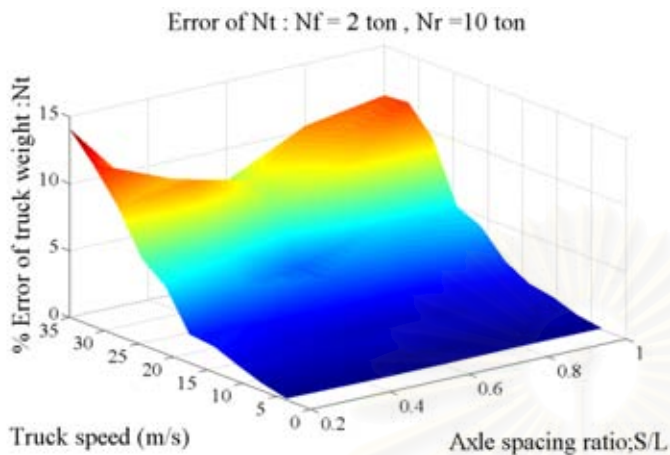
รูปที่ 4.6 จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v), อัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_r) ต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่ามากขึ้นเมื่อรถบรรทุกแล่นด้วยความเร็วที่มากขึ้น และสามารถสรุปได้ดังนี้

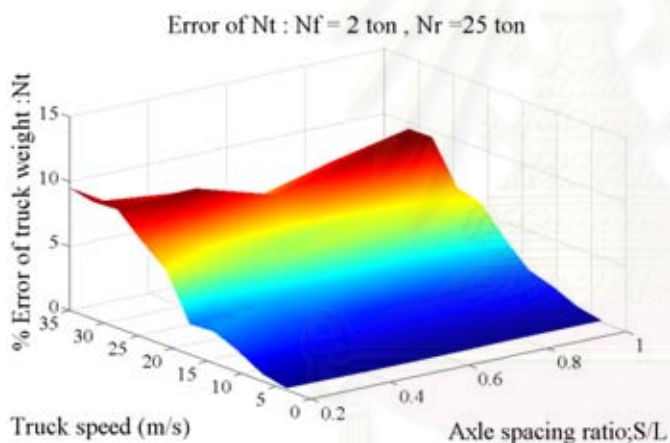
- ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) อยู่ในช่วง -5% ถึง 10%
- ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้ (\hat{S}) อยู่ในช่วง -5% ถึง 35% และกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนมาก จะเป็นกรณีที่อัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริงเท่ากับ 0.2
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหน้า (\hat{N}_f) จะอยู่ระหว่าง -14.5% ถึง 45% โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าติดลบมากจะเป็นกรณีที่น้ำหนักเพลลาหน้ามีค่าน้อย (เท่ากับ 2 ตัน) เมื่อคำนวณเป็นความคลาดเคลื่อนจึงมีค่าสูง
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหลัง (\hat{N}_r) มีค่าระหว่าง -5% ถึง 40% ทั้งกรณีของน้ำหนักเพลลาหน้า และน้ำหนักเพลลาหลังค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลลาเท่ากับ 0.2 เช่นเดียวกับความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างเพลลา
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก (\hat{N}_r) อยู่ในช่วง +14% โดยที่เมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลลา มีค่า 0.2 ความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามาก เมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลลา มีค่าเพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อนจะลดลง โดยจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลลาเท่ากับ 0.6 และเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลลาเพิ่มขึ้นจาก 0.6 ความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้นอีกครั้ง

โดยสรุปแล้วความคลาดเคลื่อนของทุกตัวแปร มีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนระยะห่างเพลลาต่อความยาวสะพานเท่ากับ 0.2 จะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงในทุกตัวแปร นอกจากนี้เมื่อน้ำหนักรถบรรทุกมีค่าน้อยก็จะส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนมีค่ามากในทุกตัวแปรเช่นเดียวกัน

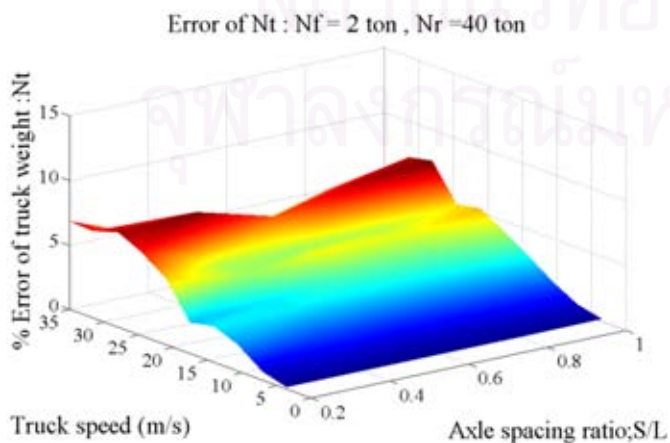
ถัดมาทำการพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเปรียบเทียบกับความเร็ว อัตราส่วนระยะห่างเพลา และคูนน้ำหนักเพลาหน้า-หลัง ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.7



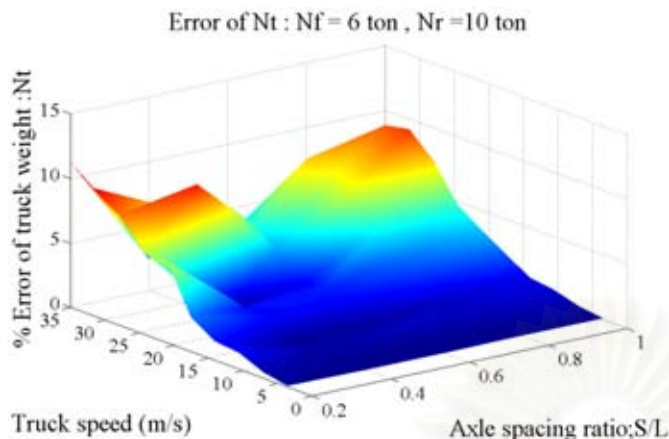
รูปที่ 4.7ก ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาหลัง (N_r) 10 ตัน



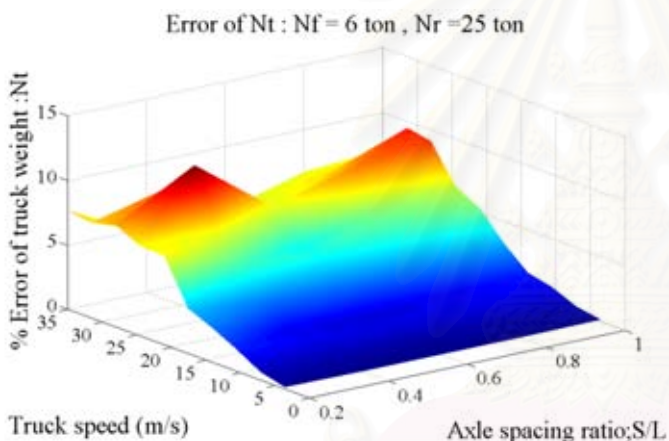
รูปที่ 4.7ข ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาหลัง (N_r) 25 ตัน



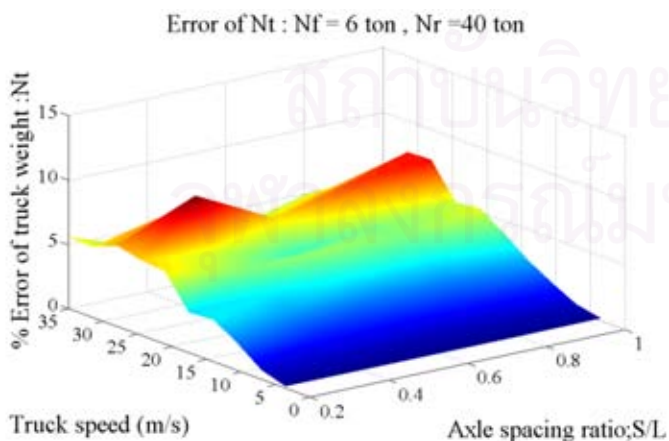
รูปที่ 4.7ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาหลัง (N_r) 40 ตัน



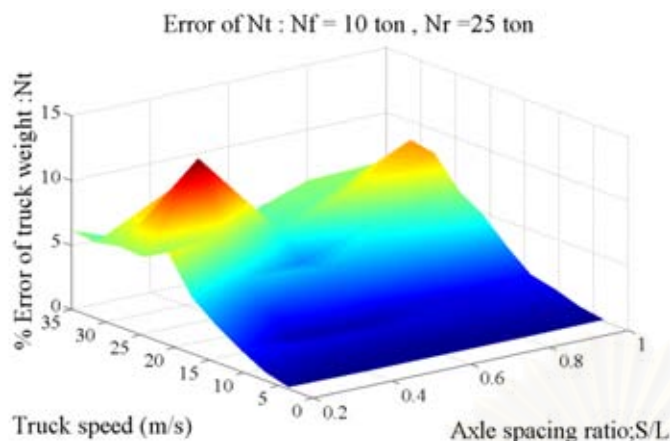
รูปที่ 4.7ง ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 10 ตัน



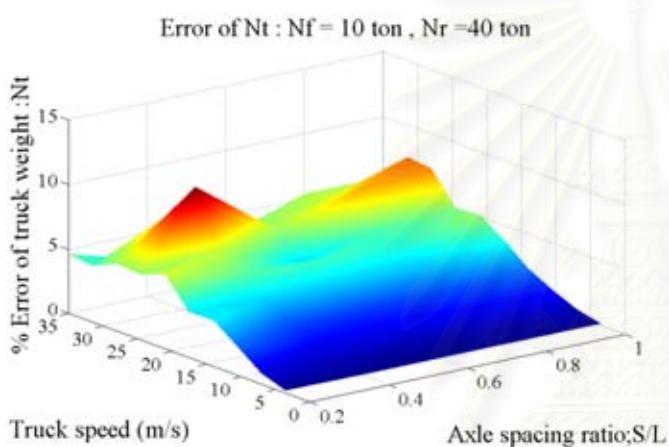
รูปที่ 4.7จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน



รูปที่ 4.7ฉ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 40 ตัน



รูปที่ 4.7ข ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_r) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 10 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน

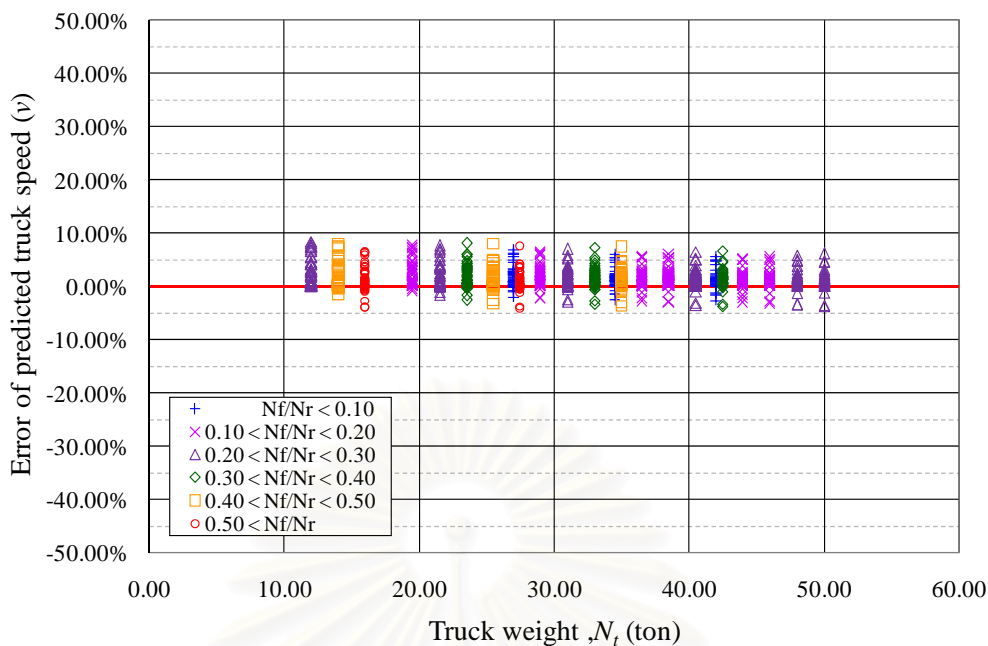


รูปที่ 4.7ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_r) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และ อัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 10 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 40 ตัน

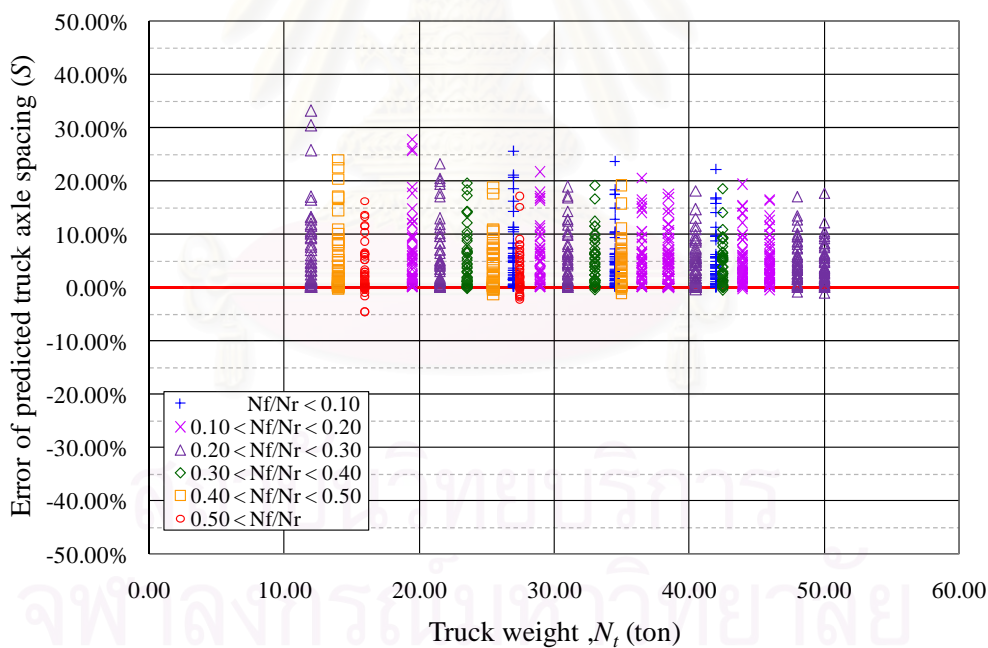
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.7 พบว่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกในกรณีที่คู่น้ำหนักเพลาน้ำและหลังต่าง ๆ กัน มีแนวโน้มเหมือนกันคือจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้น และเมื่อพิจารณาในแกนอัตราส่วนระยะห่างเพลาคือความยาวสะพาน (axle spacing ratio ; S/L) พบว่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลายู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.4 ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลงเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลายู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 และความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากขึ้นอีกครั้งเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลามีค่าตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไป ในกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำมีค่าเท่ากับ 2 ตัน (รูปที่ 4.7ก - 4.7ค) ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมจะมีค่ามากเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลายู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.3 เมตร แต่เมื่อน้ำหนักเพลาน้ำมีค่ามากขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนจะเด่นชัดขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลายู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 เมตร

4.2.2.2 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

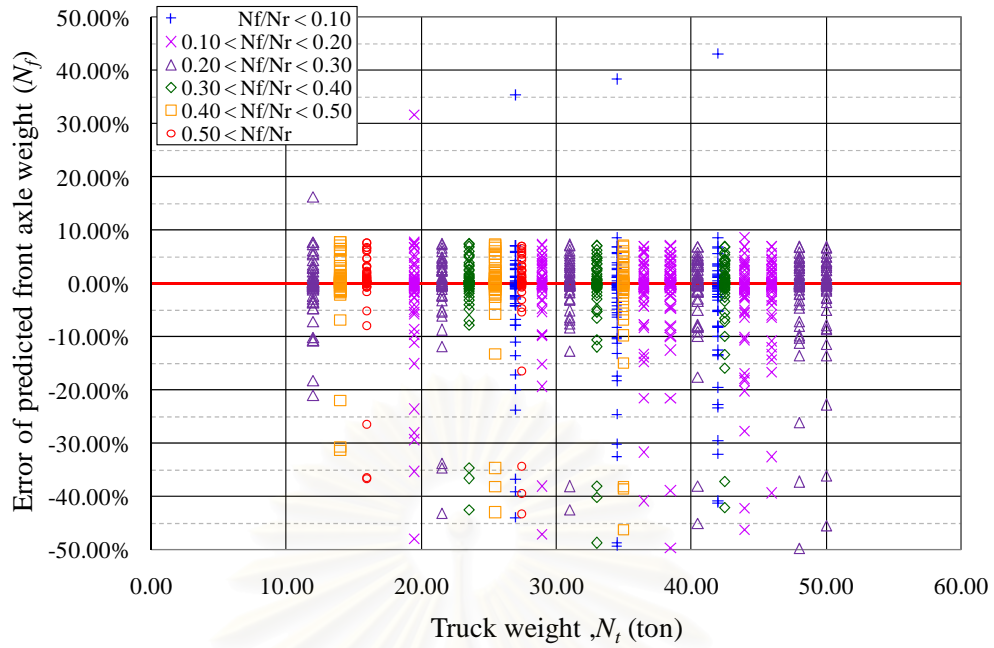
ทำการเปรียบเทียบผลความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ระยะห่างเพลาน้ำ น้ำหนักเพลาน้ำ น้ำหนักเพลาลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้กับ อัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง และน้ำหนักรวมจริงของรถบรรทุก ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.8



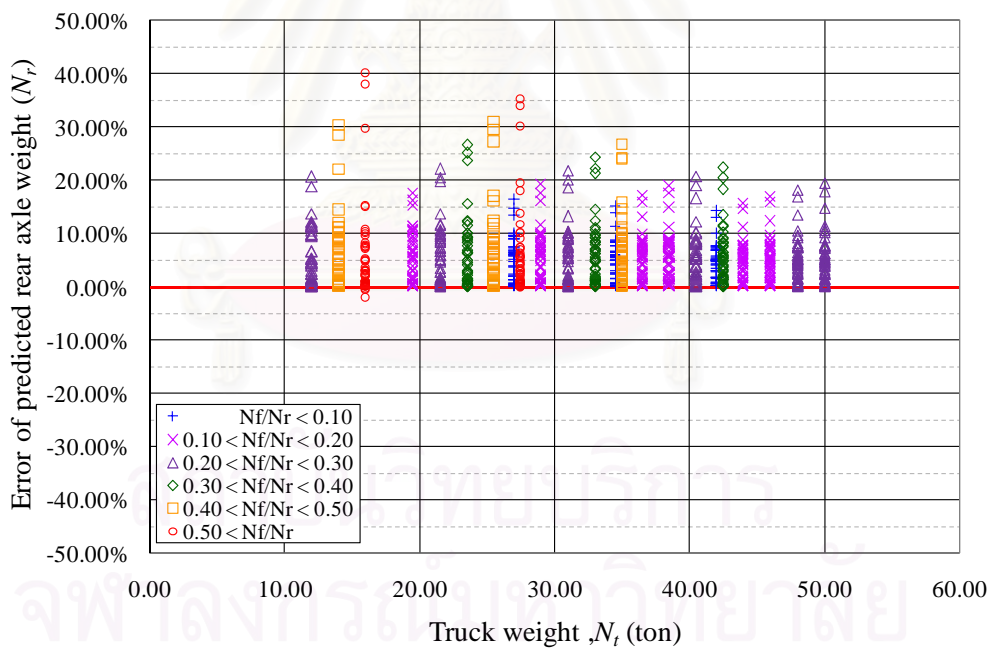
รูปที่ 4.8ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลงจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



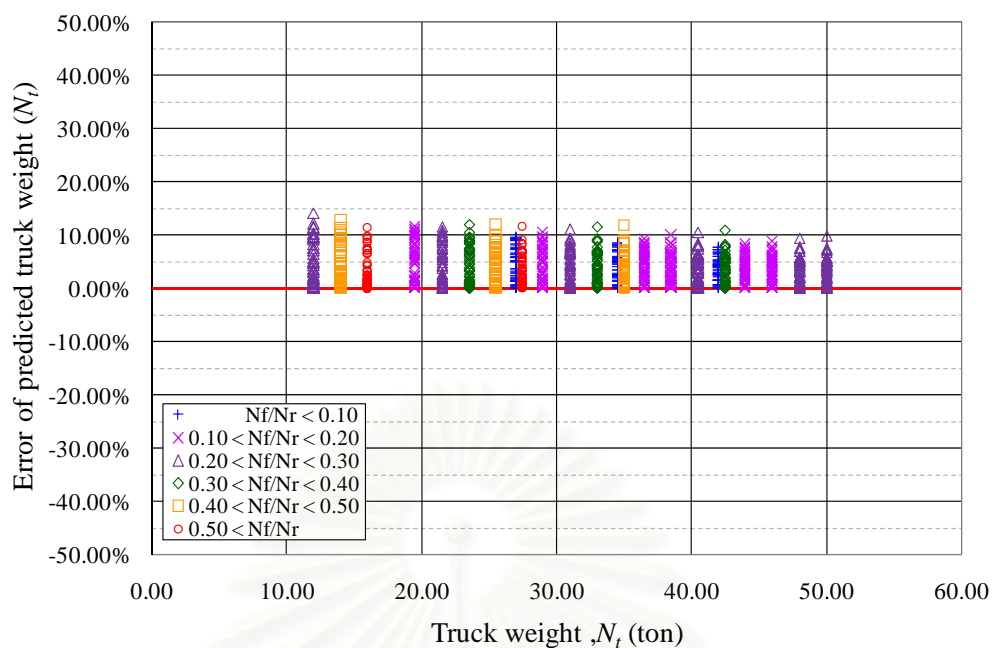
รูปที่ 4.8ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลงจริง (\hat{S}) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลงจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



รูปที่ 4.8ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำหนักต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



รูปที่ 4.8ง ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำหนักต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



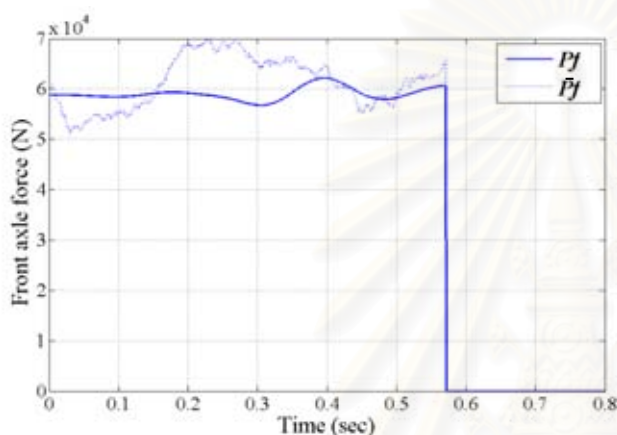
รูปที่ 4.8 จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_r) ต่างๆ

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับน้ำหนักเพลาน้ำ และน้ำหนักเพลาลัง พบว่า

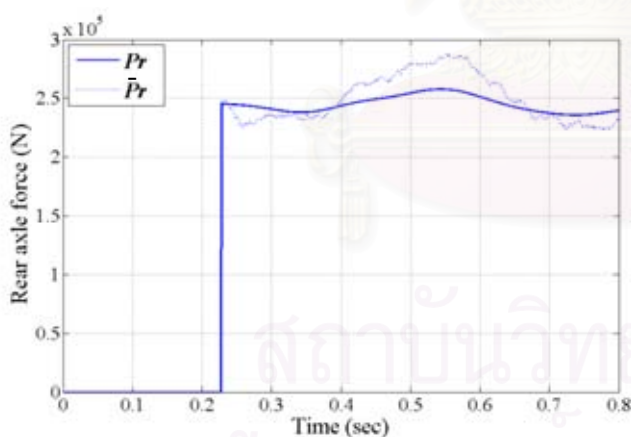
- ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่น้ำหนักรวมต่างๆ
- ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อยลงเมื่อน้ำหนักรวมมากขึ้น
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อยลงเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังเพิ่มขึ้น
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักเพลารวมเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังเพิ่มขึ้นความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูง
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นผลรวมของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำกับความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลัง โดยรวมมีความคลาดเคลื่อนลดลงเมื่อน้ำหนักรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ลดลงของน้ำหนักเพลาลังมีมากกว่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นของน้ำหนักเพลาน้ำ

4.3 ผลการหาค่าน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ

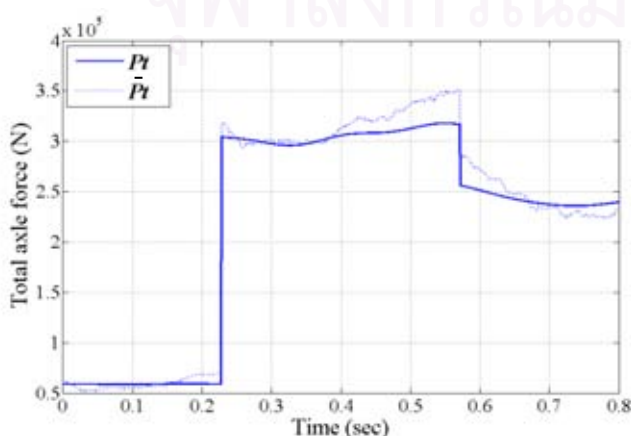
ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกโดยที่สมมติให้พื้นผิวถนนของสะพานมีความขรุขระ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าระดับความขรุขระของถนนอยู่ในระดับปานกลาง หรือ Class B ของมาตรฐาน ISO 8608 (1995) จากการจำลองสะพานที่มีความขรุขระได้แรงกระทำที่ล้อรถบรรทุกแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งได้เปรียบเทียบแรงกระทำที่ล้อระหว่างสะพานแบบพื้นผิวมีความขรุขระ และแบบพื้นผิวไม่มีความขรุขระ โดยรูปที่ 4.10 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดระหว่างสะพานแบบพื้นผิวมีความขรุขระ และแบบพื้นผิวไม่มีความขรุขระเช่นเดียวกัน เมื่อได้สัญญาณโมเมนต์ดัดของสะพานแล้ว นำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักของรถบรรทุก ซึ่งแบ่งเป็นการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้เงื่อนไขในการวนรอบ และแบบใช้เงื่อนไขในการวนรอบ เหมือนการคำนวณในหัวข้อที่ 4.1.1



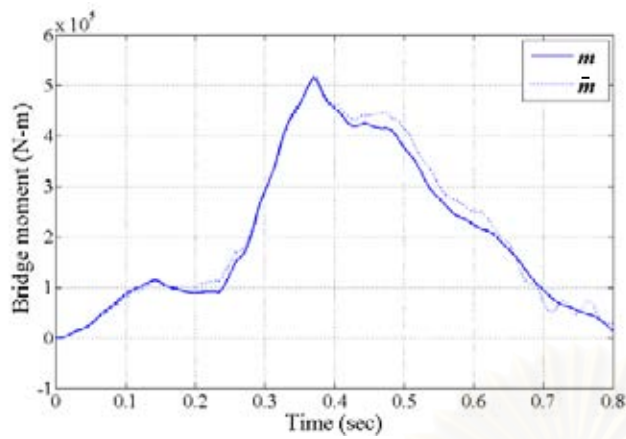
รูปที่ 4.9ก แรงกระทำที่ล้อหน้ากรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ, $P_f(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรงกระทำที่ล้อหน้ากรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{P}_f(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน)



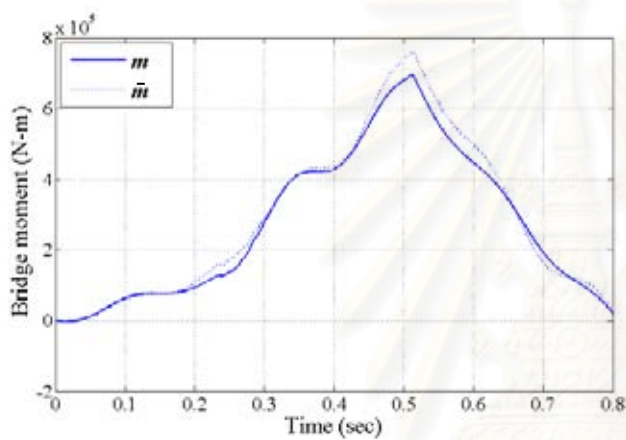
รูปที่ 4.9ข แรงกระทำที่ล้อหลังกรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ, $P_r(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรงกระทำที่ล้อหลังกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{P}_r(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน)



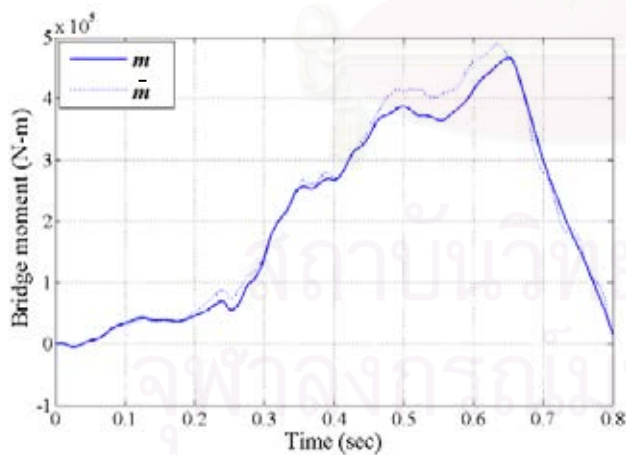
รูปที่ 4.9ค แรงกระทำที่ล้อรวมกรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรงกระทำที่ล้อรวมกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{P}_t(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน)



รูปที่ 4.10ก สัญญาณโมเมนต์ตัดจริงกรณีที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ตัดจริงกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{m}_1(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $0.25L$

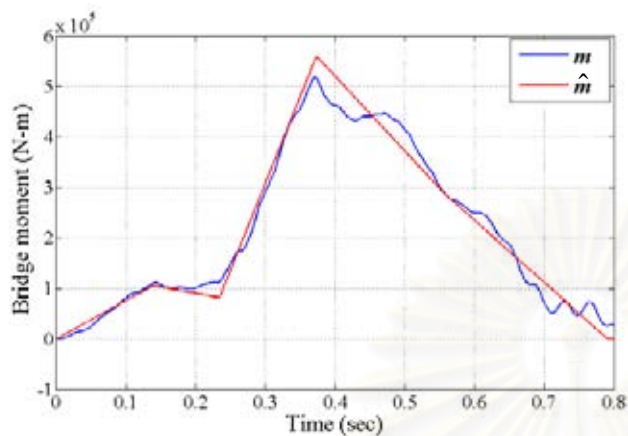


รูปที่ 4.10ข สัญญาณโมเมนต์ตัดจริงกรณีที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ตัดจริงกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{m}_2(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $0.5L$

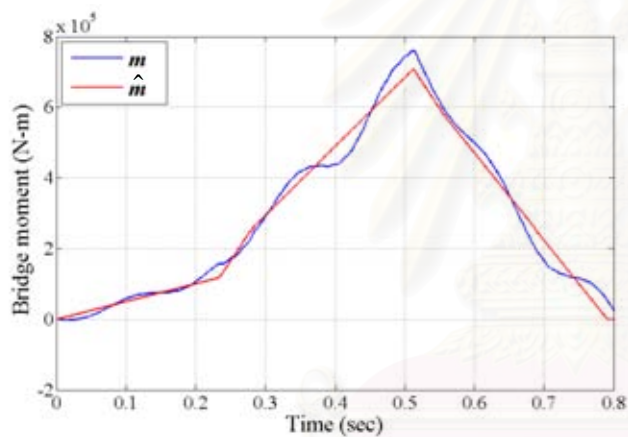


รูปที่ 4.10ค สัญญาณโมเมนต์ตัดจริงกรณีที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ตัดจริงกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ, $\bar{m}_3(t)$ (เส้นประสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $0.75L$

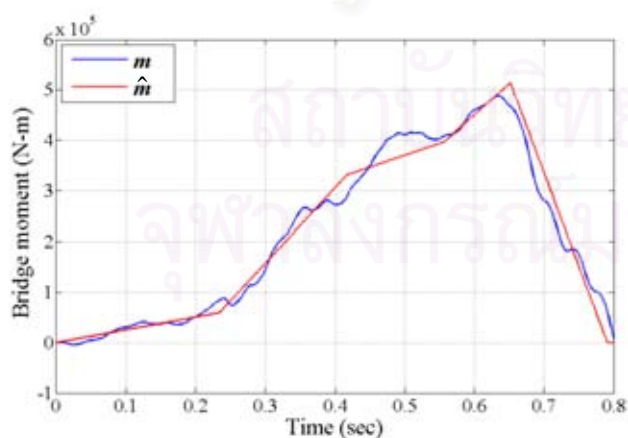
ตัวอย่างผลการหาคำนวณที่รถบรรทุกแบบพื้นผิวสะพานมีความขรุขระได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นการทดลองครั้งที่ 496 ซึ่งเป็นกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็ว 17.50 เมตร/วินาที (63 กม./ชม.), ระยะห่างเพลลา 4 เมตร, น้ำหนักเพลลาหน้า 6 ตัน และน้ำหนักเพลลาหลัง 25 ตัน



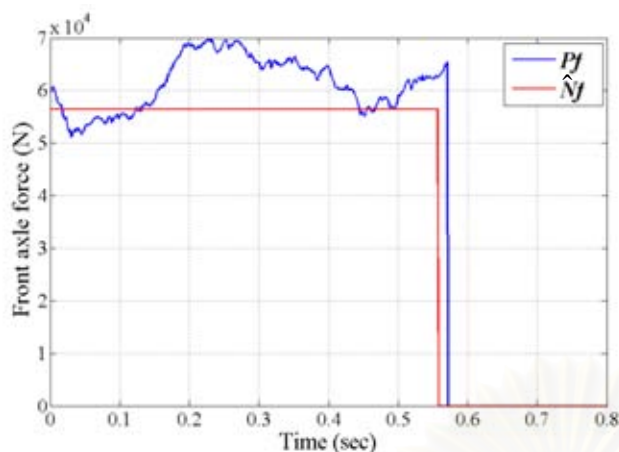
รูปที่ 4.11ก โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.25L



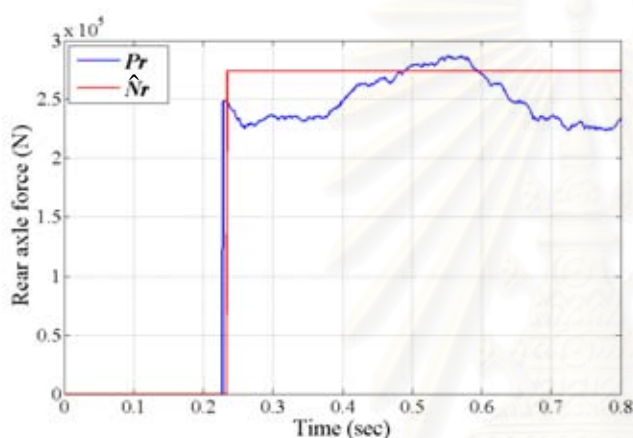
รูปที่ 4.11ข โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.5L



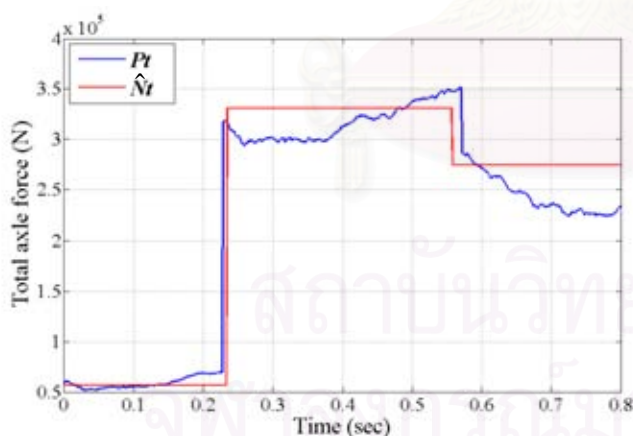
รูปที่ 4.11ค โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ 0.75L



รูปที่ 4.11g น้ำหนักเพลาน้ำหนัที่คำนวณได้, \hat{N}_f (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาน้ำจริง, $P_f(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)



รูปที่ 4.11จ น้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้, \hat{N}_r (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำเพลาลังจริง, $P_r(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)

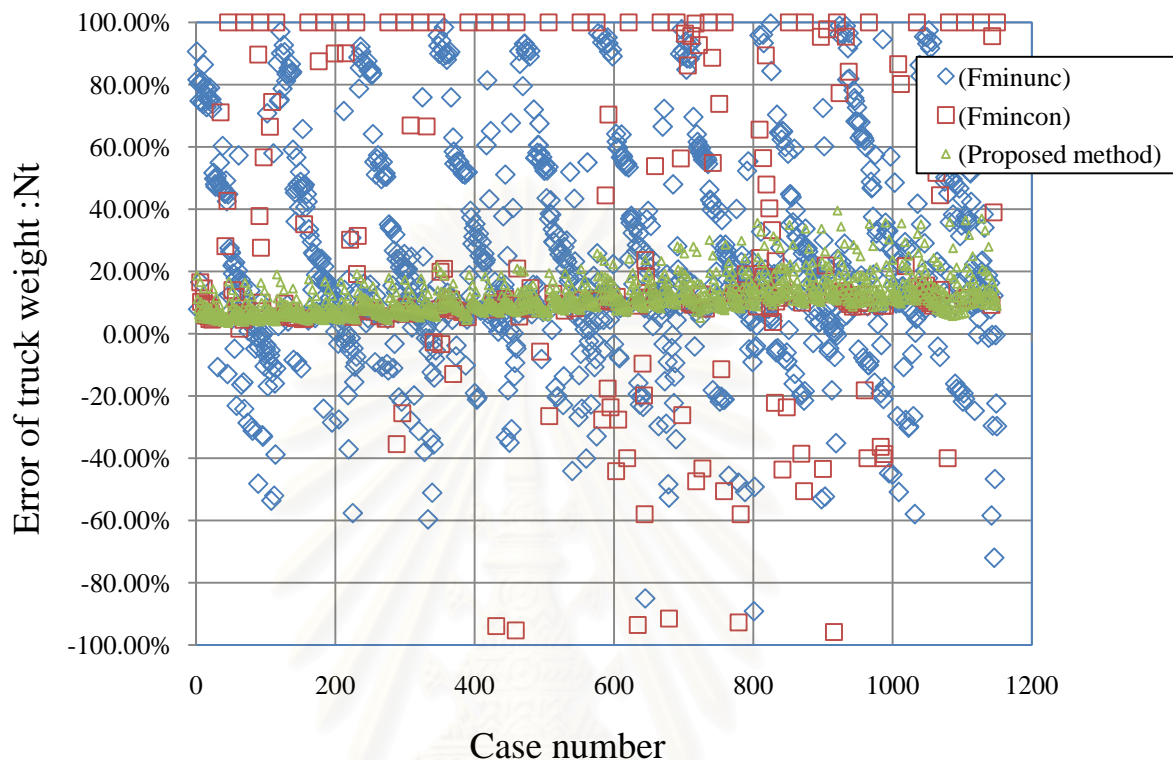


รูปที่ 4.11ด น้ำหนักรวมที่คำนวณได้, \hat{N}_t (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับแรงกระทำรวมจริง, $P_t(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน)

จากตัวอย่างผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระดังรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระในรูปที่ 4.4 พบว่า ความขรุขระของพื้นผิวสะพานมีผลทำให้สัญญาณโมเมนต์มีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ และจากเหตุผลดังกล่าวทำให้มีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นในการหาน้ำหนักเพล และพารามิเตอร์ต่างๆ ของรถบรรทุก

4.3.1 ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ

ทำการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบพื้นผิวสะพานมีความขรุขระด้วยวิธีการทั้ง 3 วิธีเช่นเดียวกับการคำนวณในหัวข้อที่ 4.2.1 โดยที่ผลการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้แสดงในรูปที่ 4.12



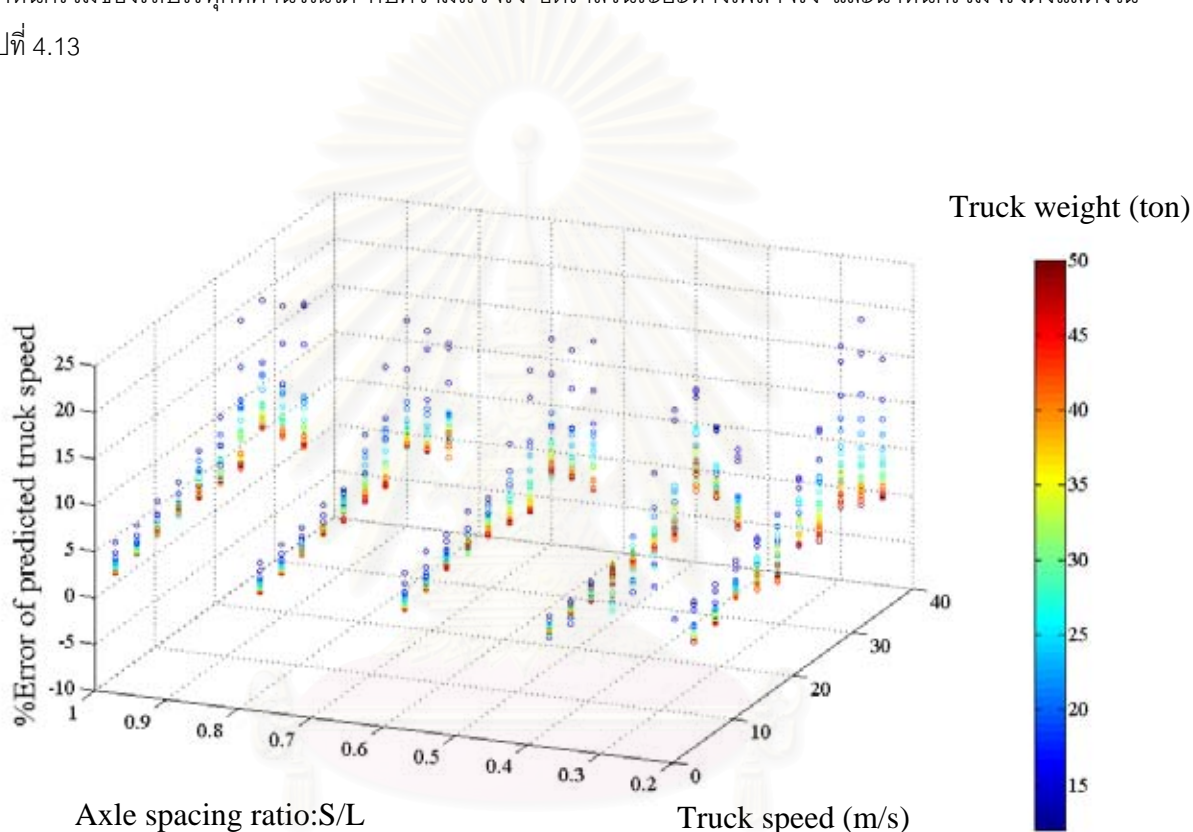
รูปที่ 4.12 ผลการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 3 วิธี

จากผลการคำนวณดังกล่าวพบว่า การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกวิธีที่ 1 (Fminunc) ได้คำตอบที่ใกล้เคียงจริง 227 คำตอบจาก 1,150 ตัวอย่าง หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณ 19.74% ส่วนการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกวิธีที่ 2 (Fmincon) ได้คำตอบที่ใกล้เคียงจริง 129 คำตอบ หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณ 11.22% ในขณะที่การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกวิธีที่ 3 ซึ่งใช้คำสั่ง Fmincon แบบใช้เงื่อนไขการวนรอบ ได้คำตอบที่ใกล้เคียงจริงถึง 1,130 คำตอบ หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณ 98.26% โดยที่กรณีที่ไม่สามารถหาน้ำหนักได้ส่วนหนึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการปลดเงื่อนไขขอบเขตล่างของน้ำหนักเพลาน้ำ เหมือนในกรณีของการหาน้ำหนักรถแบบพื้นผิวดถนนราบเรียบ ทำให้สามารถหาคำตอบได้เพิ่มขึ้นอีก 5 กรณีได้แก่กรณีที่ 465, 809, 810, 924 และ 925 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเป็นกรณีเดียวกับที่หาน้ำหนักไม่ได้ในกรณีพื้นผิวสะพานมีความราบเรียบ นอกจากนี้กรณีที่หาน้ำหนักไม่ได้อีก 13 กรณีสามารถปรับปรุงให้หาน้ำหนักได้โดยที่เพิ่มขอบเขตของความเร็วเปรียบเทียบให้มากขึ้น จากเดิมยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 6% เพิ่มเป็น 10% ทำให้สามารถหาน้ำหนักได้ โดยที่กรณีดังกล่าวได้แก่กรณี 113, 319, 642, 701, 806, 811, 816, 839, 921, 926, 931 และ 1041 ในอีก 2 กรณีที่เหลือคือกรณีที่ 978 และ 1102 สามารถหาคำตอบได้โดยใช้คำสั่ง Fmincon แบบมีเงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ

4.3.2 พฤติกรรมของผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ ในหัวข้อนี้จะนำผลการหาน้ำหนัก และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรถบรรทุก มาพิจารณาถึงพฤติกรรมในลักษณะเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.2

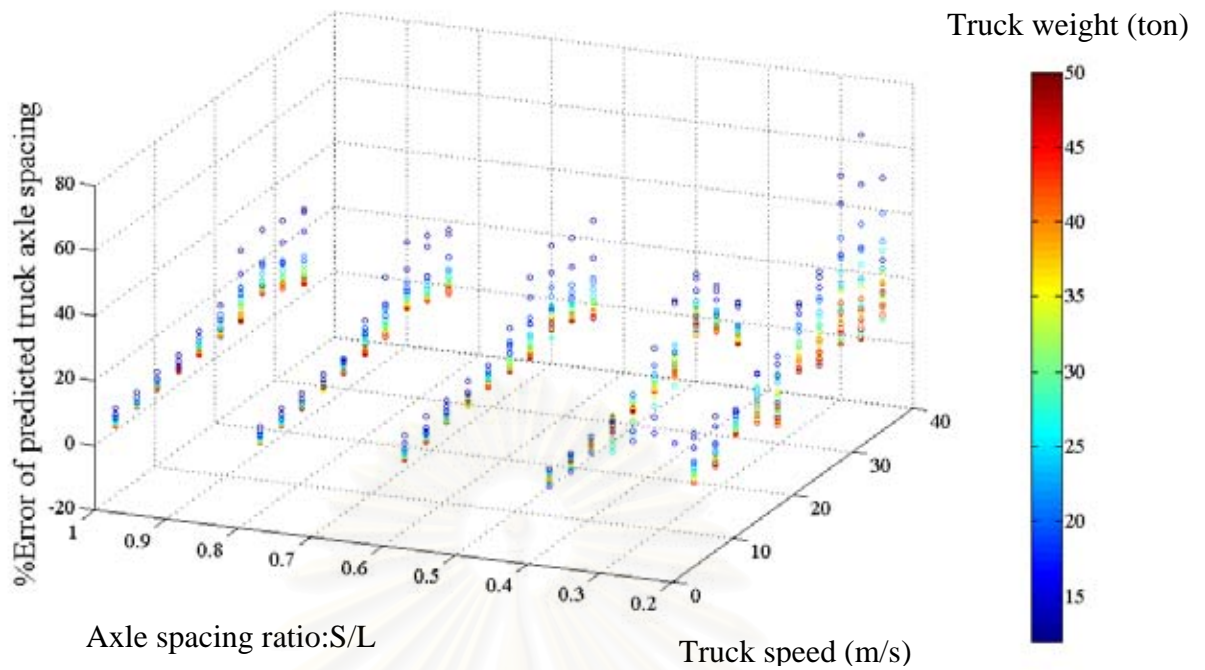
4.3.2.1 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับความเร็ว อัตราส่วนระยะห่างเพลลา และ น้ำหนักรวมของรถบรรทุก

เปรียบเทียบผลความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ระยะห่างเพลลา น้ำหนักเพลลาหน้า น้ำหนักเพลลาหลัง และ น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้ กับความเร็วจริง อัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริง และน้ำหนักรวมจริงดังแสดงในรูปที่ 4.13

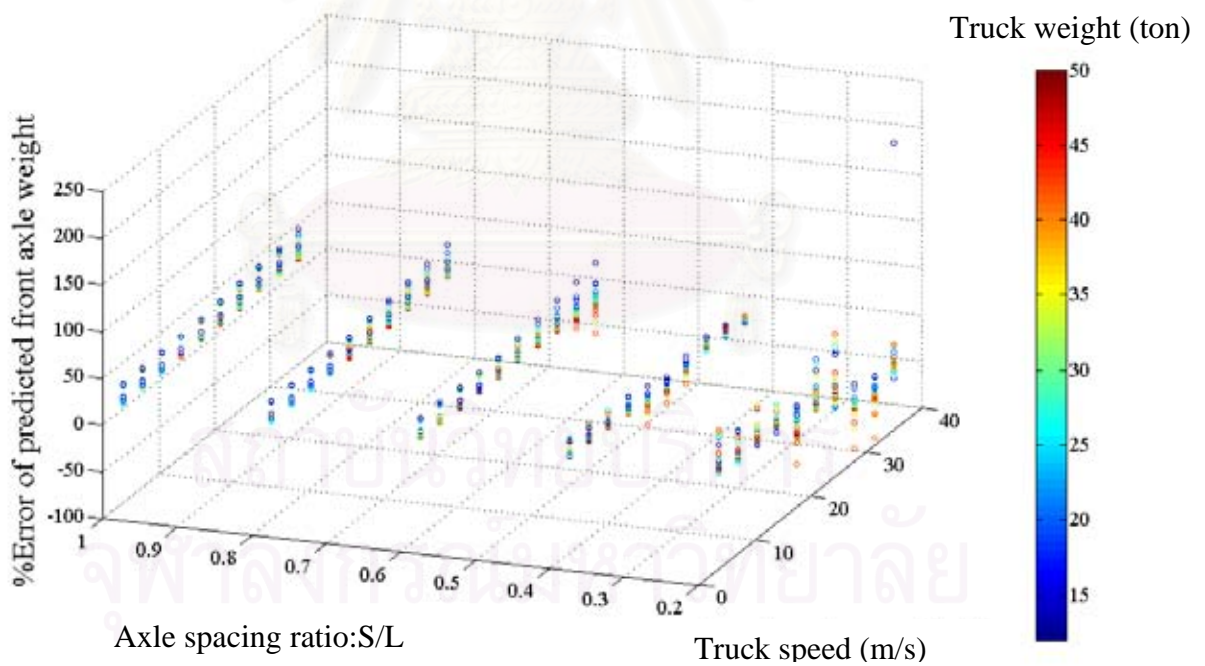


รูปที่ 4.13ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ

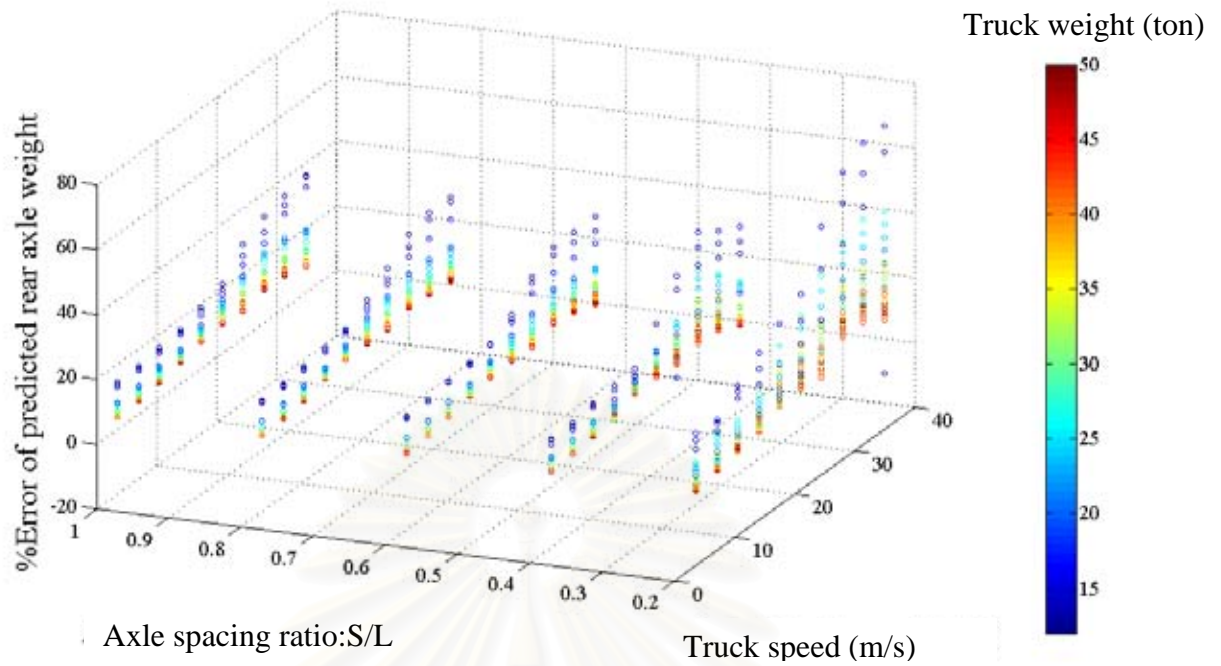
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



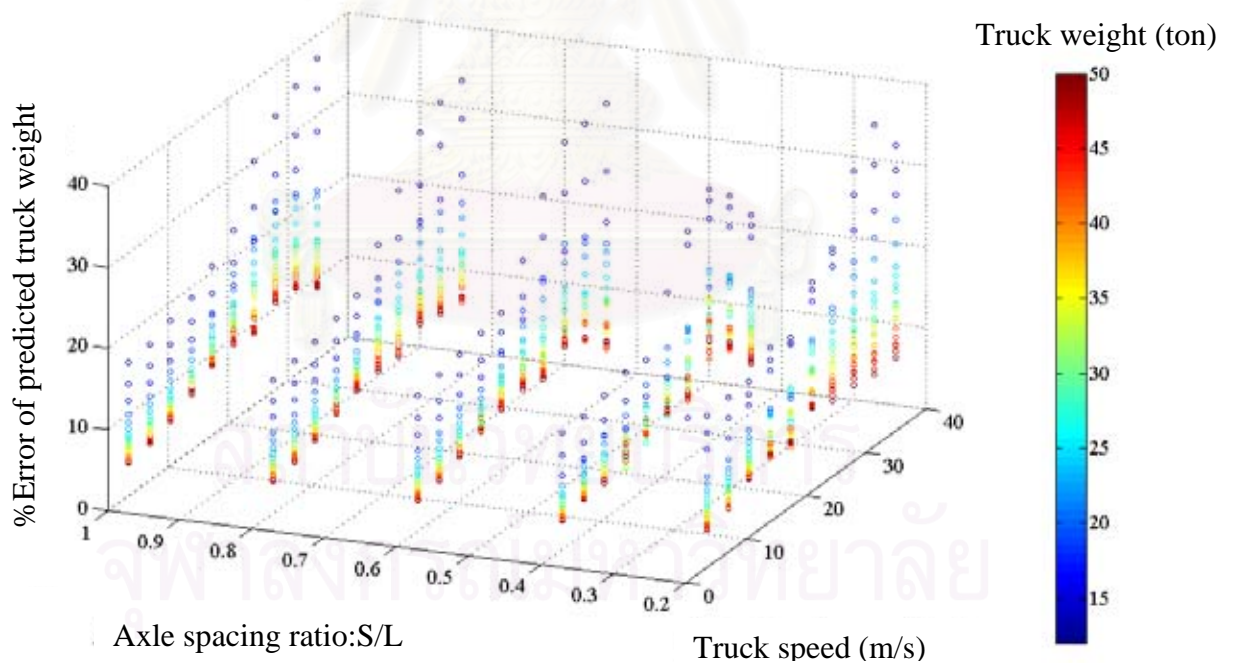
รูปที่ 4.13ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาคำนวณได้ (\hat{S}) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_r) ต่างๆ



รูปที่ 4.13ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาคำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_r) ต่างๆ



รูปที่ 4.13ก ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_r) ต่างๆ



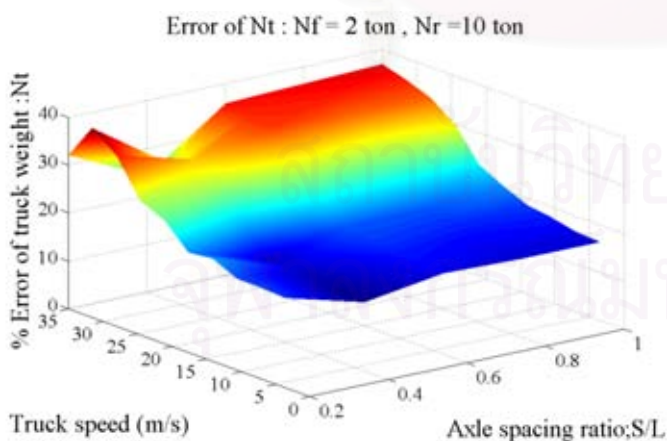
รูปที่ 4.13จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) เปรียบเทียบกับความเร็วจริง (v) อัตราส่วนระยะห่างเพลาลังจริง (S/L) และน้ำหนักรวมจริง (N_r) ต่างๆ

รูปที่ 4.13 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนในกรณีที่รถบรรทุกทุกแฉ่งบนสะพานที่มีพื้นผิวราบเรียบ (รูปที่ 4.5) พบว่า ความคลาดเคลื่อนของทุกพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้นได้แก่

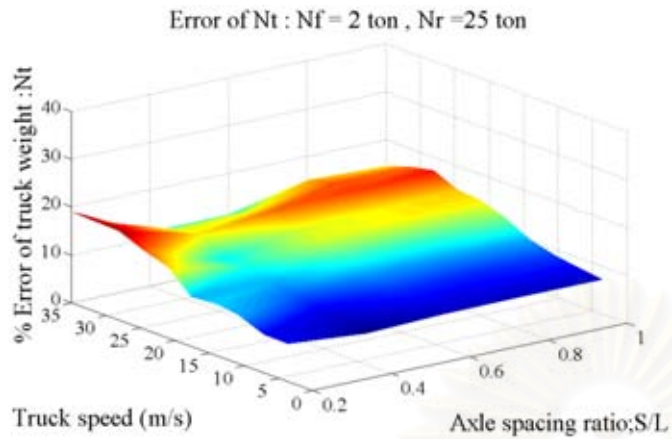
- ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{V}) เดิมอยู่ในช่วง -5% ถึง 10% เพิ่มขึ้นเป็น -10% ถึง 25%
- ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้ (\hat{S}) เดิมอยู่ในช่วง -5% ถึง 35% เพิ่มขึ้นเป็น -15% ถึง 75%
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหน้า (\hat{N}_f) เดิมอยู่ในช่วง -145% ถึง 45% เพิ่มขึ้นเป็น -92% ถึง 207%
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหลัง (\hat{N}_r) เดิมมีค่าระหว่าง -5% ถึง 40% เพิ่มขึ้นเป็น -3% ถึง 73%
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก (\hat{N}_t) เดิมอยู่ในช่วง +14% เพิ่มขึ้นเป็น +40%

โดยสรุปความคลาดเคลื่อนจะมากขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนระยะห่างเพลลาเท่ากับ 0.2 ความคลาดเคลื่อนของทุกตัวแปรจะมีค่ามาก โดยเมื่อนำกรณีนี้ที่อัตราส่วนระยะห่างเพลลา 0.2 ออก ความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ จะลดลง โดยพารามิเตอร์ที่ไวต่อกรณีนี้คือ ระยะห่างเพลลา กับน้ำหนักเพลลาหน้า ที่คำนวณได้ โดยจะมีค่าลดลงเป็น -15% ถึง 35% และ -32% ถึง 45% ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อน้ำหนักรถบรรทุกมีค่าน้อยจะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่ามากในทุกตัวแปร ลักษณะความคลาดเคลื่อนของตัวแปรเมื่อเทียบกับความเร็ว ระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจะคล้ายคลึงกับกรณีที่พื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ

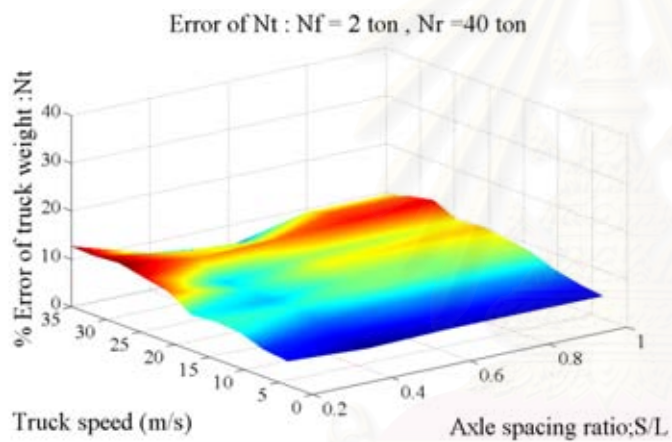
ถัดมาทำการพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมเปรียบเทียบกับความเร็ว อัตราส่วนระยะห่างเพลลา และค่าน้ำหนักเพลลาหน้า - หลัง ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.14



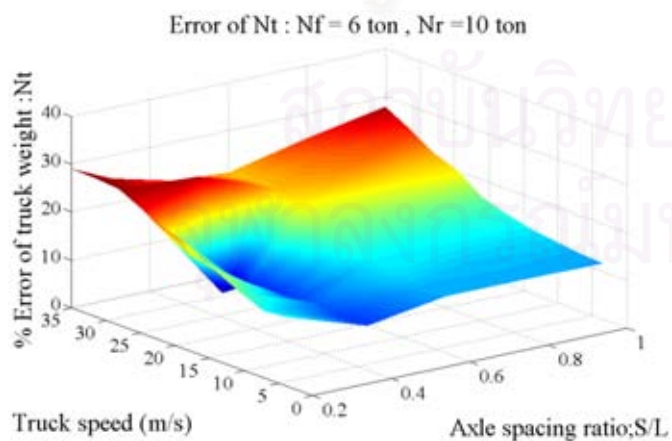
รูปที่ 4.14ก ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลลาหน้า (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลลาหลัง (N_r) 10 ตัน



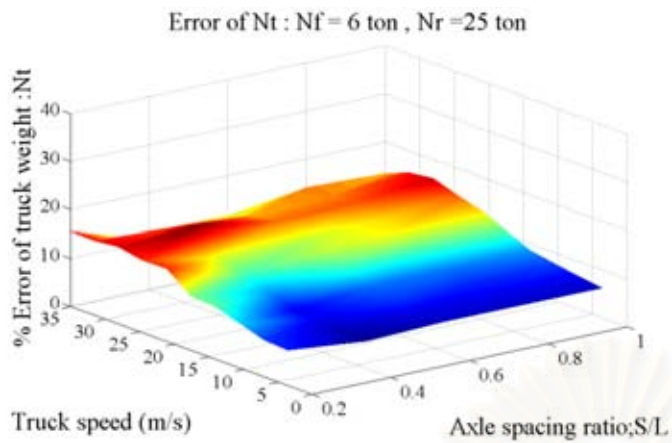
รูปที่ 4.14ข ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน



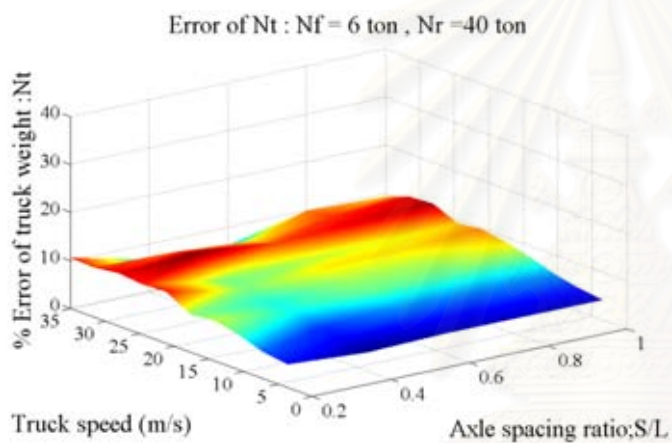
รูปที่ 4.14ค ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 2 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 40 ตัน



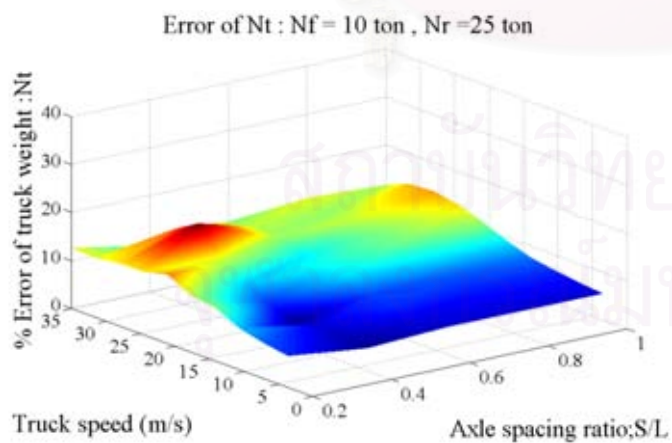
รูปที่ 4.14ง ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 10 ตัน



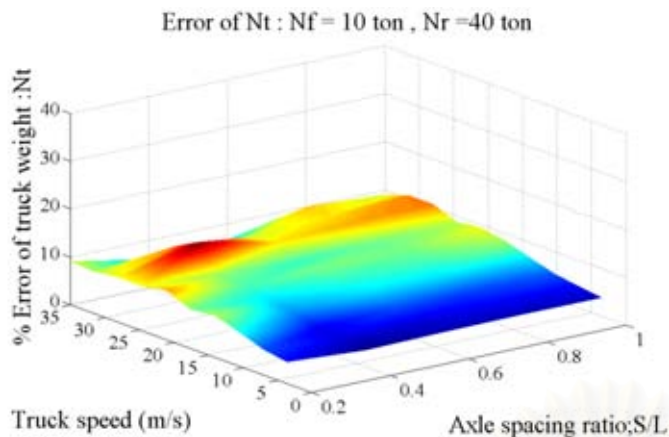
รูปที่ 4.14จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน



รูปที่ 4.14ฉ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 6 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 40 ตัน



รูปที่ 4.14ช ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_t) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาน้ำ (N_f) 10 ตัน น้ำหนักเพลาลัง (N_r) 25 ตัน



รูปที่ 4.14 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวม (\hat{N}_r) ที่คำนวณได้ เปรียบเทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง ในกรณีที่มีน้ำหนักเพลาหน้า (N_f) 10 ตัน น้ำหนักเพลาหลัง (N_r) 40 ตัน

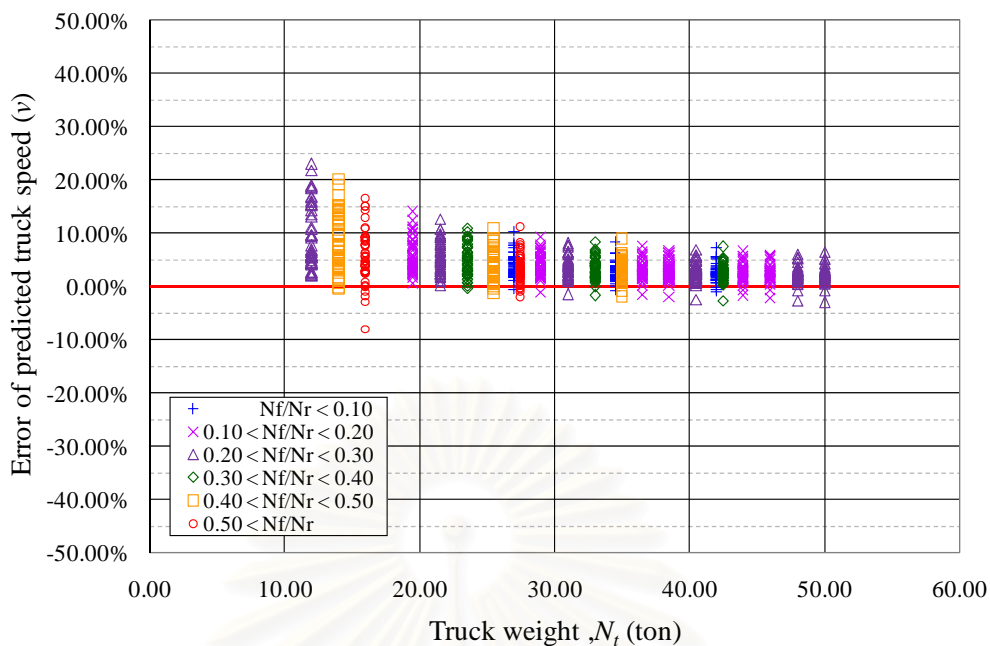
จากการพิจารณารูปที่ 4.14 พบว่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทุกในกรณีที่น้ำหนักเพลาหน้าและหลังต่าง ๆ นั้น คล้ายคลึงกับความคลาดเคลื่อนในกรณีที่พื้นสะพานมีความราบเรียบ คือมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อความเร็วรถบรรทุกมากขึ้น, มีความคลาดเคลื่อนมากเมื่ออัตราส่วนระยะเพลายู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.4 และความคลาดเคลื่อนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนระยะเพลายู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 และความคลาดเคลื่อนจะมากขึ้นอีกครั้งเมื่ออัตราส่วนระยะเพลามากกว่า 0.7

ในกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระนี้ ความคลาดเคลื่อนจะมีขนาดมากกว่ากรณีของพื้นผิวสะพานราบเรียบโดยที่มีขนาดอยู่ในช่วง +40% จากเดิมที่อยู่ในช่วง +15% โดยที่ความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดมากจะอยู่ในช่วงที่น้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีค่าน้อย หรือไม่เกิน 20 ตัน เมื่อทำการกรองข้อมูลรถบรรทุกที่มีขนาดดังกล่าวออก ความคลาดเคลื่อนจะลดลงเหลือ +23%

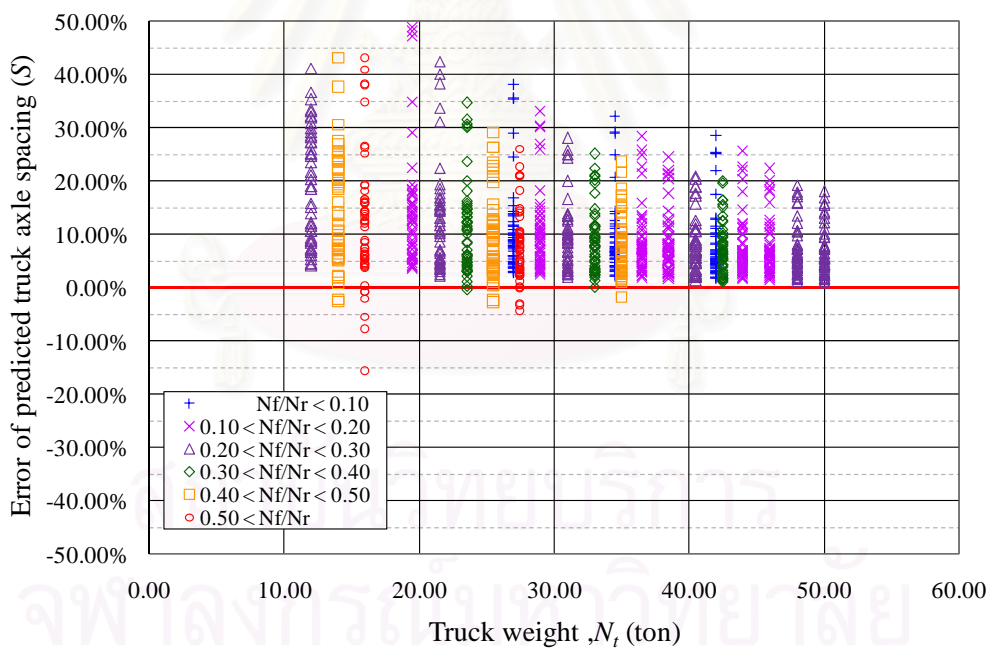
4.3.2.2 เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ กับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาหน้าต่อน้ำหนักเพลาหลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

เปรียบเทียบผลความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ระยะห่างเพลาน้ำหนักเพลาหน้า น้ำหนักเพลาหลัง และน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ อัตราส่วนน้ำหนักเพลาหน้าต่อน้ำหนักเพลาหลังจริง และน้ำหนักรวมจริงของรถบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 4.15

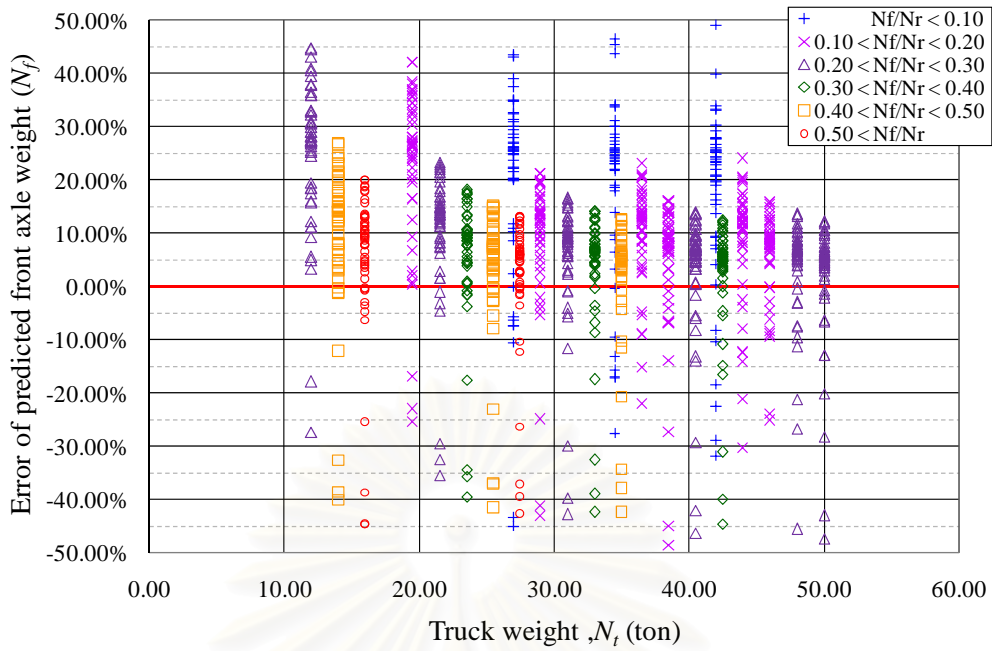
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



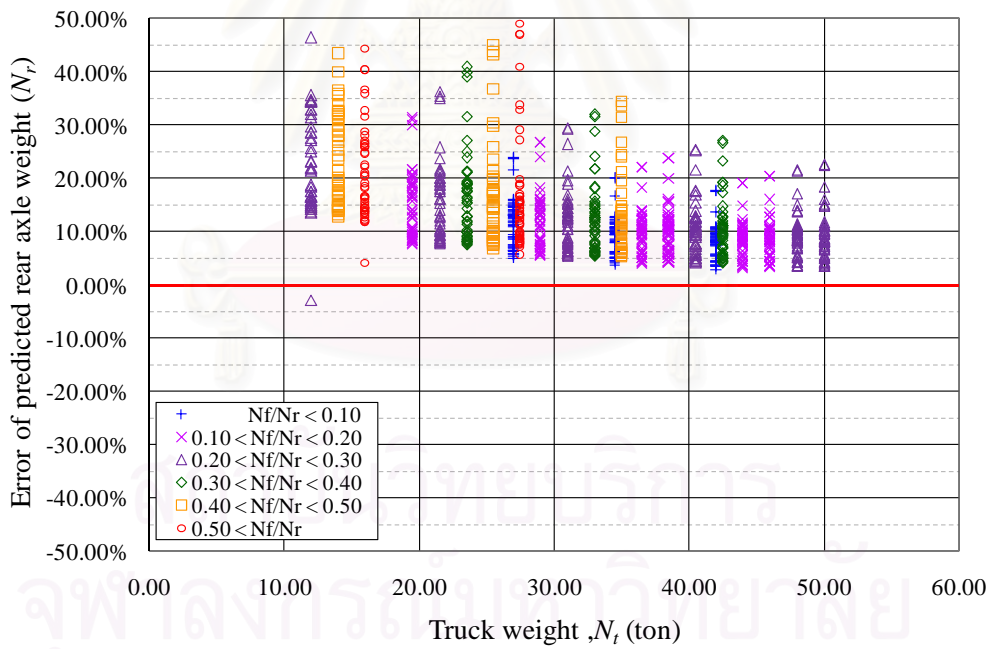
รูปที่ 4.15ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ (\hat{v}) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



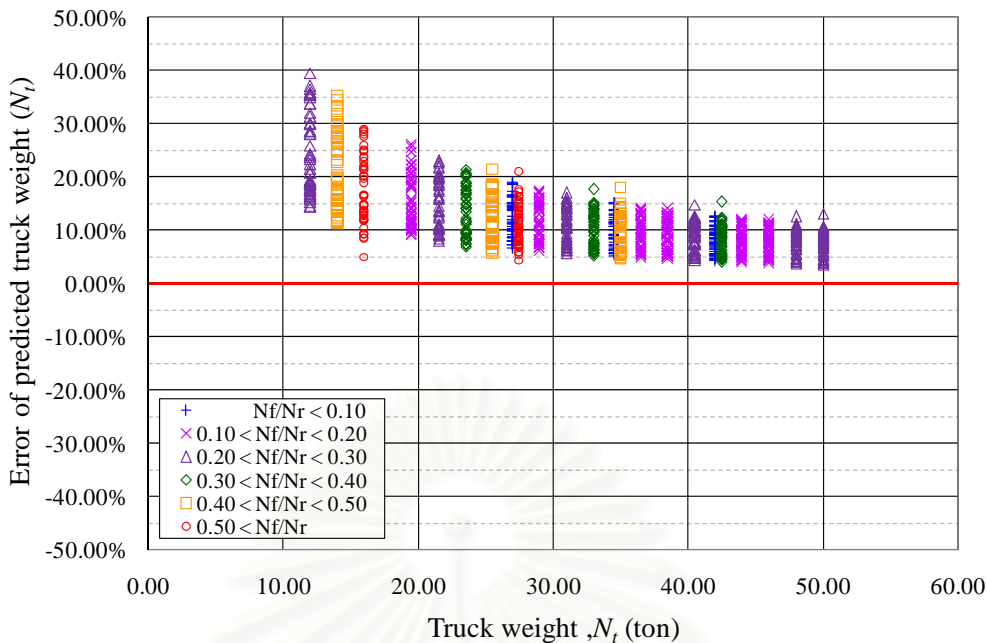
รูปที่ 4.15ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (\hat{S}) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



รูปที่ 4.15 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลหน้าที่ได้คำนวณได้ (\hat{N}_f) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลหน้าต่อน้ำหนักเพลหลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



รูปที่ 4.15 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลหลังที่ได้คำนวณได้ (\hat{N}_r) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลหน้าต่อน้ำหนักเพลหลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ



รูปที่ 4.15จ ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อ น้ำหนักเพลาลังจริง (N_f / N_r) และน้ำหนักรวมจริง (N_t) ต่างๆ

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังจริง และน้ำหนักรวมจริง พบว่า

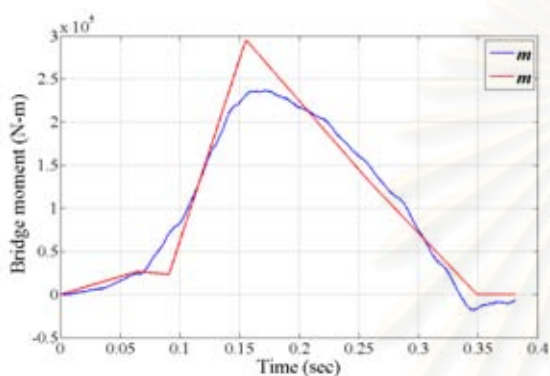
- ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ลดลง เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีค่ามากขึ้น
- ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อยลงเมื่อน้ำหนักรวมมากขึ้น และเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลาลังมากขึ้นทำให้ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาลดลง
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักเพลาน้ำมีค่ามากขึ้น
- ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้มีค่าลดลง เมื่อน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวสะพานเรียบพบว่า มีความแตกต่างกันโดยที่ความเร็วและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้ จะมีคลาดเคลื่อนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีค่ามากขึ้น ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะไม่เด่นชัดในกรณีพื้นผิวสะพานเรียบ

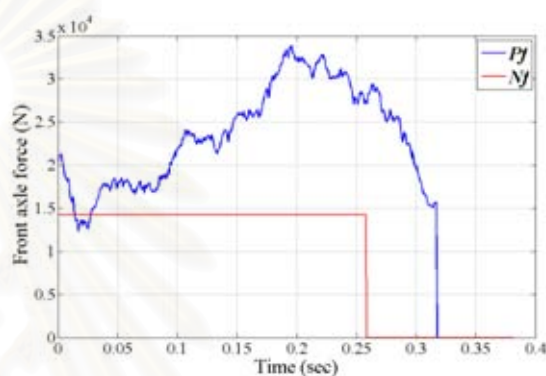
และเมื่อพิจารณากรณีที่ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีค่ามากพบว่า มีกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเกิน 20% จำนวน 98 กรณี หรือคิดเป็น 8.52% และกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเกิน 30% จำนวน 20 กรณี หรือคิดเป็น 1.74% โดยกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนสูงเหล่านี้ ทั้งหมดจะเป็นกรณีที่น้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีค่าน้อยกว่า 25 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13จ เพื่อศึกษาถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นจากกรณีพื้นผิวสะพานไม่มีความขรุขระ จึงพิจารณากรณีที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 3 กรณีแรก ได้แก่กรณีที่ 921, 1128 และ 1105 โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรถบรรทุก และค่าความคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวมของรถบรรทุกของทั้ง 3 กรณีได้แสดงในตารางที่ 4.6 ค่าโมเมนต์ดัดจริงเปรียบเทียบกับโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้ และแรงที่ล้อจริงเปรียบเทียบกับน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้ของกรณีที่ 921, 1128 และ 1105 ได้แสดงในรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ในกรณีที่ได้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมสูงสุด 3 กรณีแรก

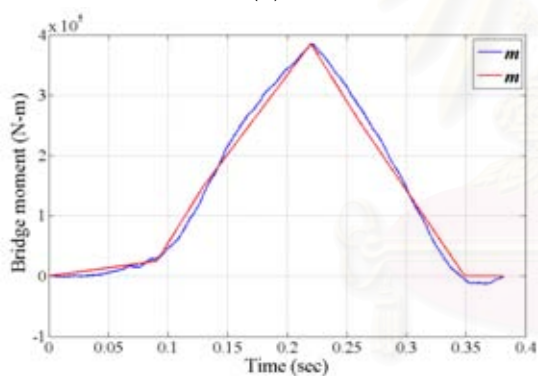
กรณี	ความเร็ว v เมตร/วินาที	ระยะห่างเพลลา S เมตร	น้ำหนักเพลลาหน้า N_f ตัน	น้ำหนักเพลลาหลัง N_r ตัน	ความคลาดเคลื่อนของ น้ำหนักรวมที่คำนวณ ได้ \hat{N}_r
921	31.50	2.00	2.00	10.00	39.53%
1128	35.00	10.00	2.00	10.00	37.01%
1105	35.00	8.00	2.00	10.00	36.48%



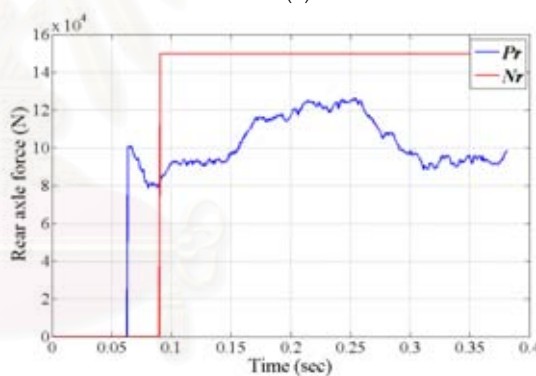
(ก)



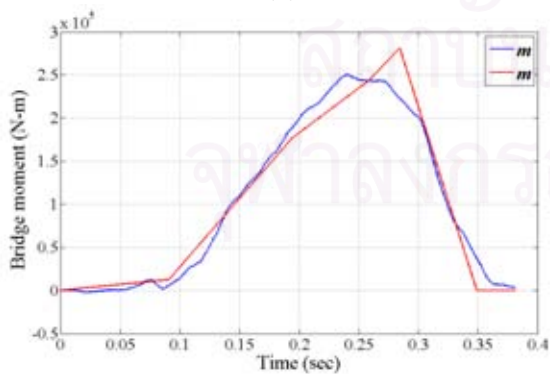
(ง)



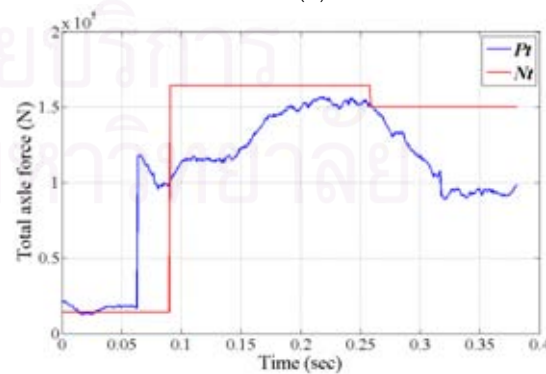
(ข)



(จ)

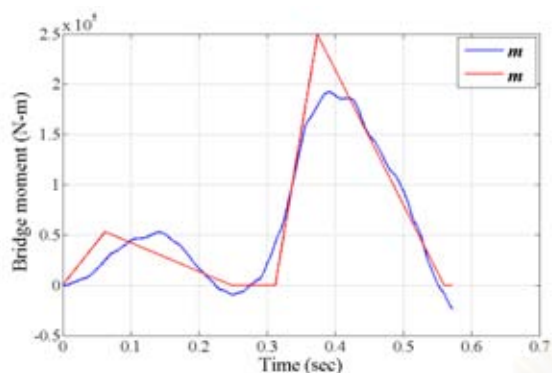


(ค)

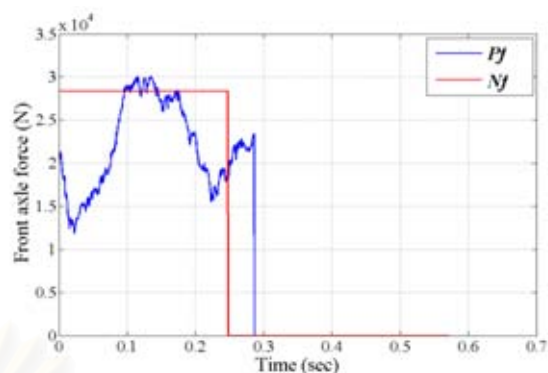


(ฉ)

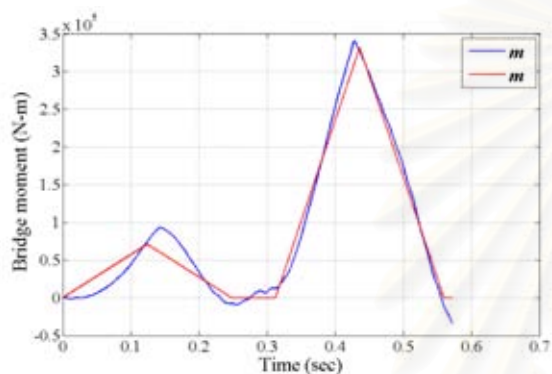
รูปที่ 4.16 เปรียบผลตอบสนองของที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) กับผลตอบสนองจริง (เส้นสีน้ำเงิน) ของกรณีศึกษาที่ 921 (ก) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.25L (ข) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.5L (ค) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.75L (ง) แรงที่ล้อหน้า (จ) แรงที่ล้อหลัง (ฉ) แรงที่ล้อรวมของรถบรรทุก



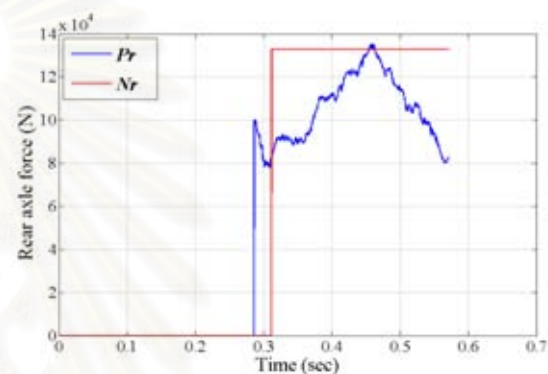
(ก)



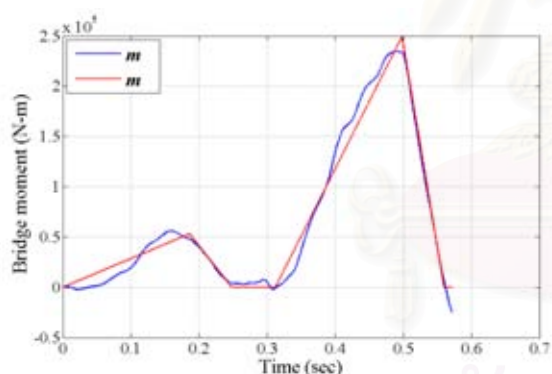
(ง)



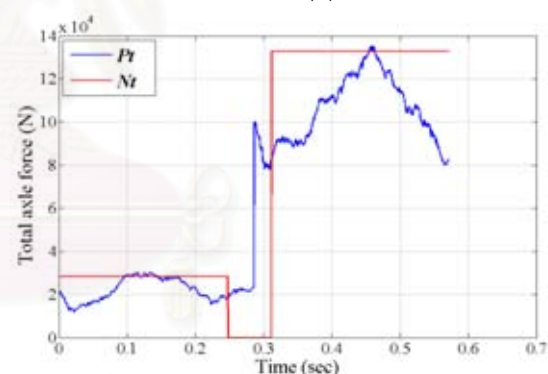
(ข)



(จ)

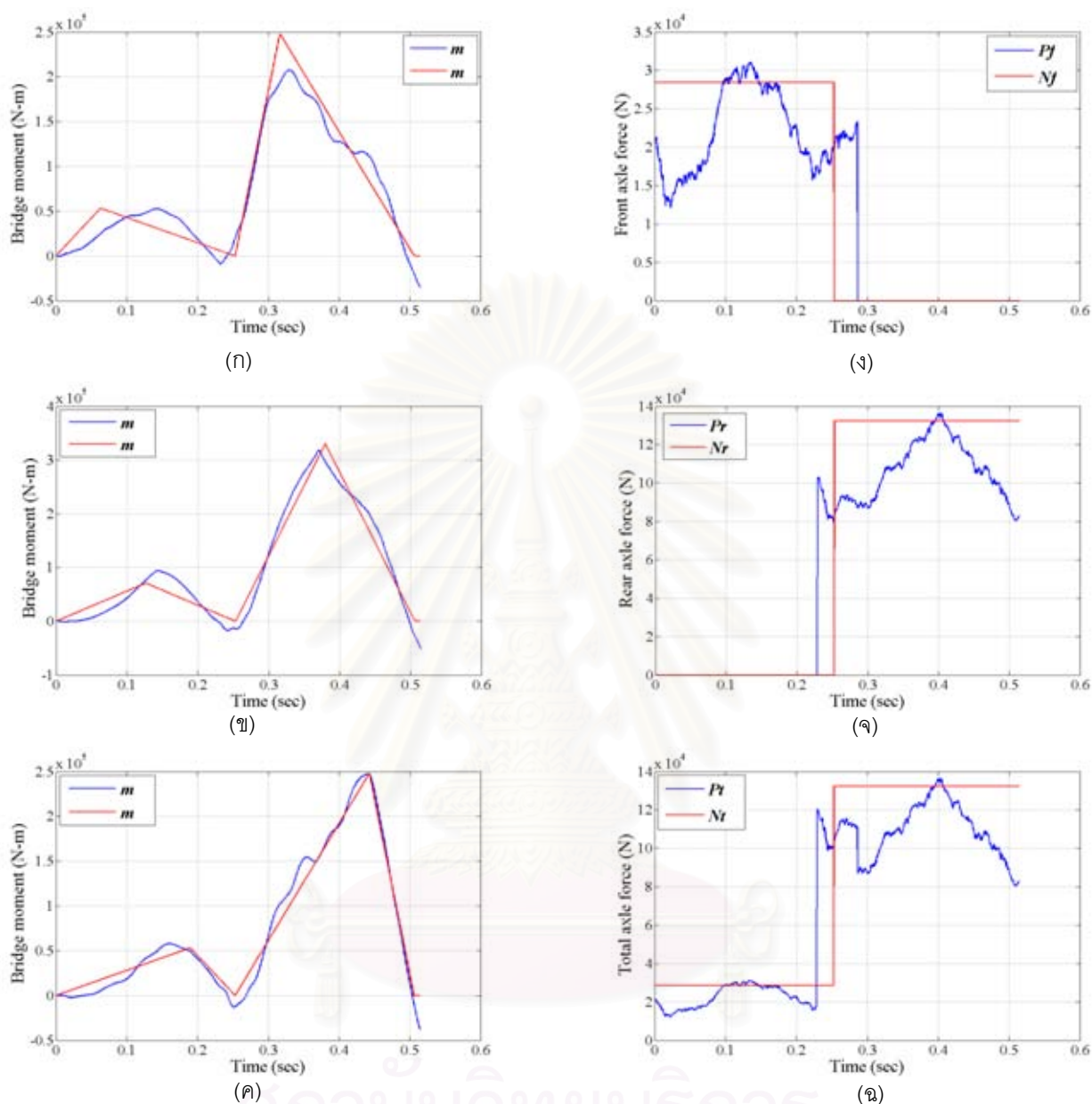


(ค)



(ฉ)

รูปที่ 4.17 เปรียบผลตอบสนองที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) กับผลตอบสนองจริง (เส้นสีน้ำเงิน) ของกรณีศึกษาที่ 1128 (ก) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.25L (ข) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.5L (ค) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.75L (ง) แรงที่ล้อหน้า (จ) แรงที่ล้อหลัง (ฉ) แรงที่ล้อรวมของรถบรรทุก



รูปที่ 4.18 เปรียบผลตอบสนองที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) กับผลตอบสนองจริง (เส้นสีน้ำเงิน) ของกรณีศึกษาที่ 1105 (ก) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.25L (ข) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.5L (ค) โมเมนต์ดัดที่ระยะ 0.75L (ง) แรงที่ล้อหน้า (จ) แรงที่ล้อหลัง (ฉ) แรงที่ล้อรวมของรถบรรทุก

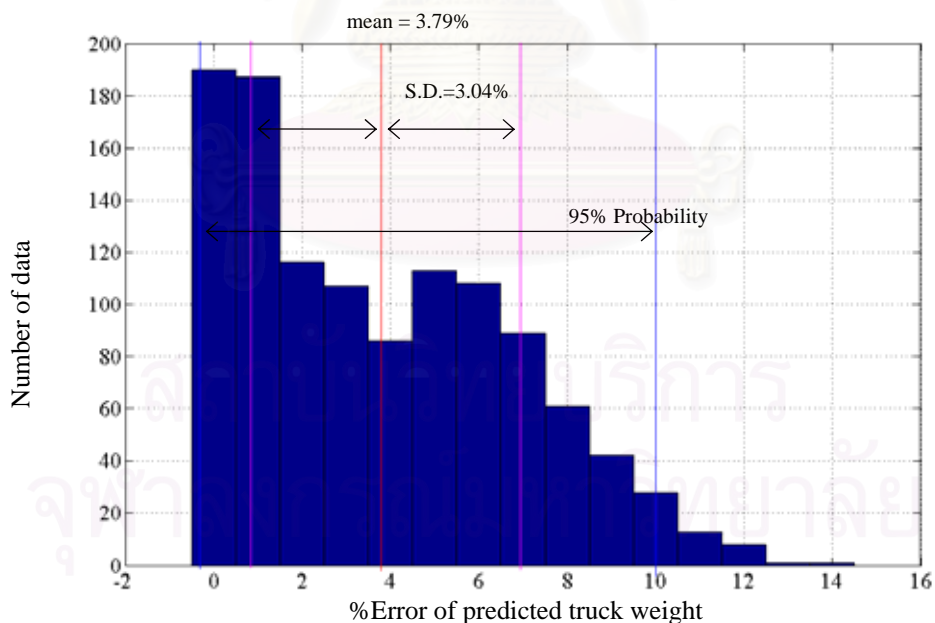
จากการพิจารณากรณีที่ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมมีค่ามากพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้น ไม่ได้มีสาเหตุมาจากระบบการคำนวณน้ำหนักที่เสนอ แต่เกิดจากแรงที่ล้อรถมีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อพื้นผิวถนนมีความขรุขระ โดยทั้ง 3 กรณีจะสังเกตว่าขนาดของแรงที่ล้อ และแรงรวม จะเพิ่มมากขึ้นจากน้ำหนักเพลาสถิต และน้ำหนักรวมอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อพิจารณาโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จะพบว่าได้ค่าใกล้เคียงกับค่าโมเมนต์ดัดจริงทั้ง 3 กรณี จึงสรุปได้ว่าเมื่อพื้นผิวสะพานมีความขรุขระแล้วจะก่อให้เกิดผลทางพลศาสตร์ของแรงที่ล้อรถบรรทุกอย่าง

มีนัยสำคัญ ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการหาน้ำหนักที่เสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้น้ำหนักเพลาสติตของรถบรรทุกในการคำนวณ จึงก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจากการศึกษาในแบบจำลองสะพานที่ไม่มีความขรุขระ

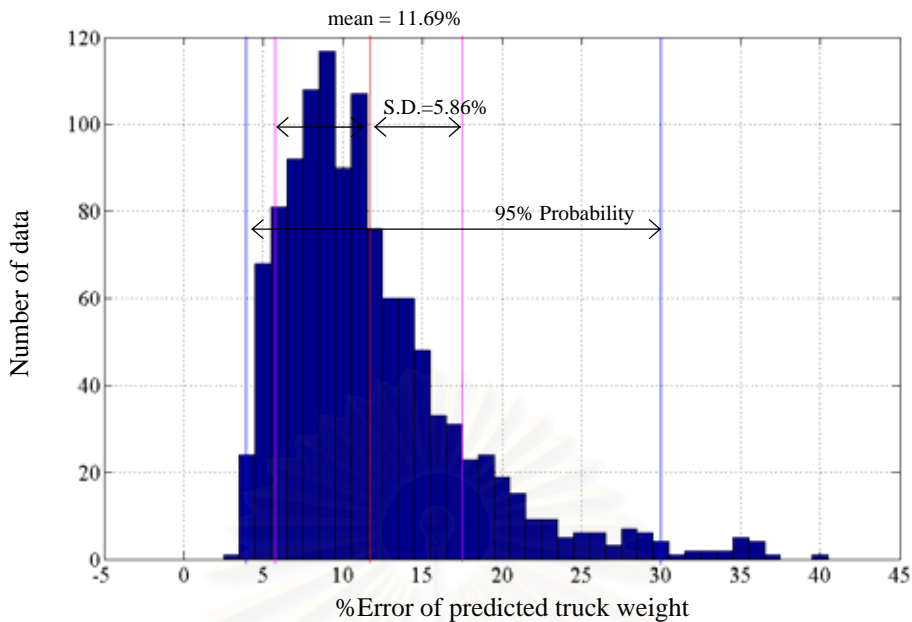
4.4 สรุปผลการทดลองการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก กรณีศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

จากการศึกษาการหาน้ำหนักจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในบทนี้พบว่า วิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถที่เสนอนั้นมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักรถถึง 98% ทั้งในกรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ และกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ และสามารถพัฒนาประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักได้อีก โดยที่ผลการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน +14% ในกรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ และมีค่าไม่เกิน +40% ในกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ ในกรณีที่ความคลาดเคลื่อนมีค่ามากนั้นจะสังเกตได้ว่าเป็นกรณีที่น้ำหนักเพลาน้ำมีค่าน้อย (2 ตัน) หรืออัตราส่วนระยะห่างเพลามีค่าน้อย (0.2) เมื่อรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก และระยะเพลาดังกล่าวแล่นข้ามสะพาน ผลของน้ำหนักเพลาลงที่มากกว่าน้ำหนักเพลาน้ำมาก ๆ จะทำให้สัญญาณโมเมนต์ที่ได้จะมีลักษณะเหมือนสัญญาณโมเมนต์ของรถเพลาดียวแล่นข้ามสะพาน และความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากยิ่งขึ้นอยู่กับ น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่มีค่าน้อย เมื่อพิจารณาเป็นสัดส่วนแล้วจึงมีค่ามากกว่าในกรณีที่น้ำหนักรวมมีค่ามาก

ถัดมาพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรถบรรทุกโดยการวาดกราฟการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนแบบฮิสโทแกรม ดังรูปที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมแบบพื้นผิวสะพานราบเรียบ และรูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมแบบพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้กรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบ



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้กรณีพื้นผิวสะพานขรุขระ

จากการพิจารณาความคลาดเคลื่อนในรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมในกรณีพื้นผิวสะพานราบเรียบมีลักษณะกระจุกตัวอยู่ที่ความคลาดเคลื่อน 0% ถึง 2% ถัดมากราฟจะราบเรียบไปจนถึงช่วงความคลาดเคลื่อน 8% การกระจายตัวจะลดลง ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 3.79% โดยมีความคลาดเคลื่อนในความเป็นไปได้ 95% อยู่ในช่วง 0% ถึง 10% เมื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมในกรณีพื้นผิวสะพานมีความขรุขระจะเห็นได้ว่า กราฟมีการกระจายตัวที่คล้ายกับการกระจายตัวของข้อมูลทั่วไปมากกว่าและมีลักษณะเบ้ไปทางขวา หรือมีข้อมูลส่วนใหญ่ค่อนข้างไปทางซ้าย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในกรณีนี้เท่ากับ 11.69% และมีความคลาดเคลื่อนในความเป็นไปได้ 95% อยู่ในช่วง 3% ถึง 30%

เมื่อพิจารณาผลของความเร็ววิกฤตจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ได้ความเร็ววิกฤตของรถบรรทุกกรณีน้ำหนัก 12 ตัน 25 ตัน และ 50 ตัน เท่ากับ 43.47, 31.63 และ 22.46 เมตร/วินาที (156, 114 และ 81 กม./ชม) ตามลำดับ และได้ความเร็ววิกฤตของสะพานเท่ากับ 67 เมตร/วินาที (241 กม./ชม) ซึ่งจะเห็นว่าความเร็ววิกฤตของสะพานมีค่าสูงมาก ทำให้การสั่นพ้องเนื่องจากความถี่ธรรมชาติของสะพานตรงกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกไม่เกิดขึ้นในการศึกษา

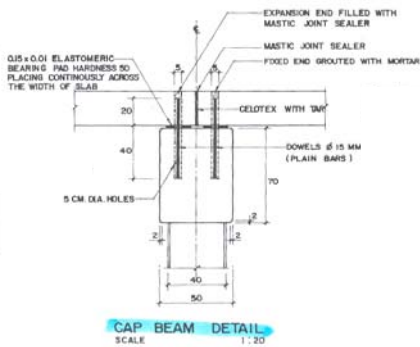
เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีการที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้ อยู่ในช่วง 1 ถึง 3 นาที สำหรับกรณีปกติ และมากกว่า 20 นาที ในกรณีที่ได้อำตอบไม่ใกล้เคียงจริงซึ่งมีจำนวน 19 กรณีในการศึกษาแบบพื้นผิวสะพานราบเรียบ และ 20 กรณีในการศึกษาแบบพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ กรณีที่ได้คำตอบไม่ใกล้เคียงจริงเหล่านี้ใช้เวลาในการคำนวณในช่วง 5 ถึง 30 นาที เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการคำนวณให้สามารถหาคำตอบในกรณีดังกล่าวได้ โดยสรุปวิธีการหาน้ำหนักที่เสนอใช้เวลาในการคำนวณไม่เกิน 3 นาที สำหรับการคำนวณกรณีปกติซึ่งเป็นกรณีที่มีประมาณ 98% ของกรณีทั้งหมด จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้ใช้เวลาในการคำนวณไม่มากนักและเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริง

จากการศึกษาจึงสามารถสรุปผลของค่าพารามิเตอร์ต่อการหาน้ำหนักได้ดังนี้

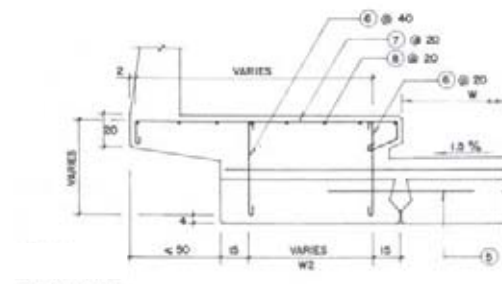
- ความเร็วของรถบรรทุก โดยความเร็วมากขึ้นจะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นในทุกตัวแปร เนื่องจากความเร็วที่มากจะทำให้แรงที่ล้อรถบรรทุกมีผลทางพลศาสตร์ที่มากขึ้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับผลของความเร็ววิกฤตของทั้งสะพาน และรถบรรทุกแต่อย่างใด
- อัตราส่วนระยะห่างระหว่างเพลาคือความยาวสะพาน (S/L) ที่เหมาะสมในวิธีการหาน้ำหนักนี้อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6
- น้ำหนักเพลาน้ำ และหลังของรถบรรทุกที่มีค่าน้อยจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในทุกตัวแปรมีความมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกน้อยกว่า 16 ตัน

ดังนั้นในการทดสอบการหาน้ำหนักจริงในภาคสนามจึงสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้เหมาะสมต่อวิธีการหาน้ำหนักได้ เช่นเลือกสะพานที่มีค่าสัดส่วนความยาวต่อระยะห่างเพลารถบรรทุกทั่วไปให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม หรือเลือกสะพานที่อยู่ในบริเวณที่มีการจำกัดความเร็วของรถบรรทุก เป็นต้น

นอกจากนี้ผลของความขรุขระที่ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่มากขึ้นจาก 14% เป็น 40% นั้น จากการศึกษพบว่าความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นเนื่องจากความขรุขระดังกล่าวก่อให้เกิดความปั่นป่วนของแรงในล้อ ให้มีค่ามากกว่าค่าน้ำหนักเพลาสถิตอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นจึงไม่ได้เกิดจากผลของวิธีการหาน้ำหนักที่เสนอโดยตรง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการคำนวณต่อผลของความขรุขระจะได้ศึกษาเพิ่มเติมในการทดสอบการหาน้ำหนักจากข้อมูลการทดสอบในภาคสนามในบทที่ 5



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.1 แบบสะพานมาตรฐานของกรมทางหลวงในส่วนของ (ก) หน้าตัด (ข) แพลน (ค) ตอม่อ และ (ง) ขอบทางตามลำดับ

โดยสะพานมีลักษณะเป็นสะพานคอนกรีตขนาด 3 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) มีช่วงสะพานทั้งสิ้น 25 ช่วงสะพานโดยแต่ละช่วงสะพานมีความยาวช่วงประมาณ 10 เมตร รูปแบบโครงสร้างเป็นระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปขนาดกว้าง 1 เมตร วางเรียงกันทับหน้าด้วยคอนกรีต (topping) มีความหนารวมประมาณ 45 เซนติเมตร กว้าง 14 เมตร โดยมีคานขวางแบบคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 70x50 เซนติเมตร² ซึ่งยึดอยู่บนหัวเสา ตอม่อสะพานแบบคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 35x35 เซนติเมตร² ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และคุณสมบัติของสะพานได้แสดงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 สะพานข้ามคลองบางน้อยที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของสะพานข้ามคลองบางน้อย

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความยาวสะพาน	L	9.43	เมตร
จำนวนตำแหน่งที่ติดมาตรวัดความเครียด	m	3	ตำแหน่ง
ความถี่ของข้อมูลในการคำนวณ	$sampF$	500	รอบ/วินาที
จำนวนชิ้นส่วนของสะพานที่ถูกแบ่ง	no_ele	50	ชิ้นส่วน
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนคาน คุณสมบัติความเฉื่อยของหน้าตัดสะพาน	EI	2.71×10^9	นิวตัน-เมตร ²
น้ำหนักของสะพานต่อความยาว คุณสมบัติหน้าตัดของสะพาน	ρA	15120	กิโลกรัม/เมตร
อัตราส่วนความหน่วงของสะพาน	ξ	0.025	-

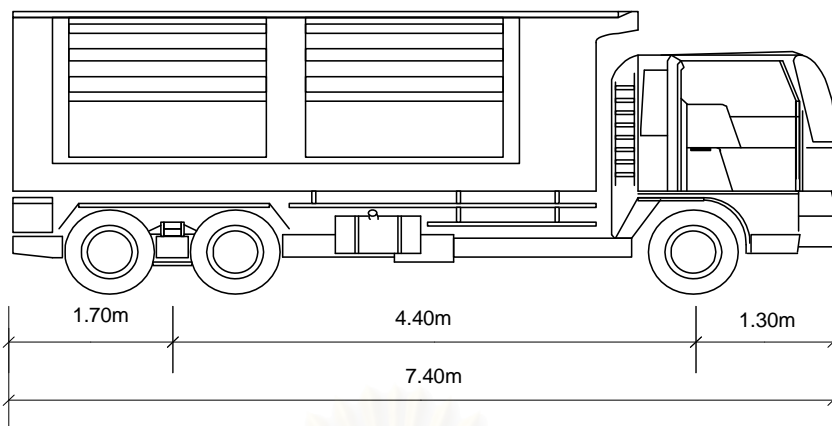
5.1.2 รถบรรทุกทดสอบ

จากข้อมูลของกรมทางหลวงซึ่งได้ทำการสรุปปริมาณจราจรเฉลี่ยคันต่อวัน บนทางหลวงในเขตกรุงเทพและบนทางหลวงในเส้นทางสายหลักปี 2546 พบว่าปริมาณของรถบรรทุก 3 เพลาขึ้นไปโดยเฉลี่ยแต่ละเส้นทางมีจำนวนประมาณ 3000 คันต่อวัน โดยจะเป็นรถบรรทุกสิบล้อประมาณ 60% ซึ่งถือว่ามากที่สุดในประเทศรถบรรทุกหนัก ประกอบกับช่วงห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุกสิบล้อซึ่งมีค่าประมาณ 4.50 เมตร ซึ่งถือว่าไม่ยาวเกินไปเมื่อเทียบกับความยาวของช่วงสะพานที่ใช้ทดสอบ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้สะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงห่างระหว่างเพลาของรถพ่วง ดังนั้นในการทดสอบจึงเลือกรถบรรทุกสิบล้อเพื่อใช้ในการทดสอบ

น้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย น้ำหนักรวมของรถบรรทุกประมาณ 20 ตัน 23 ตัน และ 26 ตัน ซึ่งเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานนั้นจะเกิดความเครียดของสะพานสูงสุดอยู่ในช่วง 30-50 $\mu\epsilon$ ซึ่งลักษณะและขนาดของรถบรรทุกได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบนั้นได้ใช้ทรายหยาบซึ่งชั่งน้ำหนักที่ด้านซึ่งในทำขนทรายก่อนทำการทดสอบ ทำการชั่งทั้งน้ำหนักเพลาน้ำ น้ำหนักเพลาน้ำสองกับเพลาน้ำสามรวมกัน (ในการทดสอบพิจารณารวมกันเป็นน้ำหนักเพลาลง) และน้ำหนักรวมของรถบรรทุกตามลำดับ ถัดมาทำการวัดความยาวของระยะห่างระหว่างเพลาของรถบรรทุก



รูปที่ 5.3 ลักษณะรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ



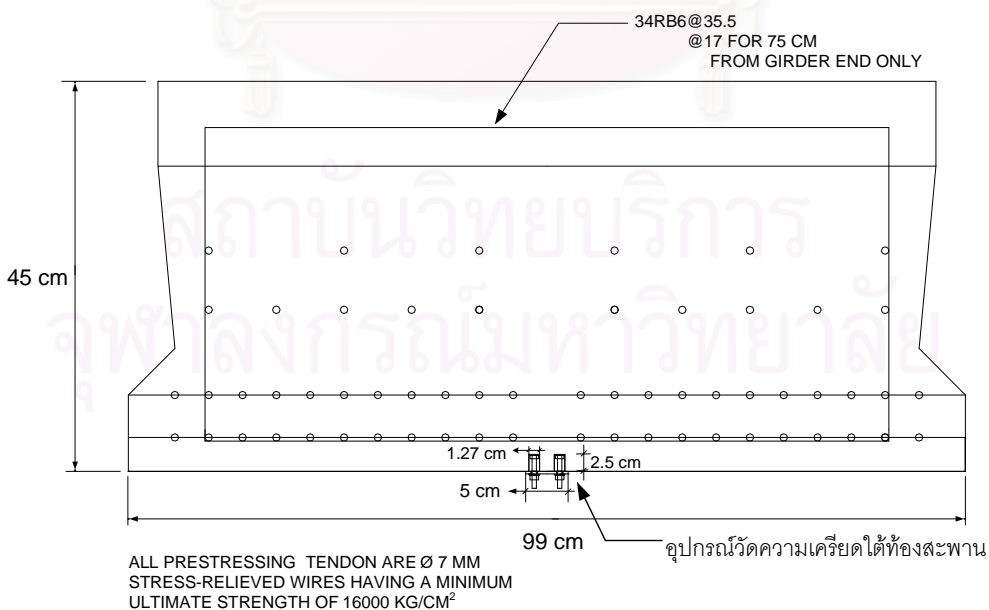
รูปที่ 5.4 ขนาดของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

5.1.3 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

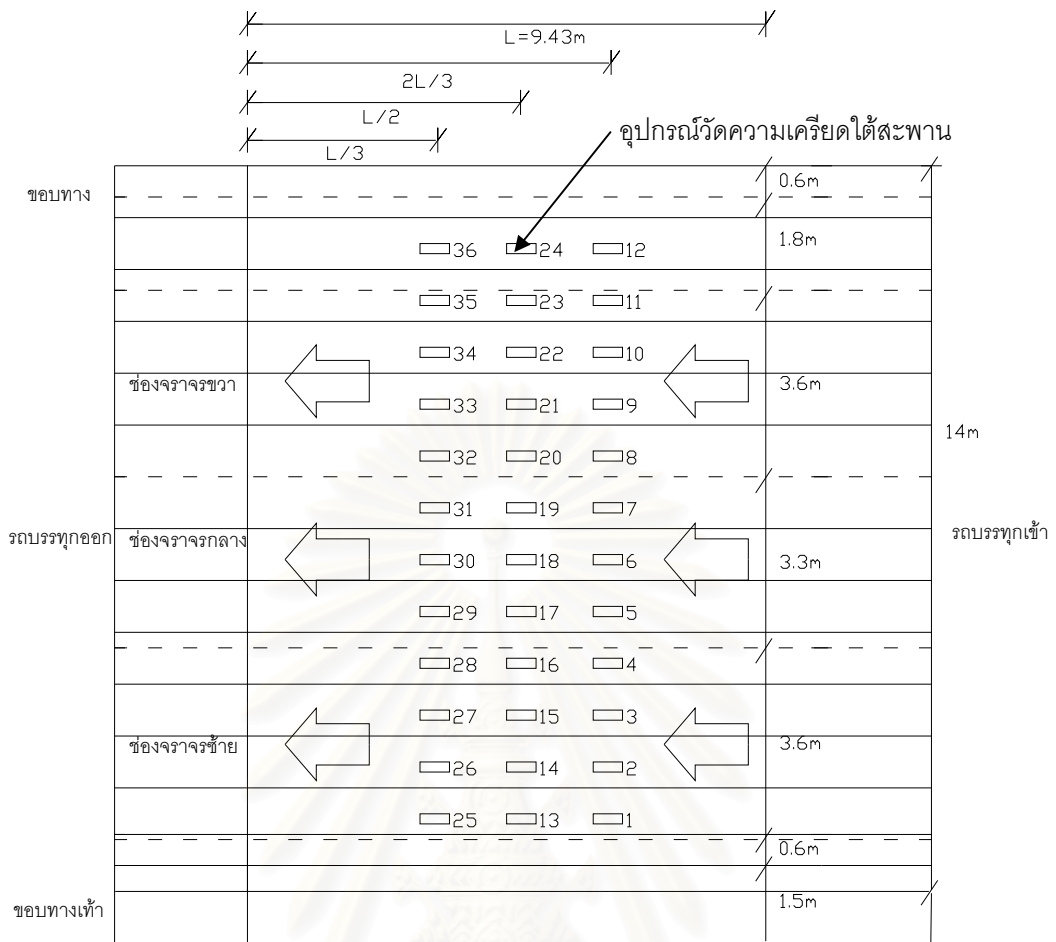
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ กับสะพานข้ามคลองบางน้อย ได้แก่ การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ ของสะพาน ระบบการรวบรวมข้อมูล และการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ

5.1.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด

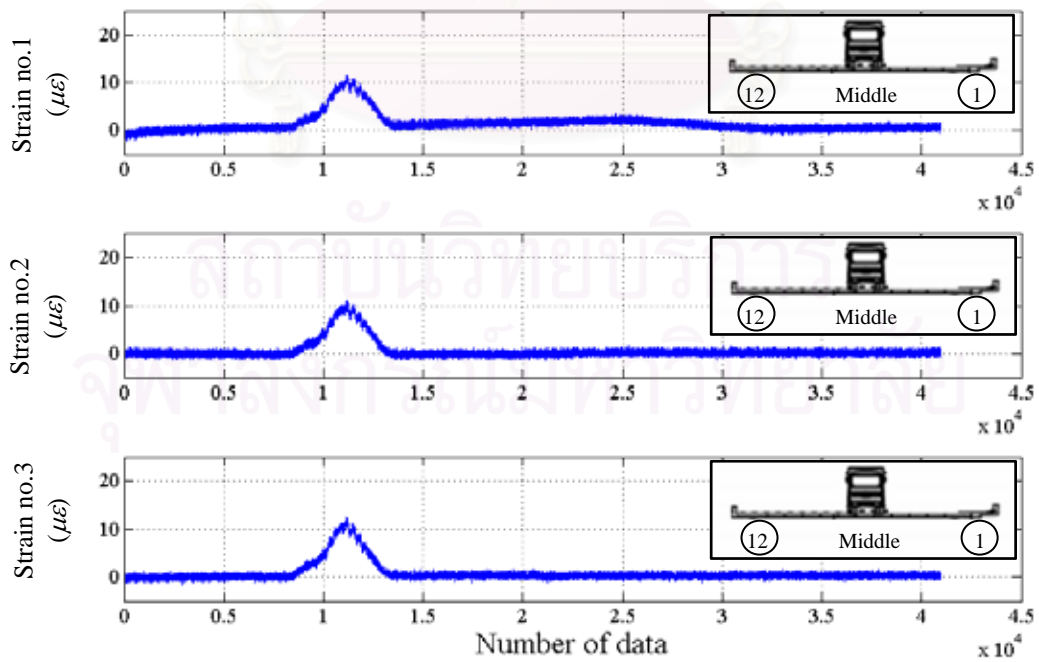
ในการทดสอบภาคสนาม ได้ทำการติดตั้งระบบเก็บข้อมูลทั้งหมดที่บริเวณใต้สะพาน ซึ่งบริเวณที่ทำการทดสอบจะประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีต 14 แผ่น โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด 3 ตำแหน่ง คือที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 ซึ่งจะติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ทุกแผ่นพื้นคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ยกเว้นที่แผ่นพื้นคอนกรีตที่ตำแหน่งริมขอบของสะพานทั้งสองด้าน ดังนั้นจะต้องใช้มาตรวัดความเครียดติดตั้งใต้สะพาน 36 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งเหตุผลที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดหลายตัวในแต่ละหน้าตัดก็เพื่อ ลดผลของการบิดตัวของสะพาน โดยตัวอย่างสัญญาณความเครียดได้แสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดใต้สะพานที่ทำการทดสอบ



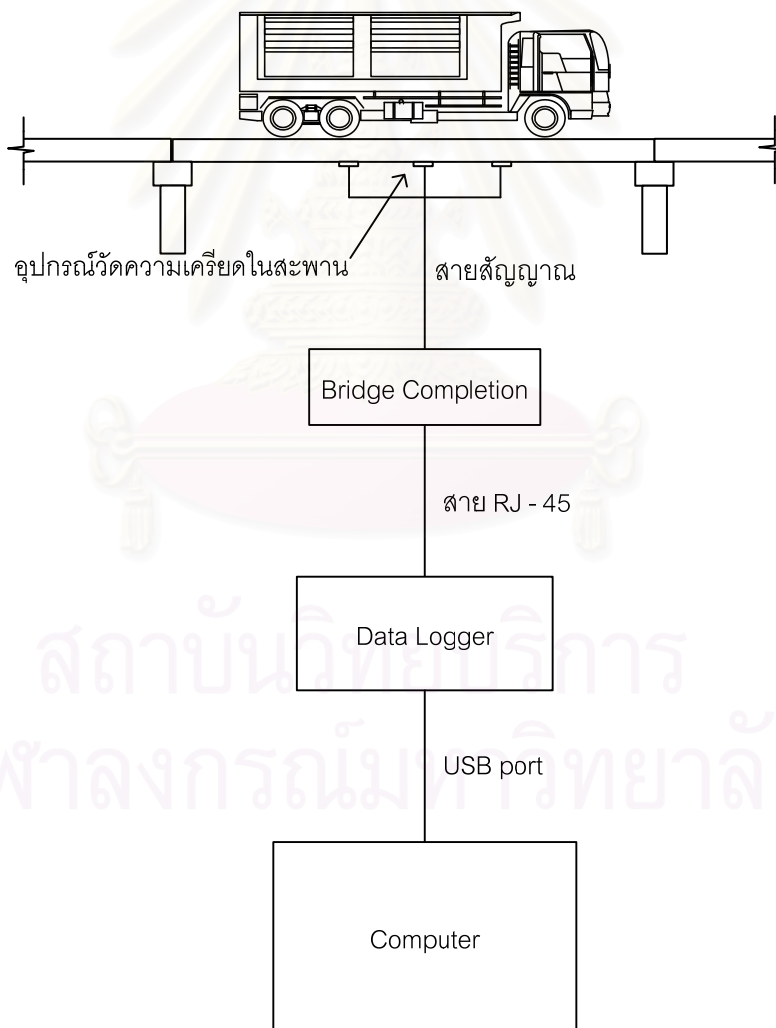
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 3

5.1.3.2 การเตรียมระบบรวบรวมข้อมูล

ระบบรวบรวมข้อมูลความเครียดที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการทดสอบได้แก่ อุปกรณ์วัดความเครียดใต้ท้องสะพาน กล้องบริจคอมพลีชัน (bridge completion) ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และ ดาต้าลอจเจอร์ (data logger) ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานโดยอุปกรณ์วัดความเครียดใต้สะพานนั้นจะมีมาตรวัดความเครียดซึ่งเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนค่าการยืดและหดของตัวมาตรวัดความเครียดให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจบบริจ (bridge) ซึ่งวงจบบริจจะส่งสัญญาณอนาลอก (analog signal) ผ่านสายแลน (สาย RJ-45) ไปยังดาต้าลอจเจอร์ (data logger) เพื่อทำการแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital signal) ซึ่งดาต้าลอจเจอร์มีทั้งหมด 36 ช่องสัญญาณ โดยความถี่ที่ใช้เก็บสัญญาณมีค่าเท่ากับ 1024 รอบต่อวินาที จากนั้นดาต้าลอจเจอร์ก็จะส่งสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางยูเอสบีพอร์ต (USB port) เพื่อทำการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกทุกต่อไป โดยจะบันทึกข้อมูลเป็นแฟ้มข้อมูลที่มีนามสกุล MAT ซึ่งเป็นแฟ้มข้อมูลของโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 5.8 แผนผังแสดงการทำงานของระบบเก็บข้อมูลความเครียด



รูปที่ 5.9 กล้องบริจคอมพลีทชั้น



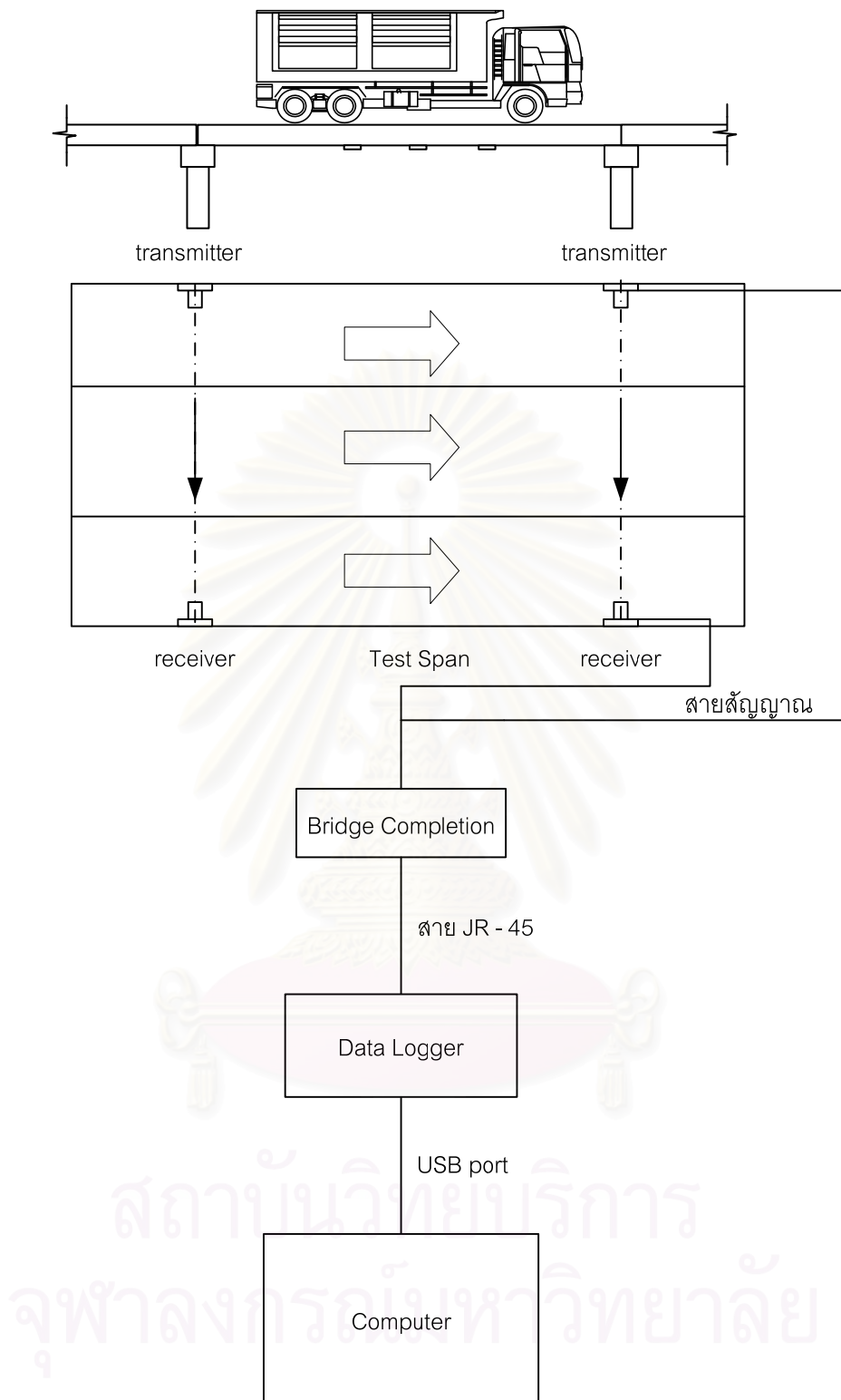
รูปที่ 5.10 ดาต้าลอคเกอร์

5.1.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ (หรืออุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งเพลลา) ของรถ ในการทดสอบจะใช้เซ็นเซอร์รับแสง (photoelectric sensor) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ในการบอกเวลาที่รถบรรทุกเข้าและออกจากสะพาน ซึ่งอุปกรณ์จะประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ เวลาในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 1.5 มิลลิวินาที (ms) โดยที่แผนผังการทำงานของระบบตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถได้แสดงดังรูปที่ 5.12 การทดสอบจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งบนสะพานที่ตำแหน่งรถเข้าและออกจากช่วงของสะพานที่ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และในรูปที่ 5.14 ได้แสดงสัญญาณของเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถขณะที่รถบรรทุกทดสอบแล่นข้ามสะพาน เปรียบเทียบกับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดความเครียด



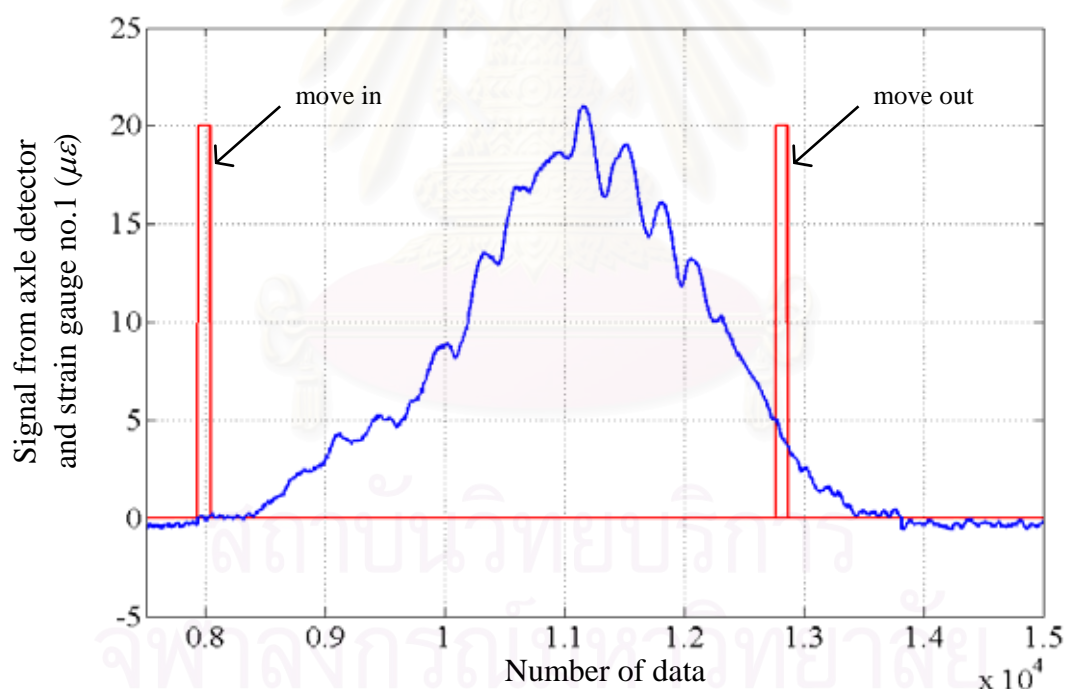
รูปที่ 5.11 เซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถบรรทุก 1. ลักษณะทั่วไป 2. ตัวรับสัญญาณ 3. ตัวส่งสัญญาณ



รูปที่ 5.12 แผนผังแสดงการทำงานของระบบตรวจจัดการเคลื่อนที่ผ่านของรถ



รูปที่ 5.13 การติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถเข้าและออก



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบสัญญาณความเครียด กับสัญญาณจากเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งที่ตำแหน่งเข้า และออกจากสะพาน

แม้ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ จะมุ่งศึกษาวิธีการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกโดยไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ แต่ในบทนี้จะได้ทำการคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุกแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถเพื่อเปรียบเทียบกับนอกจากนั้นข้อมูลตำแหน่งรถที่ได้ยังนำมาหาความเร็วรถเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้อีกด้วย

5.2 การปรับเทียบแบบจำลองสะพาน

เพื่อสร้างแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของสะพาน และมีความถูกต้องเพียงพอสำหรับการทำนายน้ำหนัก เนื่องจากผลการวัดค่าความเครียดในการทดสอบพบว่า ค่าความเครียดที่ได้ยังมีค่าไม่ตรงตามทฤษฎี ซึ่งน่าจะมาจากความไม่เท่ากันของคุณสมบัติของสะพานเช่น ค่าสติเฟนสของสะพานอาจจะมีค่าไม่คงที่ หรือมีค่าไม่เป็นไปตามทฤษฎีเนื่องจากผลของคุณสมบัติของวัสดุ (ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต) และผลของความไม่สม่ำเสมอของขนาดหน้าตัด (ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย) ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบแบบจำลองก่อนทำการหาน้ำหนักเพื่อปรับเทียบผลของความไม่แน่นอนดังกล่าวเพื่อความถูกต้องของการหาน้ำหนัก

ในขั้นแรกทำการตรวจสอบความต่อเนื่องของสะพาน ว่ามีลักษณะตรงตามแบบหรือไม่ โดยจากแบบมาตรฐานสะพานมีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว การตรวจสอบทำโดยพิจารณาสัญญาณความเครียดเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่ภายนอกช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ ช่วงขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่เข้าในช่วงสะพาน และช่วงขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ จากการพิจารณาสัญญาณความเครียดพบว่า ไม่มีค่าความเครียดเกิดขึ้นในแผ่นพื้นคอนกรีตทุกแผ่นพื้นที่พิจารณา เมื่อรถบรรทุกยังไม่ได้เคลื่อนที่เข้าในช่วงของสะพานที่ทดสอบ จนกระทั่งเมื่อรถบรรทุกเริ่มเคลื่อนที่เข้าในช่วงของสะพานที่ทำการทดสอบ จะพบว่ามีค่าความเครียดของแผ่นพื้นเกิดขึ้น ถัดมาเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพานหมดทั้งคันแล้ว จะพบว่าไม่มีค่าความเครียดเกิดขึ้นในแผ่นพื้นคอนกรีตทุกแผ่นพื้น เช่นเดียวกันกับกรณีรถบรรทุกยังไม่ได้เคลื่อนที่เข้าช่วงสะพาน จึงสามารถสรุปได้ว่าสะพานทดสอบมีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียวตรงตามแบบก่อสร้าง

ถัดมาทำการปรับเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการวัดสะพานจริงกับค่าความเครียดจากแบบจำลองคาน (จุดรองรับแบบธรรมดา) ที่คำนวณมาจากเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ของโมเมนต์ดัด โดยเลือกใช้น้ำหนักรถบรรทุกประมาณ 20 ตันซึ่งวิ่งด้วยความเร็วที่ต่ำ (ประมาณ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง) บนสะพาน ซึ่งสาเหตุที่ปรับแก้ค่าความเครียดจากการวัดเนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าความเครียดเฉลี่ยจากสะพานจริงแล้วจะน้อยกว่าค่าความเครียดจากแบบจำลองของคานมากพอสมควร ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากผลของลักษณะการกระจายแรงตามแนวขวางระหว่างแผ่นพื้นสะพานจริงที่แตกต่างกับแบบจำลองที่ใช้ ประกอบกับผลของความไม่สม่ำเสมอของหน้าตัดสะพานจริงกับแบบมาตรฐานไม่ตรงกันเช่น ความหนาของแผ่นพื้นจริงของสะพานไม่ตรงตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง ตลอดจนลักษณะแผ่นพื้นจริงที่จะประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีต ชั้นของคอนกรีตเททับ (topping) และชั้นของแอสฟัลท์ (asphalt) ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน ซึ่งยากในการหาระยะความลึกของแนวแกนสะเทินของหน้าตัดสะพาน โดยการทดสอบในครั้งนี้จะใช้ค่าระยะความลึกของแนวแกนสะเทินของหน้าตัดสะพานเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตรวมทั้งหมดเพื่อความสะดวกในการทำงาน

ซึ่งหลังจากการปรับเทียบผลของความไม่เท่ากันต่างๆ ระหว่างสะพานที่ทำการทดสอบจริงกับแบบจำลองสะพานแล้ว ผลของความไม่เท่ากันนี้จะถูกปรับเทียบด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งก็คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบของสะพานช่วงเดียว ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเทียบแบบจำลองก่อนทำการหาน้ำหนักเพื่อชดเชยผลของความไม่แน่นอนดังกล่าวเพื่อความถูกต้องซึ่งจะทำให้ผลของการทำนายน้ำหนักมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

โดยวิธีที่นำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ α นั้นได้เลือกใช้วิธีการหาค่ายกกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) ทำหาค่าผลต่างยกกำลังสองระหว่างค่าเก็บวัดที่ทำการคูณด้วยพารามิเตอร์ α ดังสมการที่ (5.1) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ α ที่ทำให้ได้ค่าผลต่างยกกำลังสองนี้มีค่าน้อยที่สุดก็จะเป็นค่า α ที่จะนำไปใช้งาน

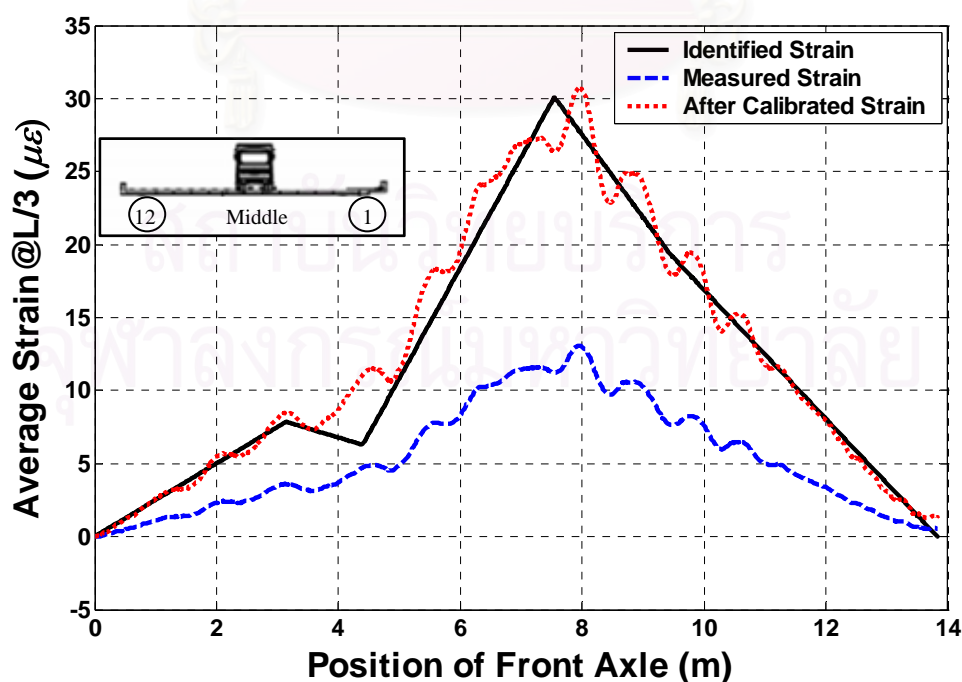
$$E(\alpha) = \sum_j \left[\sum_{i=1}^n (d_{model}^i - \alpha d_{measured}^i)^2 \right] \quad (5.1)$$

- โดยที่ $E(\alpha)$ คือฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) ของการหาค่าพารามิเตอร์ α
- j คือรูปแบบการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกด้วยความเร็วต่ำซึ่งประกอบด้วยการเล่นช่องจราจรซ้าย และช่องจราจรกลาง
- d_{model}^i คือค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองรถที่เคลื่อนที่บนสะพาน ณ ตำแหน่งที่ i
- $d_{measured}^i$ คือค่าความเครียดหรือโมเมนต์ดัดที่เก็บวัดได้โดยตรงจากการสะพาน เมื่อรถเคลื่อนที่บนสะพาน ณ ตำแหน่งที่ i
- n คือจำนวนของหน้าตัดที่พิจารณา

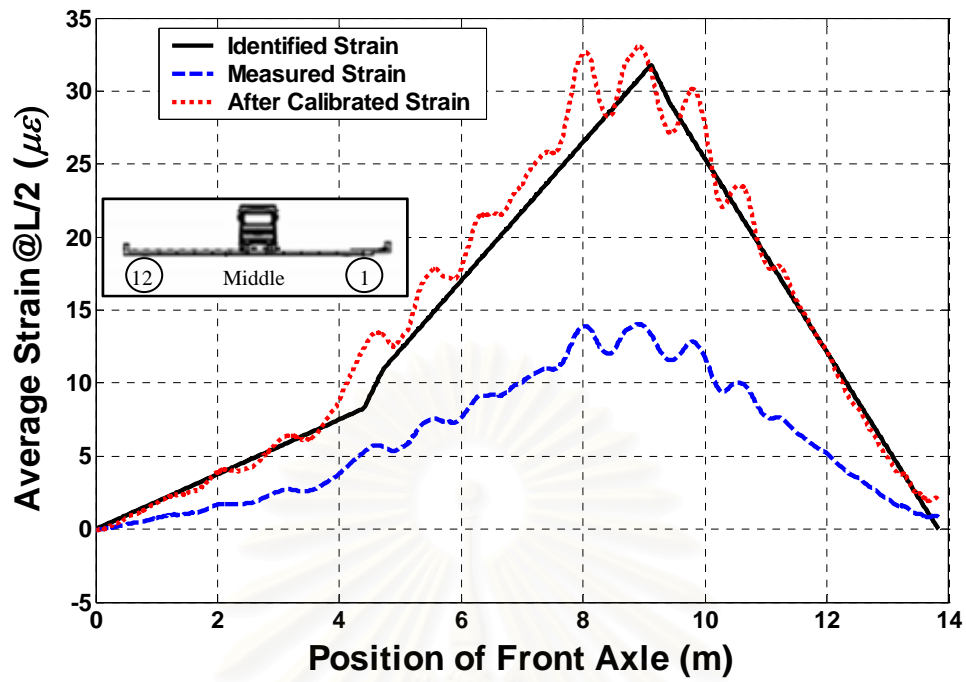
จากการหาค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบ α_M และ α_L ได้แสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งเมื่อนำค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่เก็บวัดได้มาทำการเปรียบเทียบ จะได้ลักษณะของค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่เปรียบเทียบแล้วในแต่ละหน้าตัดสะพานกรณีวิ่งช่องจราจรกลางดังแสดงในรูปที่ 5.15 - รูปที่ 5.17

ตารางที่ 5.2 ค่าเปรียบเทียบของแบบจำลองสะพาน

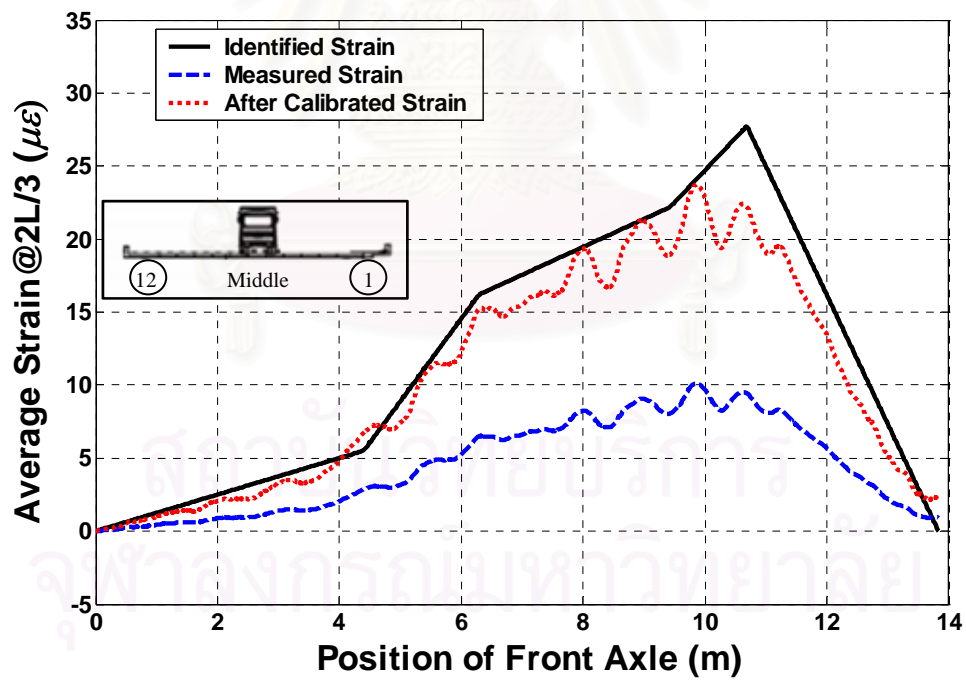
ค่าเปรียบเทียบแบบจำลอง	α
กรณีวิ่งช่องจราจรกลาง, α_M	2.35
กรณีวิ่งช่องจราจรซ้าย, α_L	2.15



รูปที่ 5.15 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพาน กรณีวิ่งช่องจราจรกลางสะพาน



รูปที่ 5.16 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพาน กรณีรถวิ่งกลางสะพาน



รูปที่ 5.17 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่ง 2L/3 ของ สะพานกรณีรถวิ่งกลางสะพาน

5.3 ขั้นตอนการทดสอบภาคสนาม

จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามได้ทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนักบรรทุก 3 ระดับ ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกเบา (ประมาณ 20 ตัน) น้ำหนักบรรทุกปานกลาง (ประมาณ 23 ตัน) และน้ำหนักบรรทุกหนัก (ประมาณ 26 ตัน) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 โดยได้ทำการชั่งน้ำหนักที่ด้านข้างก่อนการทดสอบ ซึ่งใช้ทรายหยาบเป็นน้ำหนักในการบรรทุก

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	น้ำหนักบรรทุก	วันที่ทดสอบ	ทะเบียนรถ	ระยะเพลลา (ม.)	น้ำหนัก (กก.)		
					เพลลาหน้า	เพลลาหลัง	น้ำหนักรวม
1	เบา	23/2/2005	818970	4.40	4610	16260	20870
2	ปานกลาง	12/2/2005	818414	4.40	4435	18930	23365
3	หนัก	26/2/2005	818970	4.40	5645	20140	25785

ในการทดสอบรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็ว 3 ระดับ ได้แก่ ระดับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งช้า ระดับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งปกติ ระดับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งเร็ว ทำการทดสอบ 23 กรณีในช่องจราจรกลาง และ 24 กรณีในช่องจราจรซ้าย รวมเป็นการทดสอบทั้งสิ้น 47 กรณี

5.4 การคำนวณหาน้ำหนักรถ และผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลการทดสอบภาคสนาม

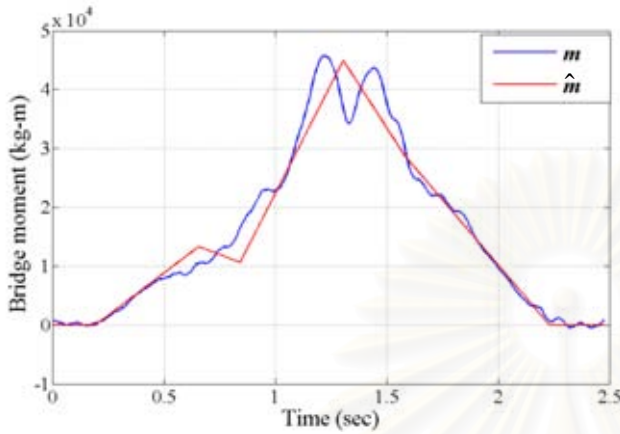
ในการคำนวณหาน้ำหนักรถจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามได้ทำการคำนวณ 2 วิธี ได้แก่ การคำนวณหาน้ำหนักรถแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM) และ การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (free of axle detector หรือ FAD B-WIM) โดยที่การคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถไม่ได้เป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ แต่เป็นการคำนวณเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ

5.4.1 การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM)

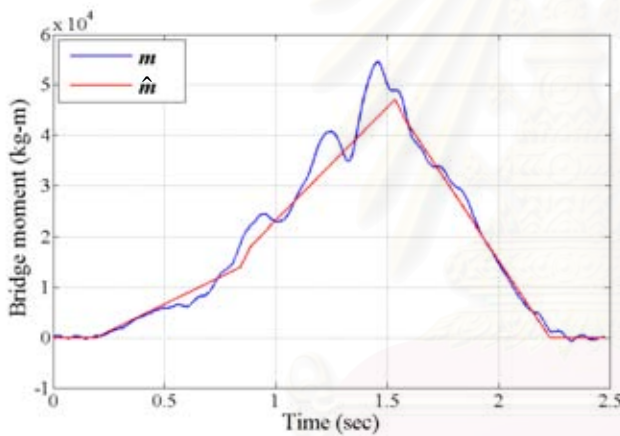
การคำนวณหาน้ำหนักรถแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ เป็นการคำนวณโดยใช้เส้นอิทธิพลในการหาน้ำหนักสถิตของรถบรรทุกคล้ายกับการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ดังได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3.1 แต่ในการคำนวณวิธีนี้จะมีตัวแปรน้อยกว่าเนื่องจากจะทราบค่าตำแหน่งรถตลอดการคำนวณ จากอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ทำให้ตัวแปรที่ต้องทำการหามีเพียงแค่น้ำหนักเพลลาหน้า (\hat{N}_f) และ น้ำหนักเพลลาหลังของรถบรรทุก (\hat{N}_r)

จากการทดสอบภาคสนามพบว่าความเร็วของรถบรรทุกที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งรถ มีค่าไม่ตรงกับข้อมูลความเร็วที่ได้จากมาตรวัดความเร็วของรถบรรทุก ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของมาตรวัดความเร็วรถในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ข้อมูลความเร็วรถบรรทุกจากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งรถเป็นหลัก ดังนั้นระดับความเร็วรถบรรทุกจึงได้เปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้ ระดับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งช้า (ต่ำกว่า 25 กม./ชม.) ระดับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งปกติ (ประมาณ 25-35 กม./ชม.) ระดับความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งเร็ว (สูงกว่า 35 กม./ชม.)

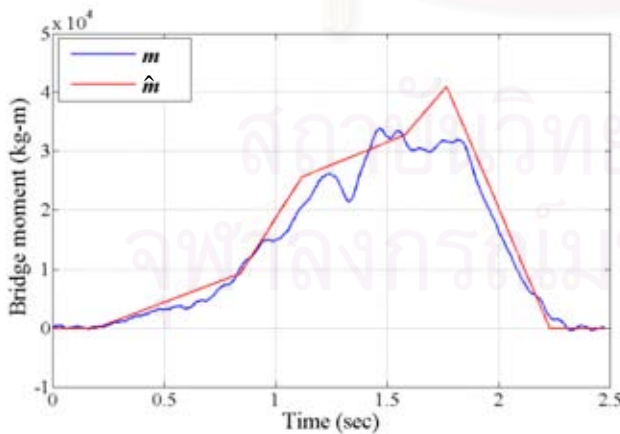
รูปที่ 5.18 แสดงตัวอย่างสัญญาณโมเมนต์ที่วัดได้จริง เทียบกับสัญญาณโมเมนต์ที่คำนวณได้ของการทดสอบกรณีนี้ที่ 4 ของกรณีรถบรรทุกวิ่งกลางสะพาน โดยที่รถบรรทุกมีความเร็ว 6.79 เมตร/วินาที (24.43 กม./ชม.) ระยะห่างเพลลา 4.4 เมตร น้ำหนักเพลลาหน้า 5.65 ตัน และน้ำหนักเพลลาหลัง 20.14 ตัน



รูปที่ 5.18ก โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/3$



รูปที่ 5.18ข โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/2$



รูปที่ 5.18ค โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $2L/3$

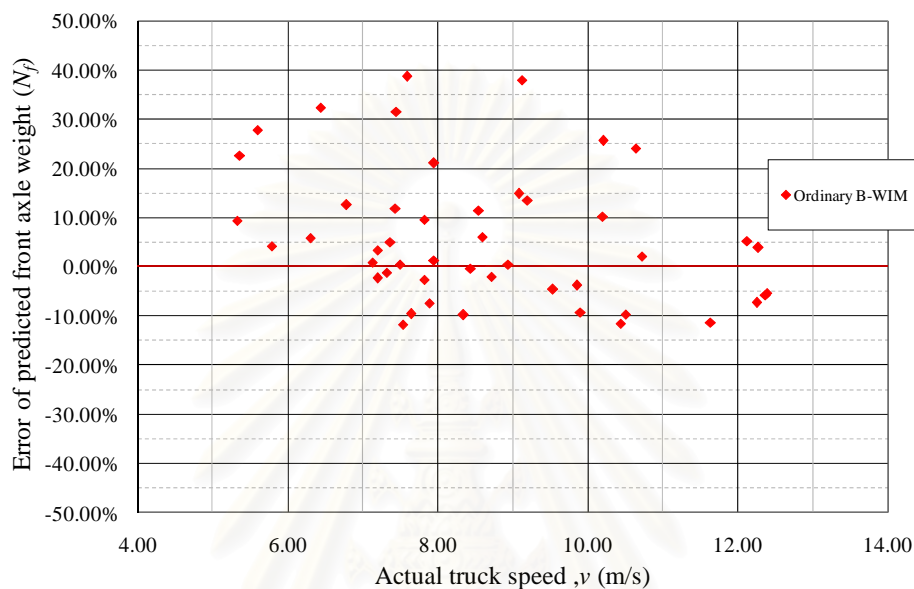
ตารางที่ 5.4 ผลการหาค่าหน้ารถบรรทุกจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM) กรณีรถวิ่งกลางสะพาน

ระดับความเร็ว	ความเร็วของรถบรรทุก		ระยะห่างเพล	น้ำหนักเพลหน้าสถิต				น้ำหนักเพลหลังสถิต				น้ำหนักรวม			
	v			S	N_f	\hat{N}_f	ความคลาดเคลื่อน		N_r	\hat{N}_r	ความคลาดเคลื่อน		N_t	\hat{N}_t	ความคลาดเคลื่อน
	(เมตร/วินาที)	(กม./ชม)	เมตร				(ตัน)	(ตัน)			(ตัน)	%			(ตัน)
ช้า	5.36	19.30	4.40	4.44	5.44	1.00	22.57%	18.93	18.20	-0.73	-3.86%	23.37	23.64	0.27	1.16%
	5.60	20.15	4.40	4.44	5.67	1.23	27.75%	18.93	17.50	-1.43	-7.55%	23.37	23.17	-0.20	-0.85%
	6.45	23.20	4.40	4.44	5.87	1.43	32.34%	18.93	17.74	-1.19	-6.30%	23.37	23.61	0.24	1.03%
	6.79	24.43	4.40	5.65	6.35	0.71	12.56%	20.14	19.55	-0.59	-2.95%	25.79	25.90	0.12	0.45%
ปานกลาง	7.32	26.34	4.40	4.61	4.56	-0.05	-1.14%	16.26	15.73	-0.53	-3.25%	20.87	20.29	-0.58	-2.78%
	7.37	26.54	4.40	5.65	5.92	0.28	4.96%	20.14	19.22	-0.92	-4.58%	25.79	25.14	-0.64	-2.49%
	7.45	26.83	4.40	4.44	5.83	1.40	31.47%	18.93	17.89	-1.04	-5.49%	23.37	23.72	0.36	1.53%
	7.59	27.34	4.40	4.44	6.15	1.71	38.63%	18.93	16.89	-2.04	-10.77%	23.37	23.04	-0.32	-1.39%
	7.65	27.54	4.40	5.65	5.10	-0.54	-9.59%	20.14	19.25	-0.89	-4.42%	25.79	24.35	-1.43	-5.55%
	7.82	28.16	4.40	4.61	4.49	-0.12	-2.61%	16.26	15.68	-0.58	-3.59%	20.87	20.17	-0.70	-3.37%
	7.89	28.39	4.40	5.65	5.22	-0.42	-7.47%	20.14	19.64	-0.50	-2.50%	25.79	24.86	-0.92	-3.58%
	7.95	28.63	4.40	4.61	4.67	0.06	1.26%	16.26	15.70	-0.56	-3.44%	20.87	20.37	-0.50	-2.41%
	7.95	28.63	4.40	4.44	5.37	0.93	21.05%	18.93	17.63	-1.30	-6.86%	23.37	23.00	-0.37	-1.57%
	8.55	30.77	4.40	5.65	6.29	0.64	11.38%	20.14	19.55	-0.59	-2.94%	25.79	25.84	0.05	0.19%
	9.08	32.69	4.40	5.65	6.48	0.84	14.84%	20.14	18.86	-1.28	-6.37%	25.79	25.34	-0.44	-1.72%
	9.12	32.84	4.40	4.44	6.12	1.69	38.00%	18.93	17.76	-1.17	-6.18%	23.37	23.88	0.51	2.20%
9.20	33.12	4.40	4.44	5.03	0.60	13.43%	18.93	18.66	-0.27	-1.41%	23.37	23.69	0.33	1.40%	
เร็ว	10.20	36.73	4.40	4.61	5.08	0.47	10.21%	16.26	16.11	-0.15	-0.92%	20.87	21.19	0.32	1.54%
	10.21	36.75	4.40	4.61	5.79	1.18	25.62%	16.26	15.98	-0.28	-1.74%	20.87	21.77	0.90	4.31%
	10.72	38.61	4.40	4.61	4.71	0.10	2.13%	16.26	15.49	-0.77	-4.73%	20.87	20.20	-0.67	-3.22%
	11.64	41.89	4.40	4.61	4.09	-0.52	-11.31%	16.26	15.01	-1.25	-7.70%	20.87	19.10	-1.77	-8.50%
	12.13	43.66	4.40	4.61	4.85	0.24	5.28%	16.26	15.49	-0.77	-4.73%	20.87	20.34	-0.53	-2.52%
	12.27	44.19	4.40	4.61	4.79	0.18	3.87%	16.26	16.25	-0.01	-0.06%	20.87	21.04	0.17	0.81%

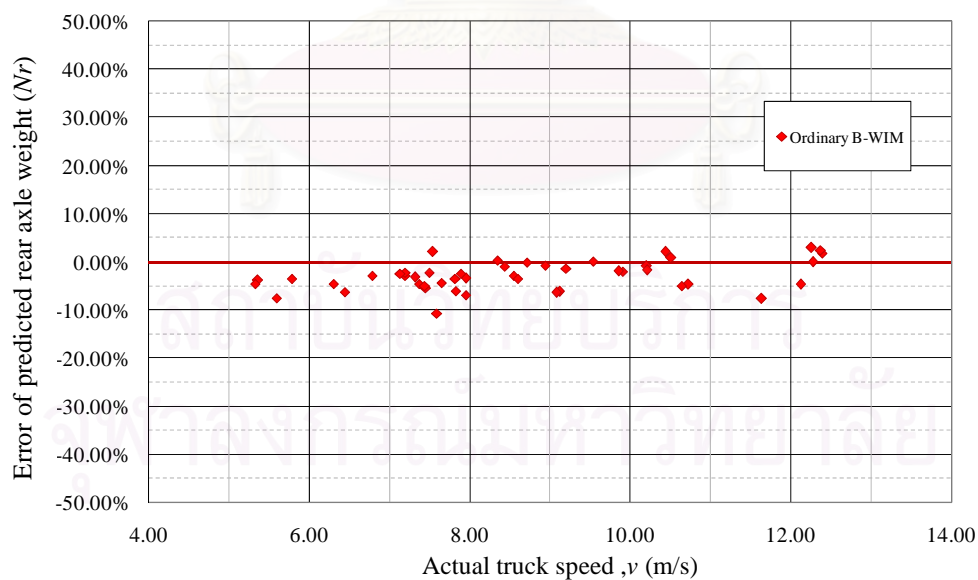
ตารางที่ 5.5 ผลการหาน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM) กรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน

ระดับความเร็ว ของรถบรรทุก	ความเร็วของรถบรรทุก v		ระยะห่างเพลาน้ำหนัก S	น้ำหนักเพลาน้ำหนัก				น้ำหนักเพลาลังสถิต				น้ำหนักรวม			
	(เมตร/วินาที)	(กม./ชม)		เมตร	N_f (ตัน)	\hat{N}_f	ความคลาดเคลื่อน		N_r (ตัน)	\hat{N}_r	ความคลาดเคลื่อน		N_t (ตัน)	\hat{N}_t	ความคลาดเคลื่อน
			(ตัน)				%	(ตัน)			%	(ตัน)			%
ช้า	5.33	19.19	4.40	4.44	4.85	0.42	9.40%	18.93	18.05	-0.88	-4.64%	23.37	22.90	-0.46	-1.98%
	5.79	20.83	4.40	4.61	4.80	0.19	4.17%	16.26	15.69	-0.57	-3.49%	20.87	20.49	-0.38	-1.80%
	6.30	22.69	4.40	4.44	4.69	0.26	5.85%	18.93	18.05	-0.88	-4.63%	23.37	22.75	-0.62	-2.64%
ปานกลาง	7.14	25.69	4.40	5.65	5.69	0.05	0.84%	20.14	19.64	-0.50	-2.50%	25.79	25.33	-0.46	-1.77%
	7.20	25.92	4.40	5.65	5.83	0.19	3.28%	20.14	19.68	-0.46	-2.26%	25.79	25.51	-0.27	-1.05%
	7.20	25.93	4.40	4.61	4.50	-0.11	-2.32%	16.26	15.79	-0.47	-2.89%	20.87	20.29	-0.58	-2.76%
	7.44	26.78	4.40	4.44	4.96	0.53	11.87%	18.93	17.97	-0.96	-5.06%	23.37	22.93	-0.43	-1.85%
	7.50	26.99	4.40	5.65	5.67	0.03	0.47%	20.14	19.70	-0.44	-2.19%	25.79	25.37	-0.41	-1.61%
	7.54	27.15	4.40	4.61	4.06	-0.55	-11.84%	16.26	16.60	0.34	2.10%	20.87	20.67	-0.20	-0.98%
	7.83	28.17	4.40	4.44	4.86	0.42	9.52%	18.93	17.79	-1.14	-6.02%	23.37	22.65	-0.72	-3.07%
	8.35	30.04	4.40	5.65	5.09	-0.56	-9.83%	20.14	20.20	0.06	0.31%	25.79	25.29	-0.49	-1.91%
	8.44	30.38	4.40	5.65	5.63	-0.02	-0.31%	20.14	19.95	-0.19	-0.93%	25.79	25.58	-0.20	-0.79%
	8.60	30.96	4.40	4.44	4.70	0.27	6.06%	18.93	18.25	-0.68	-3.58%	23.37	22.96	-0.41	-1.75%
	8.72	31.39	4.40	4.44	4.34	-0.09	-2.05%	18.93	18.90	-0.03	-0.18%	23.37	23.24	-0.12	-0.53%
	8.94	32.20	4.40	5.65	5.67	0.03	0.47%	20.14	19.97	-0.17	-0.82%	25.79	25.65	-0.14	-0.54%
9.54	34.33	4.40	5.65	5.39	-0.26	-4.60%	20.14	20.14	0.00	0.00%	25.79	25.53	-0.26	-1.00%	
เร็ว	9.85	35.47	4.40	5.65	5.43	-0.21	-3.80%	20.14	19.75	-0.39	-1.93%	25.79	25.18	-0.60	-2.34%
	9.90	35.66	4.40	5.65	5.12	-0.53	-9.32%	20.14	19.74	-0.40	-2.00%	25.79	24.86	-0.93	-3.60%
	10.44	37.58	4.40	4.61	4.07	-0.54	-11.61%	16.26	16.60	0.34	2.06%	20.87	20.67	-0.20	-0.96%
	10.51	37.83	4.40	4.61	4.16	-0.45	-9.73%	16.26	16.40	0.14	0.84%	20.87	20.56	-0.31	-1.50%
	10.64	38.32	4.40	4.61	5.72	1.11	24.02%	16.26	15.44	-0.82	-5.05%	20.87	21.16	0.29	1.37%
	12.26	44.13	4.40	4.61	4.27	-0.34	-7.32%	16.26	16.74	0.48	2.94%	20.87	21.01	0.14	0.67%
	12.37	44.54	4.40	4.61	4.35	-0.26	-5.74%	16.26	16.65	0.39	2.38%	20.87	20.99	0.12	0.59%
	12.39	44.60	4.40	4.61	4.36	-0.25	-5.37%	16.26	16.54	0.28	1.74%	20.87	20.91	0.04	0.17%

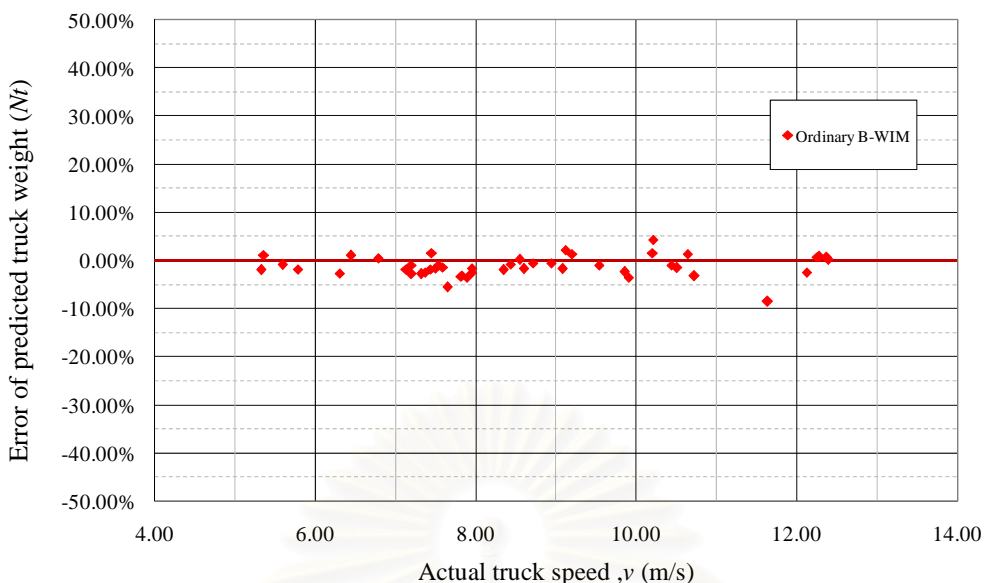
ผลการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถกรณีวิ่งกลางสะพาน และกรณีวิ่งชิดซ้ายของสะพานได้แสดงดังตารางที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ จากการคำนวณได้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำอยู่ในช่วง -12% ถึง 40% ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังอยู่ในช่วง -11% ถึง 3% และความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง -9% ถึง 5% โดยที่การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำ น้ำหนักเพลาลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเทียบกับความเร็วได้แสดงในรูปที่ 5.19 – 5.21 ตามลำดับ



รูปที่ 5.19 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง



รูปที่ 5.20 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง

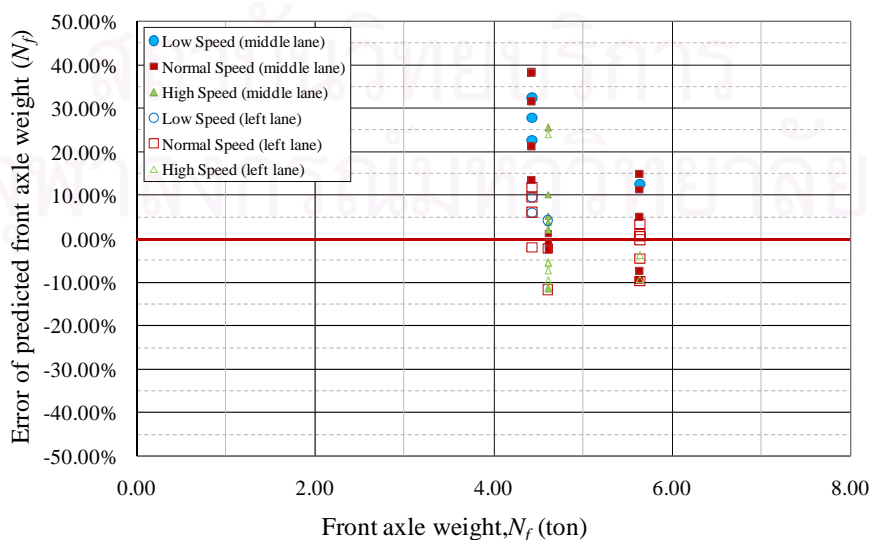


รูปที่ 5.21 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้ของรถบรรทุกเทียบกับความเร็วจริง

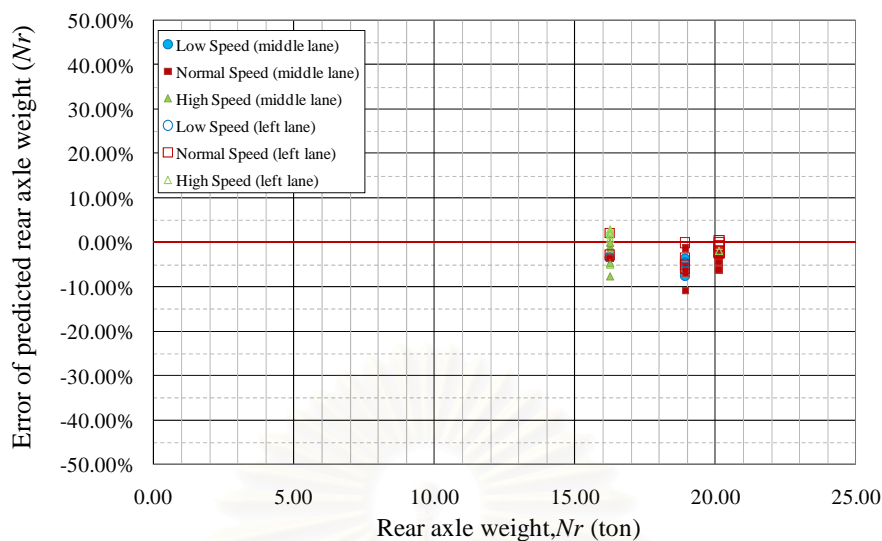
จากรูปที่ 5.19 – 5.21 พบว่าน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้าของรถบรรทุกมีค่าความคลาดเคลื่อนมากเนื่องจากน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้ามีค่าน้อย (ประมาณ 4-6 ตัน) เมื่อนำความคลาดเคลื่อนมาคำนวณเป็นสัดส่วนจึงมีค่ามาก โดยความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้าจะอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนเป็นบวก หรือความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ +6% ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักหลังอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนติดลบ หรือความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ -3% และเมื่อรวมเป็นความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมจะกระจายในช่วงบวก และลบ โดยที่ความคลาดเคลื่อนส่วนมากอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ โดยมีเพียง 2 กรณีจาก 47 กรณี ที่ความคลาดเคลื่อนอยู่นอกช่วงขอบเขตดังกล่าวคือ -8.50% และ -5.55%

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้า น้ำหนักเพลาน้ำหนักหลัง และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก เทียบกับความเร็วจะพบว่า ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้า และน้ำหนักรวมมีการกระจายตัวอย่างค่อนข้างสม่ำเสมอไม่เพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น

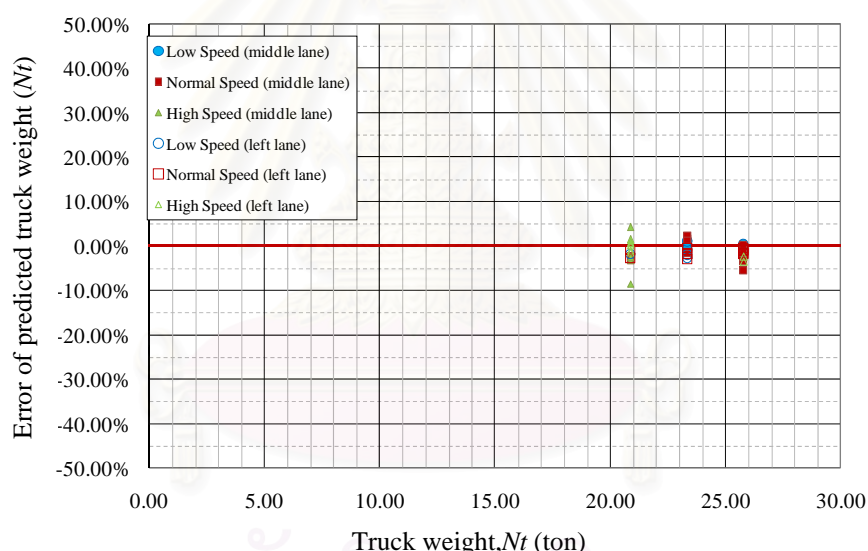
ถัดมาทำการพิจารณาผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกเปรียบเทียบกับน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้า และความเร็ว โดยพิจารณาทั้งในกรณีรถวิ่งกลางสะพาน และกรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 5.22 – 5.24



รูปที่ 5.22 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้าที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักเพลาน้ำหนักหน้าจริง



รูปที่ 5.23 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักเพลาลังจริง



รูปที่ 5.24 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจริง

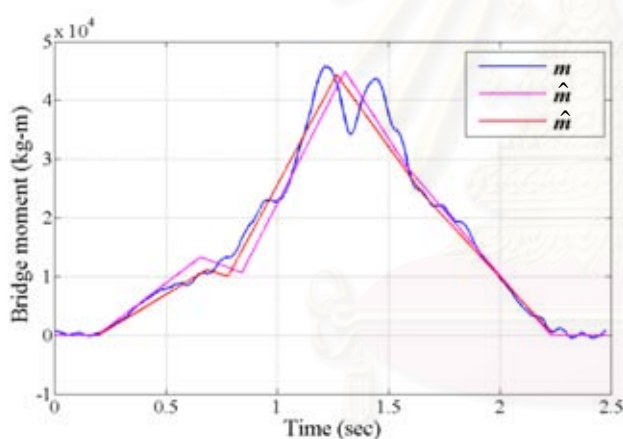
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.22 จะสังเกตได้ว่ากรณีทีรถบรรทุกมีน้ำหนักเพลาน้ำเบา (4.4 ตัน) จะมีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำเบากระจายตัว และอยู่ในช่วงบวกมากกว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักเพลาน้ำที่มากกว่า ถัดมาพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังของกรณีดังกล่าว ซึ่งเป็นกรณีที่น้ำหนักเพลาลัง 19 ตัน หรือน้ำหนักรวมปานกลาง จะพบว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงติดลบมากกว่ากรณีน้ำหนักเพลาลังอื่น แต่เมื่อรวมเป็นความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมกรณีดังกล่าวจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ โดยสรุปความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำ น้ำหนักเพลาลัง ไม่สอดคล้องกับความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ซึ่งกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำ และหลังมาก เมื่อรวมเป็นความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมกลับมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า นอกจากนี้ผลของช่องจรรยาจริยังไม่มีผลชัดเจนเพียงพอที่จะสรุปพฤติกรรมเนื่องจากช่องจรรยาจริได้ อีก

ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าเกือบทั้งหมดของกรณีที่รถบรรทุกแล่นด้วยความเร็วระดับสูง จะเป็นกรณีที่รถบรรทุกมีน้ำหนักเบา นั่นก็เพราะน้ำหนักบรรทุกที่เบากว่าทำให้รถบรรทุกสามารถเร่งความเร็วได้มากกว่า ซึ่งไม่สอดคล้องกับระดับความเร็วของรถบรรทุกที่กำหนดไว้ในการทดสอบภาคสนาม

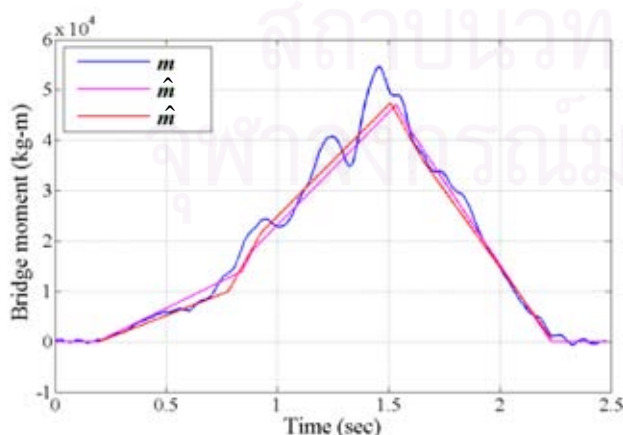
5.4.2 การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (free of axle detector หรือ FAD B-WIM)

การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถในหัวข้อนี้ใช้วิธีการคำนวณแบบใช้เงื่อนไขในการวนรอบการคำนวณ (proposed method) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบในแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ทำการคำนวณจนกว่าจะได้ค่าที่อยู่ในขอบเขต และเงื่อนไขของตัวแปรที่กำหนดให้จึงจะถือว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ถูกต้อง ซึ่งวิธีการคำนวณนี้ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2

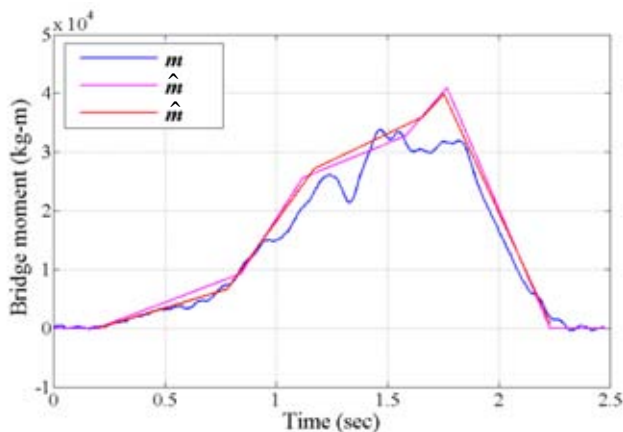
รูปที่ 5.25 แสดงตัวอย่างสัญญาณโมเมนต์ที่วัดได้จริง เทียบกับสัญญาณโมเมนต์ที่คำนวณได้ของการทดสอบกรณีนี้ 4 ของกรณีรถบรรทุกวิ่งกลางสะพาน โดยที่รถบรรทุกมีความเร็ว 6.79 เมตร/วินาที (24.43 กม./ชม.) ระยะห่างเพลลา 4.4 เมตร น้ำหนักเพลลาหน้า 5.65 ตัน และน้ำหนักเพลลาหลัง 20.14 ตัน โดยที่เส้นสีแดงแสดงโมเมนต์จากการคำนวณโดยวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM) และเส้นสีม่วงแสดงโมเมนต์จากการคำนวณโดยวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM)



รูปที่ 5.25ก โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้จากวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) และจากวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีม่วง) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/3$



รูปที่ 5.25ข โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้จากวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) และจากวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีม่วง) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/2$



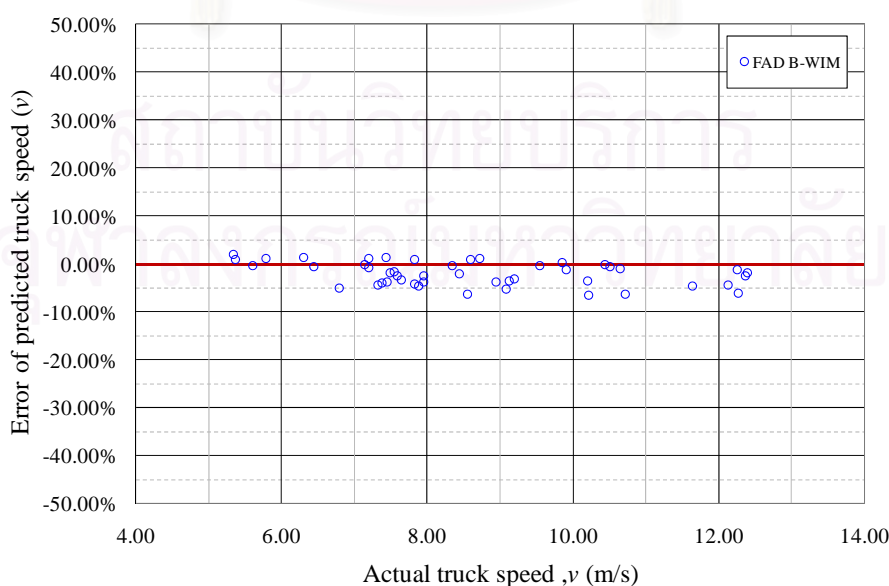
รูปที่ 5.25ค โมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) และจากวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีม่วง) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $2L/3$

จากรูปที่ 5.25 จะเห็นว่าโมเมนต์ดัดจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ จะใกล้เคียงกับโมเมนต์ดัดจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถมาก โดยมีความแตกต่างอยู่ตรงที่ค่าสูงสุดสัมพัทธ์ (local maximum) แรกของรูปที่ 5.25ก ซึ่งเป็นค่าโมเมนต์ดัดเนื่องจากล้อหน้าของรถในช่วงเวลาที่ล้อหลังของรถยังไม่เคลื่อนที่เข้าสะพาน โดยค่าสูงสุดสัมพัทธ์แรกๆของโมเมนต์ดัดจากวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ มีค่ามากกว่าค่าจากวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ซึ่งหมายความว่าวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถจะหาน้ำหนักเพลาน้ำหนักได้มากกว่านั่นเอง

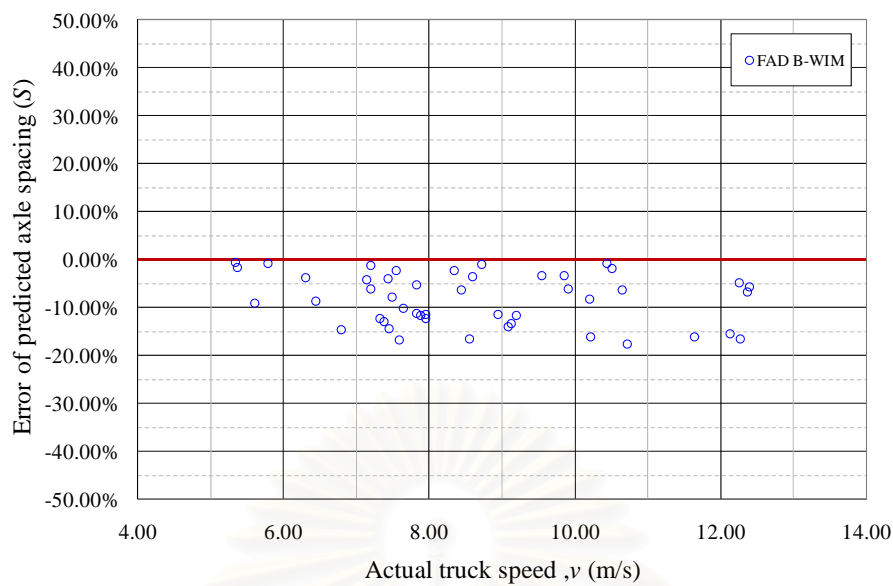
ผลการคำนวณหาความเร็วและระยะห่างเพลาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถกรณีรถวิ่งกลางสะพาน และกรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพานได้แสดงดังตารางที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ ในส่วนของผลการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกกรณีรถวิ่งกลางสะพาน และกรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพานได้แสดงในตารางที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับเช่นเดียวกัน

จากการคำนวณได้ความคลาดเคลื่อนของความเร็วอยู่ในช่วง -7% ถึง 2% ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาน้ำหนักอยู่ในช่วง -18% ถึง -1% ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักอยู่ในช่วง -36% ถึง 13% ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาล้ออยู่ในช่วง -10% ถึง 2% และความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง -15% ถึง 1%

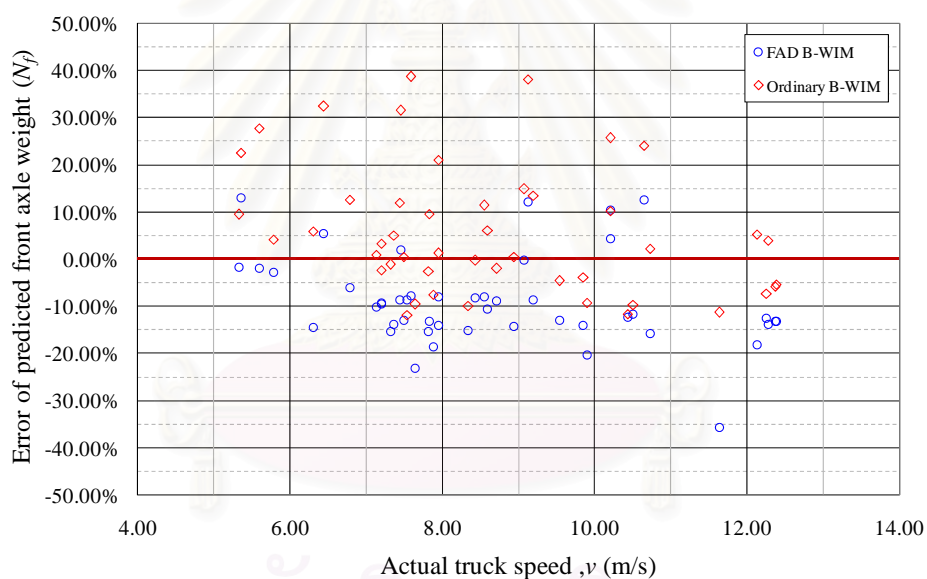
โดยที่การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของความเร็วของรถบรรทุก ระยะห่างเพลาน้ำหนักเพลาน้ำหนัก น้ำหนักเพลาล้อ และน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเทียบกับความเร็วที่แท้จริงได้แสดงในรูปที่ 5.26 - 5.30 ตามลำดับ ในการเปรียบเทียบน้ำหนักเพลาน้ำหนักเทียบกับความเร็วที่แท้จริงของรถบรรทุก (รูปที่ 5.28 - 5.30) ได้เปรียบเทียบกับผลความคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถด้วย



รูปที่ 5.26 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง

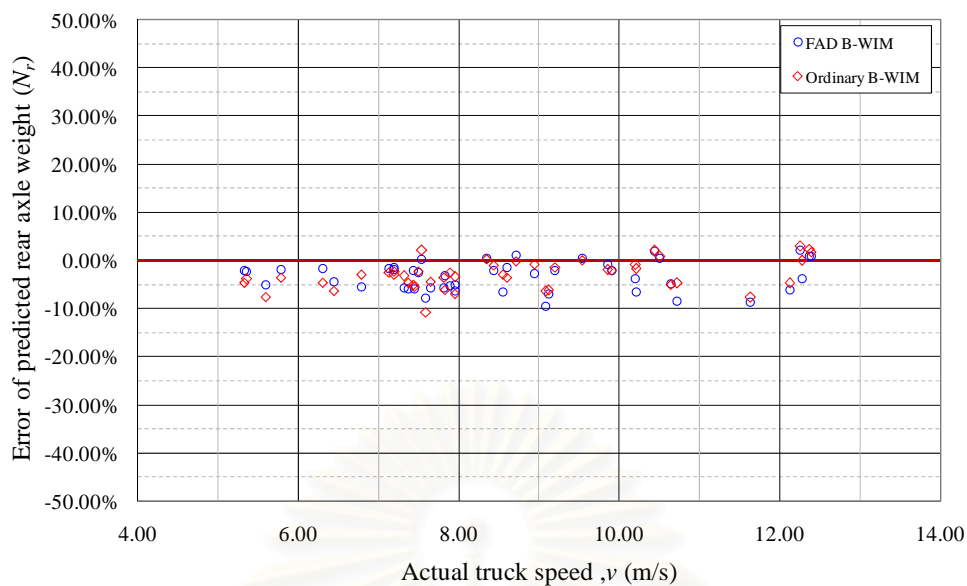


รูปที่ 5.27 ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง

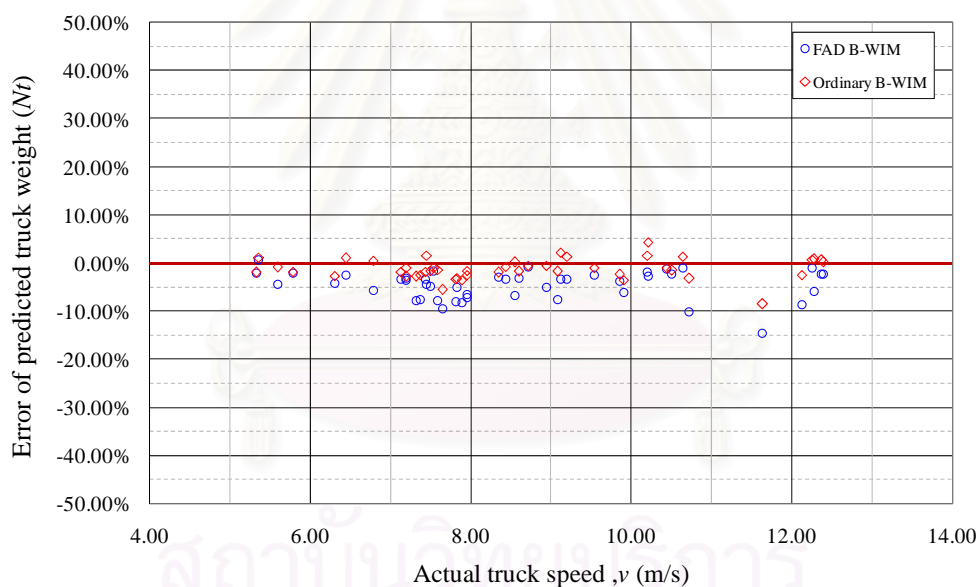


รูปที่ 5.28 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหน้าโดยการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (จุดสีน้ำเงิน) และจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (จุดสีแดง) เทียบกับความเร็วจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.29 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหลังโดยการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (จุดสีน้ำเงิน) และจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (จุดสีแดง) เทียบกับความเร็วจริง



รูปที่ 5.30 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (จุดสีน้ำเงิน) และจากการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (จุดสีแดง) เทียบกับความเร็วจริง

จากรูปที่ 5.28 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าน้ำหนักเพลาหน้าที่คำนวณจากวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ได้ค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลาหน้าจริง และน้อยกว่าค่าที่คำนวณจากวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ หรือแสดงว่าวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถได้ค่าที่ถูกต้องกว่านั่นเอง โดยที่วิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถหาน้ำหนักเพลาหน้าได้มากกว่าจะสังเกตได้จากค่าสูงสุดสัมพัทธ์ของรูปที่ 5.25g ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

แต่เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลงหลังจากรูป 5.29 น้ำหนักเพลาลงที่คำนวณจากวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักเพลาลงที่คำนวณจากวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถมาก และความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลงทั้งสองวิธีการคำนวณมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่แต่ละความเร็วรถบรรทุก

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก วิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถจะให้ค่าที่ใกล้เคียงจริงมากกว่า เนื่องจากผลของน้ำหนักเพลาลงที่ใกล้เคียงจริงมากกว่า จึงได้น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ใกล้เคียงจริงมากกว่าค่าน้ำหนักรวมที่คำนวณจากวิธีแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ โดยที่ความคลาดเคลื่อนที่แต่ละความเร็วรถบรรทุกจากวิธีการคำนวณทั้งสองวิธีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะเห็นว่ากราฟของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถเลื่อนลงมาจาก กราฟของความคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถโดยเฉลี่ย 3%

อีกทั้งเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตัวแปรต่างๆ เทียบกับความเร็วที่แท้จริงของรถบรรทุกพบว่า ความคลาดเคลื่อนของทุกตัวแปรไม่มีความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วเพิ่มขึ้น และผลดังกล่าวก็เหมือนกับกรณีที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาค้นคว้าจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่พบว่า เมื่อรถบรรทุกมีความเร็วเพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อนของทุกตัวแปรจะมีค่ามากขึ้น โดยอาจเนื่องมาจากช่วงความเร็วของรถบรรทุกในการทดสอบค่อนข้างแคบ (5 -13 เมตร/วินาที) และความเร็วในช่วงนี้ยังมีค่าไม่เกิน 15 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นที่โมเมนต์ดัดที่วัดได้จะมีค่าแตกต่างจากโมเมนต์ดัดตามทฤษฎีค่อนข้างมาก นอกจากนี้ด้วยเหตุผลด้านสถานที่ในการทดสอบ และเหตุผลด้านความปลอดภัยทำให้ไม่สามารถเร่งความเร็วรถบรรทุกให้มีความเร็วสูงมากได้ ผลของความเร็วจึงไม่เด่นชัดในการทดลองนี้ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ ก็เป็นความเร็วของรถบรรทุกปกติที่ใช้ในการจราจรทั่วไป ดังนั้นผลการหาน้ำหนักที่ได้จึงสะท้อนถึงความสามารถในการหาน้ำหนักของวิธีการนี้ในช่วงความเร็วรถบรรทุกดังกล่าว

ตารางที่ 5.6 ผลการหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM)

กรณีรถวิ่งกลางสะพาน

ระดับความเร็วของรถบรรทุก	ความเร็วของรถบรรทุก				ระยะห่างระหว่างเพลลา			
	v (เมตร/วินาที)	\hat{v} (เมตร/วินาที)	ความคลาดเคลื่อน		S (เมตร)	\hat{S} (เมตร)	ความคลาดเคลื่อน	
			(เมตร/ วินาที)	%			(เมตร)	%
ช้า	5.36	5.42	0.05	1.00%	4.40	4.32	-0.08	-1.74%
	5.60	5.58	-0.02	-0.29%	4.40	4.00	-0.40	-9.06%
	6.45	6.40	-0.04	-0.65%	4.40	4.02	-0.38	-8.73%
	6.79	6.44	-0.34	-5.02%	4.40	3.75	-0.65	-14.70%
ปานกลาง	7.32	6.99	-0.33	-4.49%	4.40	3.86	-0.54	-12.38%
	7.37	7.08	-0.29	-3.89%	4.40	3.83	-0.57	-12.91%
	7.45	7.17	-0.29	-3.83%	4.40	3.77	-0.63	-14.36%
	7.59	7.40	-0.19	-2.53%	4.40	3.66	-0.74	-16.72%
	7.65	7.39	-0.26	-3.37%	4.40	3.95	-0.45	-10.26%
	7.82	7.50	-0.32	-4.11%	4.40	3.90	-0.50	-11.30%
	7.89	7.53	-0.36	-4.57%	4.40	3.89	-0.51	-11.60%
	7.95	7.65	-0.30	-3.80%	4.40	3.90	-0.50	-11.36%
	7.95	7.75	-0.21	-2.59%	4.40	3.86	-0.54	-12.26%
	8.55	8.01	-0.54	-6.27%	4.40	3.67	-0.73	-16.48%
	9.08	8.60	-0.48	-5.29%	4.40	3.78	-0.62	-14.08%
	9.12	8.80	-0.32	-3.51%	4.40	3.81	-0.59	-13.36%
9.20	8.91	-0.29	-3.11%	4.40	3.89	-0.52	-11.70%	
เร็ว	10.20	9.84	-0.36	-3.58%	4.40	4.04	-0.36	-8.20%
	10.21	9.54	-0.67	-6.56%	4.40	3.69	-0.71	-16.23%
	10.72	10.04	-0.69	-6.41%	4.40	3.62	-0.78	-17.65%
	11.64	11.09	-0.55	-4.69%	4.40	3.69	-0.71	-16.16%
	12.13	11.58	-0.55	-4.50%	4.40	3.72	-0.68	-15.56%
	12.27	11.52	-0.75	-6.13%	4.40	3.67	-0.73	-16.59%

ตารางที่ 5.7 ผลการหาความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM)

กรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน

ระดับความเร็วของรถบรรทุก	ความเร็วของรถบรรทุก				ระยะห่างระหว่างเพลลา			
	v (เมตร/วินาที)	\hat{v} (เมตร/วินาที)	ความคลาดเคลื่อน		S (เมตร)	\hat{S} (เมตร)	ความคลาดเคลื่อน	
			(เมตร/ วินาที)	%			(เมตร)	%
ช้า	5.33	5.44	0.10	1.97%	4.40	4.38	-0.02	-0.51%
	5.79	5.86	0.07	1.22%	4.40	4.36	-0.04	-0.90%
	6.30	6.39	0.09	1.36%	4.40	4.23	-0.17	-3.75%
ปานกลาง	7.14	7.13	-0.01	-0.14%	4.40	4.22	-0.18	-4.12%
	7.20	7.14	-0.06	-0.87%	4.40	4.13	-0.27	-6.10%
	7.20	7.28	0.08	1.09%	4.40	4.34	-0.06	-1.31%
	7.44	7.53	0.09	1.24%	4.40	4.22	-0.18	-4.03%
	7.50	7.36	-0.14	-1.88%	4.40	4.06	-0.34	-7.81%
	7.54	7.41	-0.13	-1.76%	4.40	4.30	-0.10	-2.32%
	7.83	7.90	0.08	0.96%	4.40	4.17	-0.23	-5.22%
	8.35	8.32	-0.03	-0.32%	4.40	4.30	-0.10	-2.38%
	8.44	8.26	-0.18	-2.08%	4.40	4.12	-0.28	-6.43%
	8.60	8.68	0.08	0.91%	4.40	4.25	-0.15	-3.47%
	8.72	8.81	0.09	1.06%	4.40	4.36	-0.04	-0.98%
	8.94	8.61	-0.33	-3.69%	4.40	3.90	-0.50	-11.41%
9.54	9.50	-0.03	-0.35%	4.40	4.25	-0.15	-3.40%	
เร็ว	9.85	9.87	0.02	0.17%	4.40	4.25	-0.15	-3.37%
	9.90	9.78	-0.13	-1.29%	4.40	4.13	-0.27	-6.15%
	10.44	10.41	-0.03	-0.25%	4.40	4.37	-0.03	-0.77%
	10.51	10.45	-0.06	-0.57%	4.40	4.32	-0.08	-1.89%
	10.64	10.54	-0.10	-0.97%	4.40	4.12	-0.28	-6.32%
	12.26	12.10	-0.15	-1.26%	4.40	4.19	-0.21	-4.79%
	12.37	12.06	-0.31	-2.53%	4.40	4.11	-0.29	-6.68%
	12.39	12.16	-0.23	-1.82%	4.40	4.15	-0.25	-5.69%

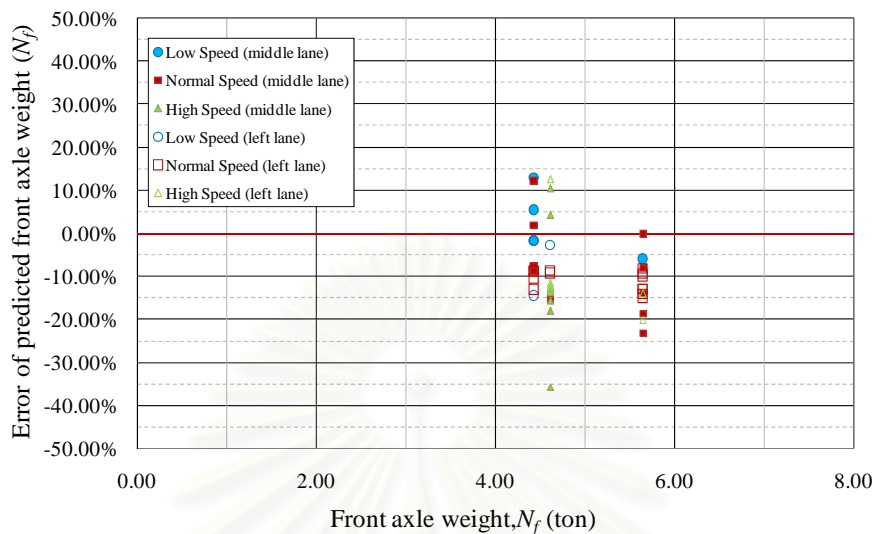
ตารางที่ 5.8 ผลการหาน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM) กรณีรถวิ่งกลางสะพาน

ระดับความเร็ว	ความเร็วของรถบรรทุก		ระยะห่างเพลาน้ำหนัก	น้ำหนักเพลาน้ำหนัก				น้ำหนักเพลาลังหลัง				น้ำหนักรวม			
	v			S	N_f	\hat{N}_f	ความคลาดเคลื่อน		N_r	\hat{N}_r	ความคลาดเคลื่อน		N_t	\hat{N}_t	ความคลาดเคลื่อน
	(เมตร/วินาที)	(กม./ชม)	เมตร				(ตัน)	(ตัน)			(ตัน)	%			(ตัน)
ช้า	5.36	19.30	4.40	4.44	5.01	0.57	12.89%	18.93	18.49	-0.44	-2.30%	23.37	23.50	0.14	0.58%
	5.60	20.15	4.40	4.44	4.35	-0.09	-1.92%	18.93	17.96	-0.97	-5.12%	23.37	22.31	-1.05	-4.51%
	6.45	23.20	4.40	4.44	4.67	0.24	5.37%	18.93	18.10	-0.83	-4.37%	23.37	22.78	-0.59	-2.52%
	6.79	24.43	4.40	5.65	5.30	-0.34	-6.02%	20.14	19.02	-1.12	-5.54%	25.79	24.33	-1.46	-5.64%
ปานกลาง	7.32	26.34	4.40	4.61	3.90	-0.71	-15.31%	16.26	15.34	-0.92	-5.64%	20.87	19.25	-1.62	-7.77%
	7.37	26.54	4.40	5.65	4.86	-0.78	-13.89%	20.14	18.94	-1.20	-5.96%	25.79	23.80	-1.98	-7.70%
	7.45	26.83	4.40	4.44	4.52	0.09	1.99%	18.93	17.79	-1.14	-6.01%	23.37	22.32	-1.05	-4.49%
	7.59	27.34	4.40	4.44	4.09	-0.34	-7.70%	18.93	17.44	-1.49	-7.87%	23.37	21.53	-1.83	-7.84%
	7.65	27.54	4.40	5.65	4.34	-1.30	-23.11%	20.14	18.97	-1.17	-5.79%	25.79	23.31	-2.47	-9.59%
	7.82	28.16	4.40	4.61	3.90	-0.71	-15.44%	16.26	15.32	-0.94	-5.79%	20.87	19.22	-1.65	-7.92%
	7.89	28.39	4.40	5.65	4.59	-1.05	-18.66%	20.14	19.08	-1.06	-5.24%	25.79	23.68	-2.11	-8.18%
	7.95	28.63	4.40	4.61	3.96	-0.65	-14.12%	16.26	15.43	-0.83	-5.10%	20.87	19.39	-1.48	-7.09%
	7.95	28.63	4.40	4.44	4.08	-0.35	-7.90%	18.93	17.75	-1.18	-6.23%	23.37	21.84	-1.53	-6.54%
	8.55	30.77	4.40	5.65	5.19	-0.45	-8.00%	20.14	18.84	-1.30	-6.44%	25.79	24.04	-1.75	-6.78%
	9.08	32.69	4.40	5.65	5.63	-0.02	-0.28%	20.14	18.21	-1.93	-9.58%	25.79	23.84	-1.94	-7.54%
	9.12	32.84	4.40	4.44	4.97	0.54	12.08%	18.93	17.61	-1.32	-6.95%	23.37	22.58	-0.78	-3.34%
9.20	33.12	4.40	4.44	4.05	-0.38	-8.65%	18.93	18.53	-0.40	-2.12%	23.37	22.58	-0.79	-3.36%	
เร็ว	10.20	36.73	4.40	4.61	4.81	0.20	4.28%	16.26	15.66	-0.60	-3.72%	20.87	20.46	-0.41	-1.95%
	10.21	36.75	4.40	4.61	5.09	0.48	10.42%	16.26	15.19	-1.07	-6.56%	20.87	20.28	-0.59	-2.81%
	10.72	38.61	4.40	4.61	3.89	-0.72	-15.71%	16.26	14.89	-1.37	-8.45%	20.87	18.77	-2.10	-10.05%
	11.64	41.89	4.40	4.61	2.97	-1.64	-35.68%	16.26	14.87	-1.39	-8.57%	20.87	17.83	-3.04	-14.56%
	12.13	43.66	4.40	4.61	3.78	-0.83	-18.09%	16.26	15.28	-0.98	-6.02%	20.87	19.06	-1.81	-8.68%
	12.27	44.19	4.40	4.61	3.97	-0.64	-13.84%	16.26	15.65	-0.61	-3.78%	20.87	19.62	-1.25	-6.00%

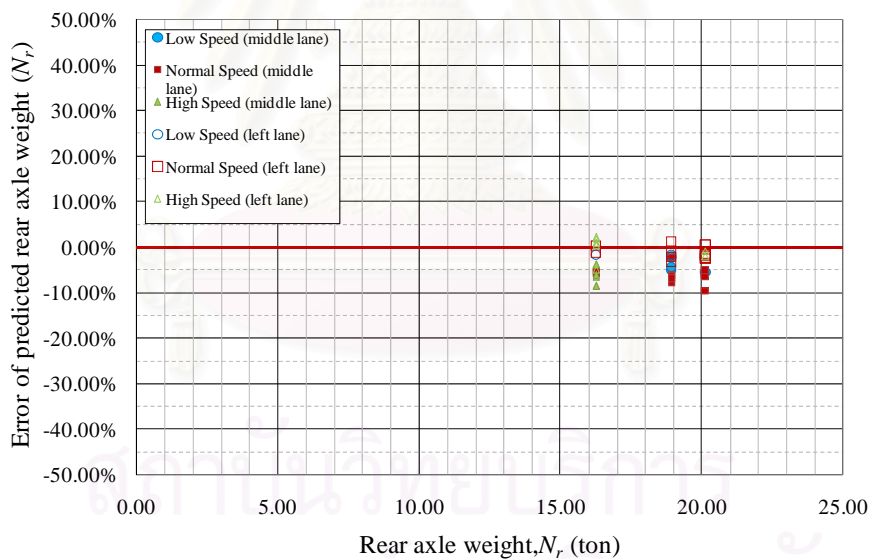
ตารางที่ 5.9 ผลการหาน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM) กรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน

ระดับความเร็ว	ความเร็วของรถบรรทุก		ระยะห่างเพล	น้ำหนักเพลหน้าสถิต				น้ำหนักเพลหลังสถิต				น้ำหนักรวม				
	v			S	N_f	\hat{N}_f	ความคลาดเคลื่อน		N_r	\hat{N}_r	ความคลาดเคลื่อน		N_t	\hat{N}_t	ความคลาดเคลื่อน	
	(เมตร/วินาที)	(กม./ชม)					เมตร	(ตัน)			(ตัน)	(ตัน)			%	(ตัน)
ช้า	5.33	19.19	4.40	4.44	4.36	-0.08	-1.76%	18.93	18.52	-0.41	-2.16%	23.37	22.88	-0.49	-2.08%	
	5.79	20.83	4.40	4.61	4.48	-0.13	-2.82%	16.26	15.96	-0.30	-1.82%	20.87	20.44	-0.43	-2.04%	
	6.30	22.69	4.40	4.44	3.79	-0.65	-14.55%	18.93	18.60	-0.33	-1.73%	23.37	22.39	-0.97	-4.16%	
ปานกลาง	7.14	25.69	4.40	5.65	5.08	-0.57	-10.06%	20.14	19.83	-0.31	-1.56%	25.79	24.90	-0.88	-3.42%	
	7.20	25.92	4.40	5.65	5.11	-0.53	-9.47%	20.14	19.78	-0.36	-1.79%	25.79	24.89	-0.89	-3.47%	
	7.20	25.93	4.40	4.61	4.18	-0.43	-9.33%	16.26	16.04	-0.22	-1.37%	20.87	20.22	-0.65	-3.12%	
	7.44	26.78	4.40	4.44	4.05	-0.39	-8.69%	18.93	18.52	-0.41	-2.19%	23.37	22.57	-0.80	-3.42%	
	7.50	26.99	4.40	5.65	4.91	-0.73	-12.99%	20.14	19.64	-0.50	-2.48%	25.79	24.55	-1.23	-4.78%	
	7.54	27.15	4.40	4.61	4.21	-0.40	-8.71%	16.26	16.30	0.04	0.25%	20.87	20.51	-0.36	-1.73%	
	7.83	28.17	4.40	4.44	3.85	-0.58	-13.13%	18.93	18.33	-0.60	-3.19%	23.37	22.18	-1.19	-5.07%	
	8.35	30.04	4.40	5.65	4.79	-0.86	-15.16%	20.14	20.25	0.11	0.53%	25.79	25.04	-0.75	-2.90%	
	8.44	30.38	4.40	5.65	5.18	-0.47	-8.28%	20.14	19.73	-0.41	-2.05%	25.79	24.91	-0.88	-3.41%	
	8.60	30.96	4.40	4.44	3.97	-0.47	-10.60%	18.93	18.66	-0.27	-1.40%	23.37	22.63	-0.74	-3.15%	
	8.72	31.39	4.40	4.44	4.04	-0.40	-8.96%	18.93	19.14	0.21	1.12%	23.37	23.18	-0.18	-0.79%	
	8.94	32.20	4.40	5.65	4.84	-0.80	-14.18%	20.14	19.61	-0.53	-2.62%	25.79	24.46	-1.33	-5.15%	
9.54	34.33	4.40	5.65	4.91	-0.73	-12.94%	20.14	20.24	0.10	0.50%	25.79	25.16	-0.63	-2.44%		
เร็ว	9.85	35.47	4.40	5.65	4.85	-0.79	-14.01%	20.14	19.98	-0.16	-0.80%	25.79	24.83	-0.95	-3.69%	
	9.90	35.66	4.40	5.65	4.50	-1.14	-20.25%	20.14	19.73	-0.41	-2.03%	25.79	24.23	-1.55	-6.02%	
	10.44	37.58	4.40	4.61	4.04	-0.57	-12.40%	16.26	16.57	0.31	1.91%	20.87	20.61	-0.26	-1.25%	
	10.51	37.83	4.40	4.61	4.07	-0.54	-11.61%	16.26	16.34	0.08	0.47%	20.87	20.41	-0.46	-2.20%	
	10.64	38.32	4.40	4.61	5.19	0.58	12.58%	16.26	15.46	-0.80	-4.95%	20.87	20.65	-0.22	-1.07%	
	12.26	44.13	4.40	4.61	4.03	-0.58	-12.63%	16.26	16.61	0.35	2.18%	20.87	20.64	-0.23	-1.09%	
	12.37	44.54	4.40	4.61	4.00	-0.61	-13.24%	16.26	16.40	0.14	0.88%	20.87	20.40	-0.47	-2.24%	
	12.39	44.60	4.40	4.61	4.00	-0.61	-13.16%	16.26	16.40	0.14	0.89%	20.87	20.41	-0.46	-2.21%	

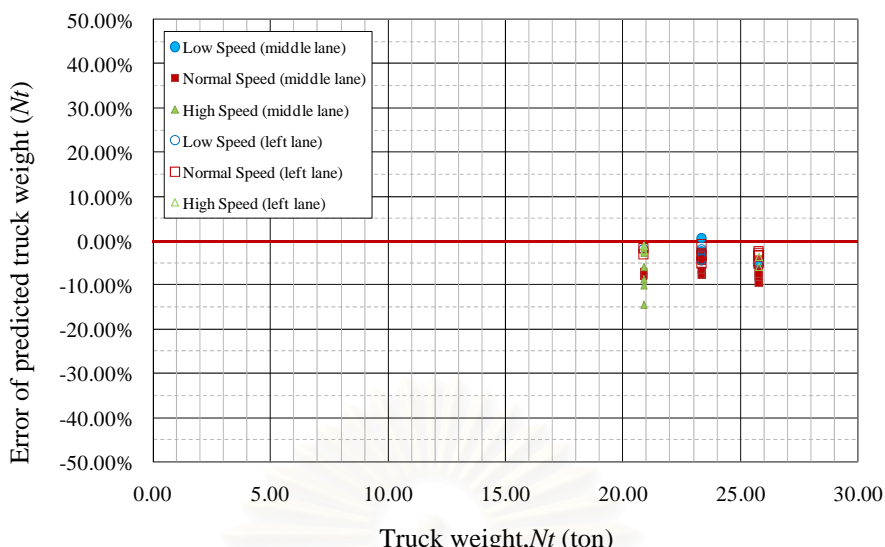
ถัดมาทำการพิจารณาผลการหาน้ำหนักบรรทุกทุกเปรียบเทียบกับน้ำหนักเพลา และความเร็ว โดยพิจารณาทั้งในกรณีรถวิ่งกลางสะพาน และกรณีรถวิ่งชิดซ้ายของสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 5.31 – 5.33



รูปที่ 5.31 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหน้าที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักเพลาหน้าจริง



รูปที่ 5.32 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาหลังที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักเพลาหลังจริง



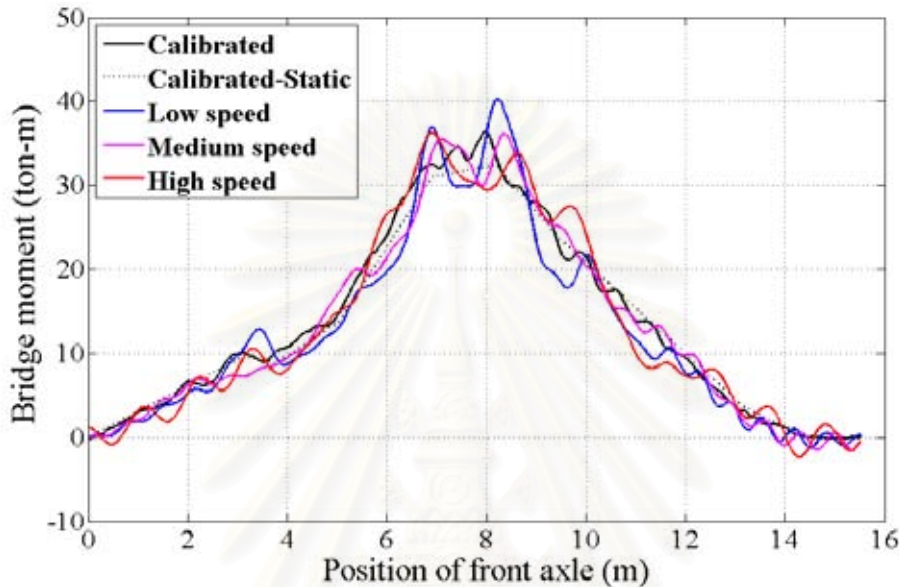
รูปที่ 5.33 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจริง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.31-5.33 พบว่าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำกระจายตัวอยู่ในช่วง -35% ถึง 13% โดยที่ส่วนมากของน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลาน้ำจริง และน้อยกว่าน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณจากวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ที่กระจายตัวอยู่ในช่วง -10% ถึง 40% โดยที่ข้อมูลที่มีการกระจายตัวมากที่สุด และมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือกรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วสูง นอกจากนี้ลักษณะการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนมีความคล้ายกับความคลาดเคลื่อนที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (รูปที่ 5.22) แต่มีค่าลดลง

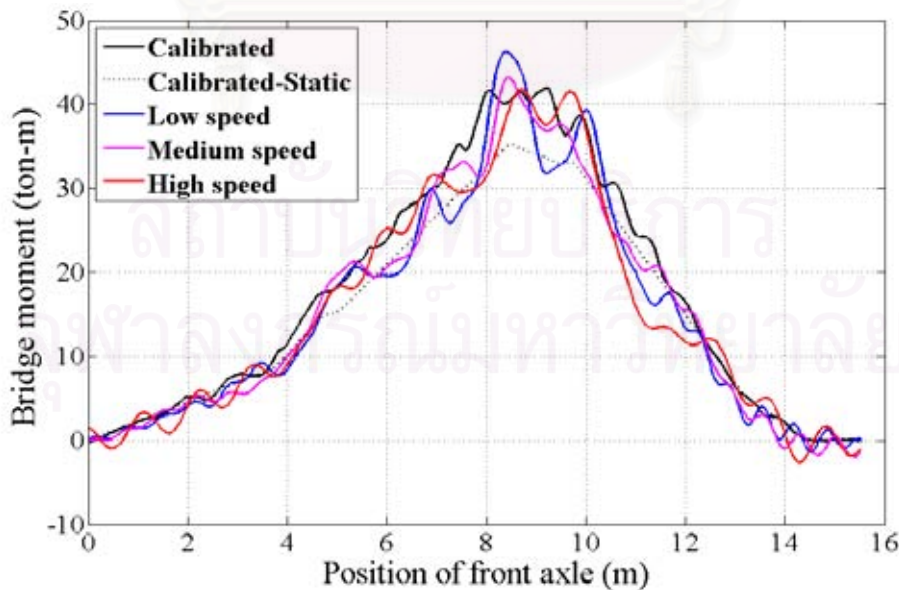
ในส่วนของคุณลักษณะความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังและน้ำหนักรวม เมื่อเทียบกับน้ำหนักเพลาลังจริงและน้ำหนักรวมจริงตามลำดับพบว่า มีความคล้ายกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (รูปที่ 5.23 และ 5.24) โดยที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่ขึ้นกับน้ำหนักที่มากขึ้น แต่น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้จะมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักรวมจริงเกือบทั้งหมด เนื่องจากผลของน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลาน้ำจริงค่อนข้างมาก ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากวิธีการคำนวณแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ ที่มีการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงบวก และลบ นอกจากนี้กรณีที่รถบรรทุกมีความเร็วสูงจะเป็นกรณีที่รถบรรทุกมีน้ำหนักเบาอย่างเห็นได้ชัดเจน

ผลของน้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้จากวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถที่มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลาน้ำสถิต อาจเนื่องมาจากความแปรปรวนที่มากขึ้นของค่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้เนื่องจากผลของความเร็วของรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.34 - 5.36 แสดงค่าโมเมนต์ดัดจากการปรับเทียบ (calibrated) (เส้นสีดำ) ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อที่ 5.2 เปรียบเทียบกับ ค่าโมเมนต์ดัดสถิต (เส้นประสีดำ) โมเมนต์ดัดเนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ (26 กม./ชม. เส้นสีน้ำเงิน) ความเร็วปานกลาง (29 กม./ชม. เส้นสีม่วง) และความเร็วสูง (44 กม./ชม. เส้นสีแดง) ที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 ตามลำดับ โดยที่รถบรรทุกมีน้ำหนักรวม 20.87 ตัน โดยสามารถสังเกตได้ที่ระยะการเคลื่อนที่ของเพลาน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 4 เมตร ของรูปที่ 5.34 - 5.36 ซึ่งแสดงถึงโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักเพลาน้ำของรถบรรทุกขณะที่เพลาลังยังไม่เคลื่อนที่เข้าสะพาน (จะเริ่มมีผลของน้ำหนักเพลาลังเมื่อเพลาน้ำเคลื่อนที่มากกว่าระยะห่างเพลาน้ำ หรือ 4.4 เมตร) ที่บริเวณดังกล่าวค่าโมเมนต์ดัดจากการปรับเทียบมีค่าใกล้เคียงกับค่าโมเมนต์ดัดสถิตมาก เมื่อพิจารณาโมเมนต์ดัด

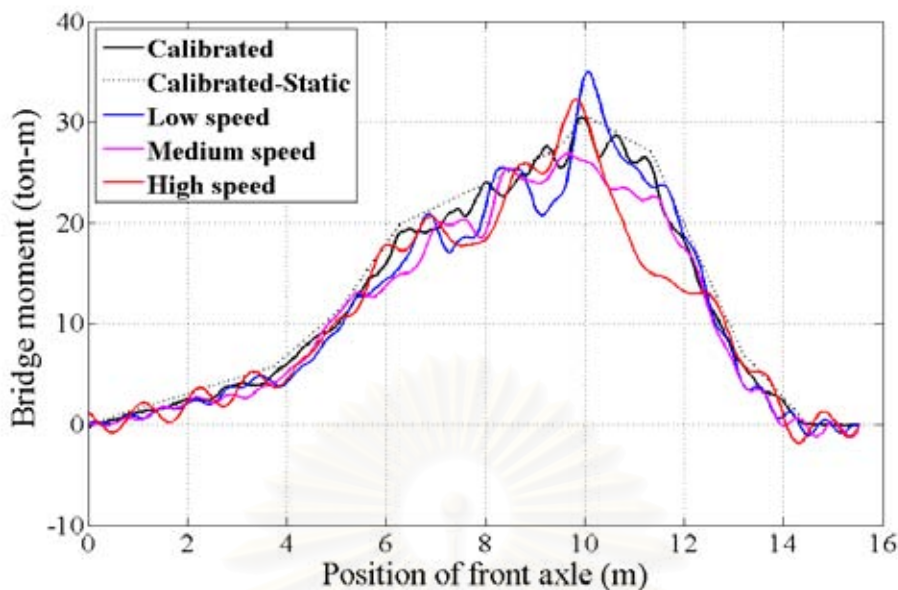
เนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ พบว่าโมเมนต์ดัดมีความแปรปรวนมากขึ้นในทิศทางที่ลดลง ซึ่งสวนทางกับค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่งเพลาน้ำ 6 ถึง 8 เมตร ที่มีความแปรปรวนในทิศทางที่สูงกว่าโมเมนต์สถิต ดังนั้นในวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่รู้ข้อมูลตำแหน่งรถ ซึ่งมีตัวแปรที่มากกว่าวิธีการหาน้ำหนักแบบรู้ข้อมูลตำแหน่งรถ ทำให้สามารถปรับค่าโมเมนต์ได้ใกล้เคียงกว่า จึงทำให้ได้ค่าน้ำหนักเพลาน้ำต่ำกว่าค่าน้ำหนักเพลาน้ำสถิตตามลักษณะการแปรปรวนของโมเมนต์ดัดที่วัดได้



รูปที่ 5.34 โมเมนต์ดัดจากการปรับเทียบ (เส้นสีดำ) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดสถิต (เส้นประสีดำ) โมเมนต์ดัดเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ (เส้นสีน้ำเงิน) ความเร็วปานกลาง (เส้นสีม่วง) และความเร็วสูง (เส้นสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด L/3



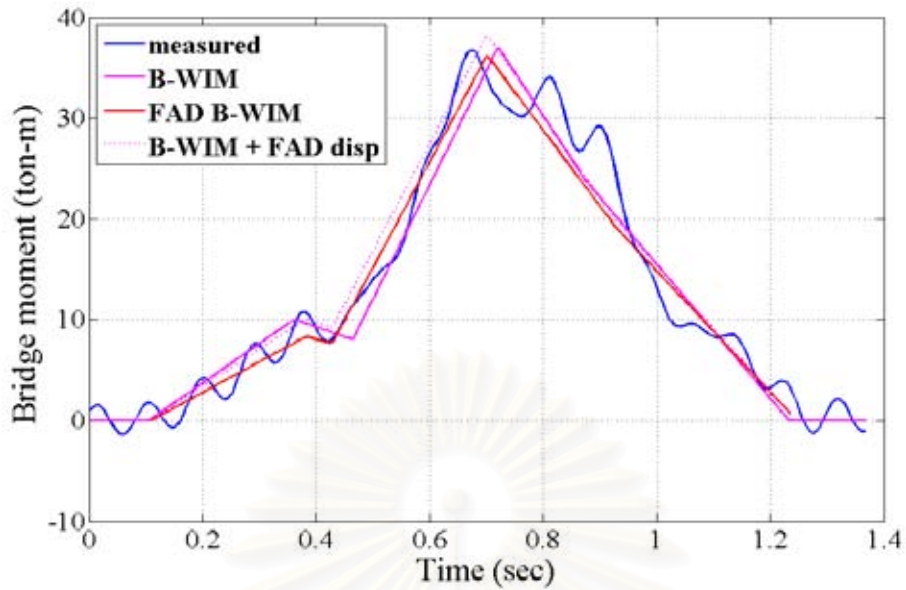
รูปที่ 5.35 โมเมนต์ดัดจากการปรับเทียบ (เส้นสีดำ) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดสถิต (เส้นประสีดำ) โมเมนต์ดัดเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ (เส้นสีน้ำเงิน) ความเร็วปานกลาง (เส้นสีม่วง) และความเร็วสูง (เส้นสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด L/2



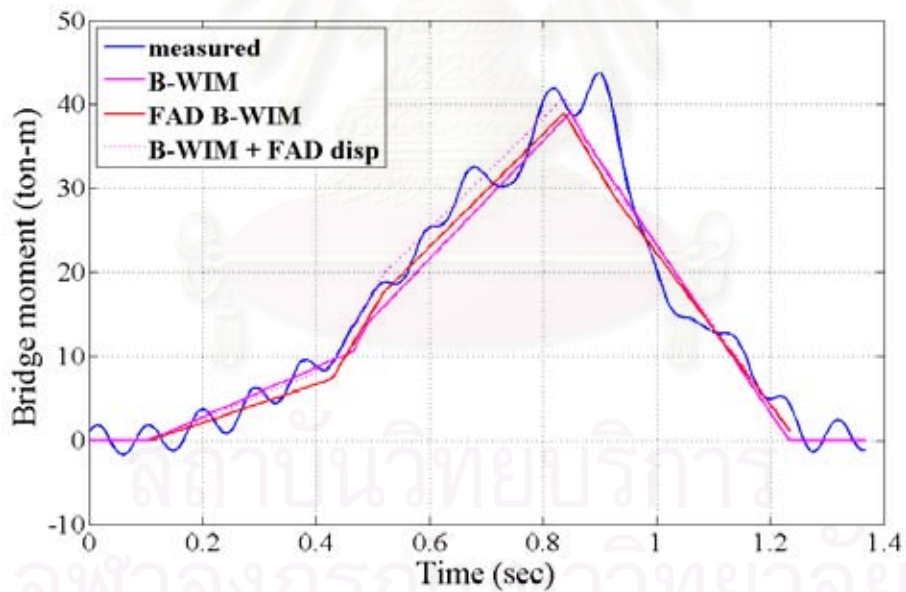
รูปที่ 5.36 โมเมนต์ตัดจากการปรับเทียบ (เส้นสีดำ) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ตัดสถิต (เส้นประสีดำ) โมเมนต์ตัดเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ (เส้นสีน้ำเงิน) ความเร็วปานกลาง (เส้นสีม่วง) และความเร็วสูง (เส้นสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด 2L/3

ในส่วนของผลการคำนวณน้ำหนักเพลาหลังที่มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลาหลังสถิตนั้น เกิดจากการที่เพลาหลังที่คำนวณได้เคลื่อนที่เร็วกว่าเพลาหลังจริง (เนื่องมาจากระยะห่างเพลาที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าระยะห่างเพลาจริง) ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ที่จุดวัดสูงกว่าค่าที่ควรจะเป็น ดังแสดงในรูปที่ 5.37 ถึง 5.39 แสดงค่าโมเมนต์ตัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ตัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โมเมนต์ตัดที่คำนวณโดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และโมเมนต์ตัดจากการใช้น้ำหนักเพลาหน้าและหลังที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ กับตำแหน่งเพลาที่ได้จากวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 12.27 เมตร/วินาที (44.19 กม./ชม.) และมีน้ำหนักรวม 20.87 ตัน จากรูปที่ 5.37 และ 5.38 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อให้ค่าตำแหน่งเพลาหลังเคลื่อนที่เร็วกว่าความเป็นจริง จะทำให้ค่าสูงสุดของโมเมนต์มีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เส้นสีม่วง และเส้นประสีแดงเป็นโมเมนต์ตัดเนื่องจากน้ำหนักเพลาเท่ากัน แต่เส้นประสีแดงมีตำแหน่งเพลาหลังเคลื่อนที่เร็วกว่าตำแหน่งเพลาหลังจริง ซึ่งทำให้มีค่าโมเมนต์ตัดสูงกว่าที่ควรจะเป็น หรือในทางตรงกันข้ามคือที่โมเมนต์ใกล้เคียงกันแต่เมื่อเพลาหลังเคลื่อนที่เร็วกว่าจะให้ค่าน้ำหนักเพลาหลังน้อยกว่าความเป็นจริง (เส้นสีแดง)

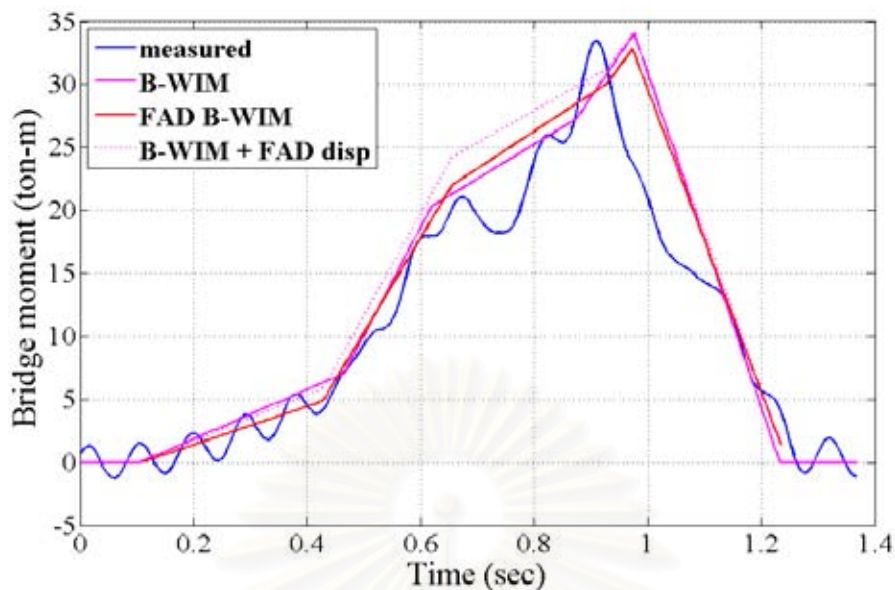
จากการที่ทั้งน้ำหนักเพลาหน้า และน้ำหนักเพลาหลังที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลาหน้า และน้ำหนักเพลาหลังสถิต ทำให้อัตราส่วนที่คำนวณได้เกือบทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่าน้ำหนักรวมสถิต โดยมีกรณีที่ค่าน้ำหนักรวมที่คำนวณได้มากกว่าค่าน้ำหนักรวมสถิตเพียงกรณีเดียว



รูปที่ 5.37 โมเมนต์ดัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และ โมเมนต์ดัดแบบผสม (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด L/3



รูปที่ 5.38 โมเมนต์ดัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และ โมเมนต์ดัดแบบผสม (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด L/2



รูปที่ 5.39 โมเมนต์ดัดที่วัดได้ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีม่วง) โดยวิธีไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (เส้นสีแดง) และ โมเมนต์ดัดแบบผสม (เส้นประสีแดง) ที่ตำแหน่งวัด 2L/3

5.4.3 สรุปผลการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก

จากการทดลองการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถสามารถสรุปได้ว่า วิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถที่เสนอมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักรถในภาคสนาม นั่นคือสามารถหาน้ำหนักได้ทั้ง 47 กรณีทดสอบ โดยสามารถหาน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักสถิติที่แท้จริง มีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมมากที่สุดเท่ากับ -15% โดยกรณีที่ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดสัญญาณความเครียดที่วัดได้มีค่าต่างจากสัญญาณความเครียดทางทฤษฎีค่อนข้างมาก อาจเนื่องมาจากผลของคุณสมบัติของวัสดุ (ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต) และผลของความไม่สม่ำเสมอของขนาดหน้าตัด (ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย) ทำให้ได้คำตอบที่มีค่าแตกต่างจากความเป็นจริง

เมื่อพิจารณาผลของคำตอบที่ได้เทียบกับความเร็ว และน้ำหนักที่แท้จริง พบว่าผลที่ได้ไม่ชัดเจนทั้งสองกรณี ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะข้อมูลในการทดสอบน้อย และช่วงข้อมูลแคบเกินไป ทำให้ไม่สามารถพิจารณาเปรียบเทียบในตัวแปรดังกล่าวได้

และเมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้เปรียบเทียบกับผลการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (ordinary B-WIM) ดังแสดงในรูปที่ 5.28 - 5.30 น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ได้จากวิธีการหาน้ำหนักแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ (FAD B-WIM) มีความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าคำตอบที่ได้จากวิธีการหาน้ำหนักแบบใช้ข้อมูลตำแหน่งรถเกือบทุกกรณี เนื่องจากเหตุผลที่โมเมนต์ดัดที่วัดได้มีแนวโน้มการแปรปรวนในลักษณะที่ค่าน้ำหนักเพลาน้ำมีค่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักเพลาน้ำสถิติ ประกอบกับการที่เพลาลงที่คำนวณได้เคลื่อนที่เร็วกว่าเพลาลงจริง ทำให้น้ำหนักเพลาลงที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักเพลาลงสถิติ ดังนั้นเมื่อทั้งน้ำหนักเพลาน้ำ และน้ำหนักเพลาลงที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักเพลาน้ำ และน้ำหนักเพลาลงสถิติแล้ว จึงทำให้น้ำหนักรวมที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักรวมสถิติของรถบรรทุก

การทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสัมฤทธิ์ผลในขอบเขตของการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ในการจราจรปกติทั่วไป ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง -15% ถึง 1% โดยที่ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมจะน้อยกว่าการคำนวณจากวิธีใช้ข้อมูล

ตำแหน่งรถประมาณ 3% และสามารถพัฒนาวิธีการหาน้ำหนักดังกล่าวไปสู่การนำไปใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกจริงในภาคสนามได้ ในส่วนการพัฒนาความแม่นยำในการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก สามารถปรับปรุงให้มีความแม่นยำมากขึ้นโดยการพัฒนาระบบการหาน้ำหนักให้สามารถหาน้ำหนักเพลาน้ำหนักได้แม่นยำมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ระบบสามารถหาความแม่นยำของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้มากขึ้นด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6 การประยุกต์ใช้งานในภาคสนาม

จากการศึกษาประสิทธิภาพการหาน้ำหนักบรรทุกทุกแบบไม่ใช่ข้อมูลตำแหน่งรถ โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบภาคสนามซึ่งได้กล่าวในบทที่ 5 พบว่าวิธีหาน้ำหนักที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถหาน้ำหนักบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ผลความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง $\pm 15\%$ ในบทนี้จึงได้ทำการศึกษาคำหาน้ำหนักบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบใช้งานจริงในภาคสนาม เพื่อเป็นการยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการนำระบบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกแบบไม่ใช่ข้อมูลตำแหน่งรถที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้มาใช้งานจริง

6.1 การทดสอบภาคสนาม

การศึกษาได้นำข้อมูลมาจากงานวิจัยของ ธีระชัย ดีสมสุข (2008) ซึ่งได้ทำการทดลองหาน้ำหนักบรรทุกขณะใช้งานจริงในภาคสนาม การทดสอบได้ใช้สะพานสะพานข้ามคลองบางน้อย ซึ่งเป็นสะพานเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบของ ภาณุ พุ่งสุข (2005) ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.1.1 ลักษณะโครงสร้างของสะพาน และข้อมูลคุณสมบัติของสะพานได้แสดงใน รูปที่ 6.1 และ ตารางที่ 6.1 ตามลำดับ

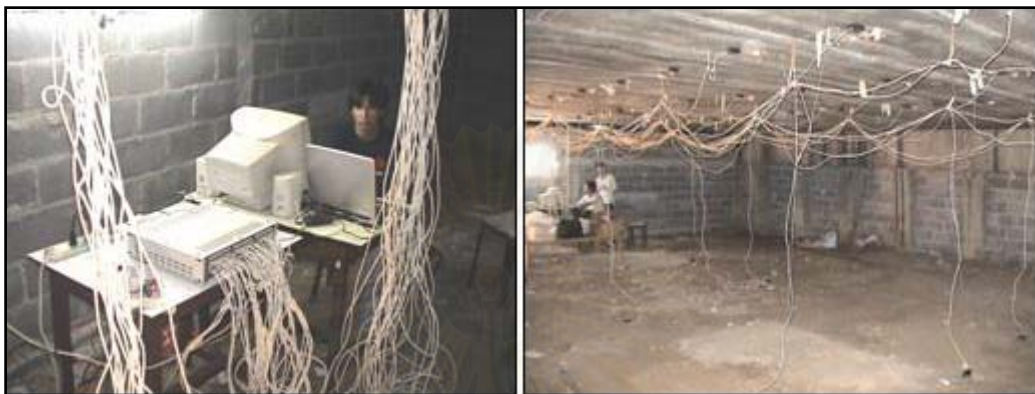


รูปที่ 6.1 สะพานข้ามคลองบางน้อยที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของสะพานข้ามคลองบางน้อย

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความยาวสะพาน	L	9.43	เมตร
จำนวนตำแหน่งที่ติดมาตรวัดความเครียด	m	3	ตำแหน่ง
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนคาน คุณสมบัติความเฉื่อยของหน้าตัดสะพาน	EI	2.71×10^9	นิวตัน-เมตร ²
น้ำหนักของสะพานต่อความยาว คุณสมบัติหน้าตัดของสะพาน	ρA	15120	กิโลกรัม/เมตร
อัตราส่วนความหน่วงของสะพาน	ζ	0.025	-

การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบได้แก่อุปกรณ์วัดความเครียด, อุปกรณ์บอกตำแหน่งรถบรรทุก และระบบรวบรวมข้อมูลได้ทำการติดตั้งในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.1.3 โดยรูปที่ 6.2 แสดงการติดตั้งระบบรวบรวมข้อมูล และอุปกรณ์วัดความเครียดที่ได้ห้องสะพานทดสอบ และในรูปที่ 6.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์บอกตำแหน่งรถบรรทุก



รูปที่ 6.2 ระบบรวบรวมข้อมูล และการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ได้ห้องสะพาน

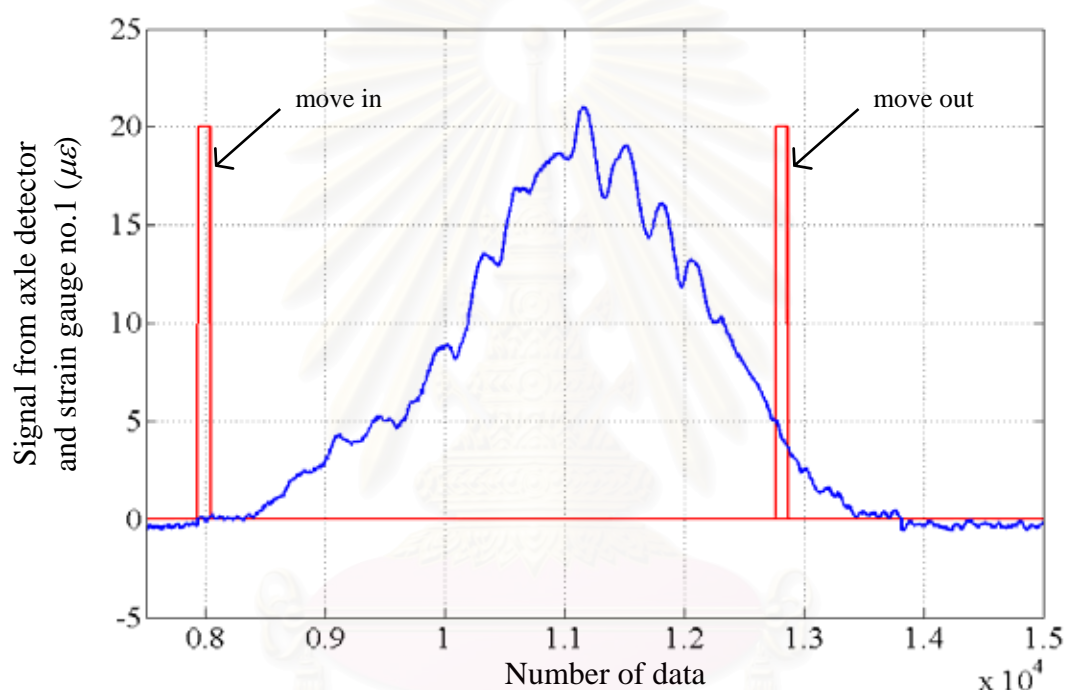


รูปที่ 6.3 การติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถบรรทุก

การศึกษาได้พิจารณาที่รถบรรทุกทั่วไปซึ่งเคลื่อนที่ข้ามสะพานในช่วงการตรวจวัดราว 1 สัปดาห์เป็นจำนวน 574 กรณีมาทำการคำนวณหาน้ำหนัก แต่เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าน้ำหนักที่แท้จริงของรถบรรทุกแต่ละคันได้ ในการศึกษาจึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการหาน้ำหนักโดยการเปรียบเทียบผ่านความเร็วและระยะห่างเพลาคี่คำนวณได้ กับความเร็วและระยะห่างเพลาคี่ที่แท้จริงที่ได้จากอุปกรณ์บอกตำแหน่งรถบรรทุก

6.1.1 วิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุก และข้อมูลการทดสอบภาคสนามที่นำมาใช้ในการหาน้ำหนัก

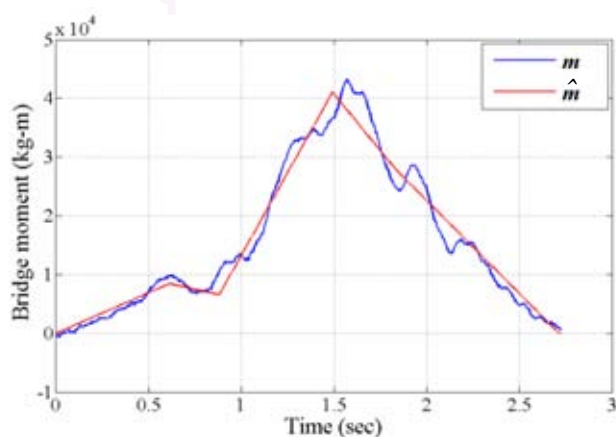
วิธีการหาน้ำหนักที่ใช้ในการศึกษาในบทนี้ใช้วิธีการหาน้ำหนักแบบใช้เงื่อนไขในการรวบรวมการคำนวณ (proposed method) ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับวิธีการหาน้ำหนักที่ใช้ในบทที่ 4 และ 5 โดยได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 2.3.2 ในการหาน้ำหนักจากวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ข้อมูลความเครียดที่วัดได้จากภาคสนาม มาทำการหาค่าต่ำที่สุดระหว่างโมเมนต์ซึ่งแปลงมาจากค่าความเครียดที่วัดได้กับโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณ รูปที่ 6.4 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดตัวที่ 1 (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณจากเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถบรรทุก (เส้นสีแดง) โดยที่ข้อมูลตำแหน่งรถบรรทุกจากเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าความเร็ว และระยะห่างเพลลาที่ได้จากการคำนวณ ไม่ได้นำมาใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยตรง



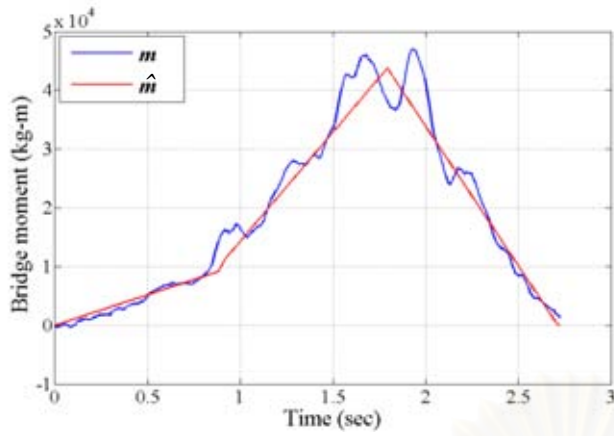
รูปที่ 6.4 ตัวอย่างสัญญาณความเครียด กับสัญญาณจากเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งที่ตำแหน่งรถเข้า และออกจากสะพาน

6.2 ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากข้อมูลการใช้งานจริง

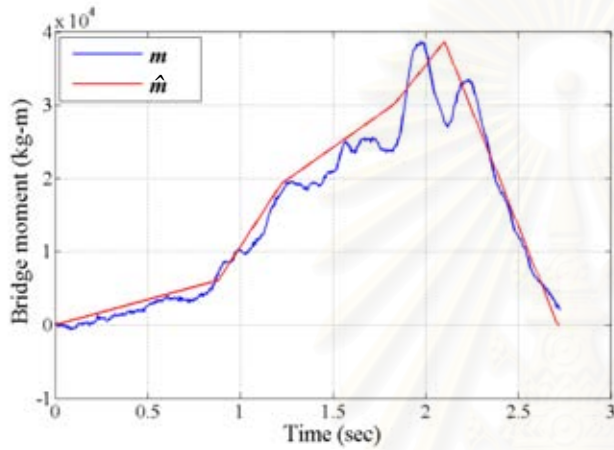
ตัวอย่างผลการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้แสดงในรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นกรณีที่ 233 รถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็ว 5.31 เมตร/วินาที (19.10 กม./ชม.) และมีระยะห่างเพลลา 4.97 เมตร



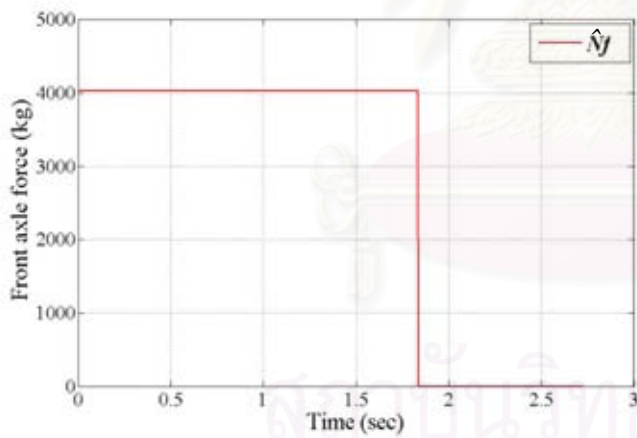
รูปที่ 6.5ก โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_1(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_1(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/3$



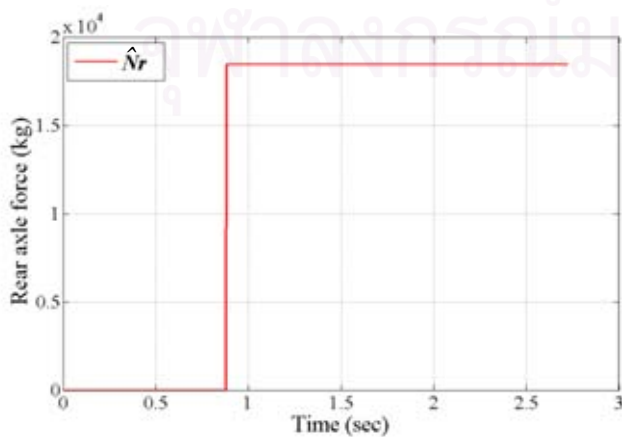
รูปที่ 6.5ข โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_2(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_2(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $L/2$



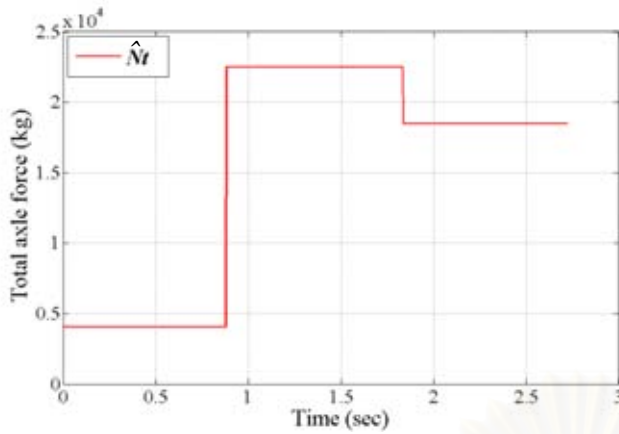
รูปที่ 6.5ค โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้, $\hat{m}_3(t)$ (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ตัดจริง, $m_3(t)$ (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ระยะ $2L/3$



รูปที่ 6.5ง น้ำหนักเพลาน้ำที่คำนวณได้, \hat{N}_f (เส้นสีแดง)



รูปที่ 6.5จ น้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้, \hat{N}_r (เส้นสีแดง)

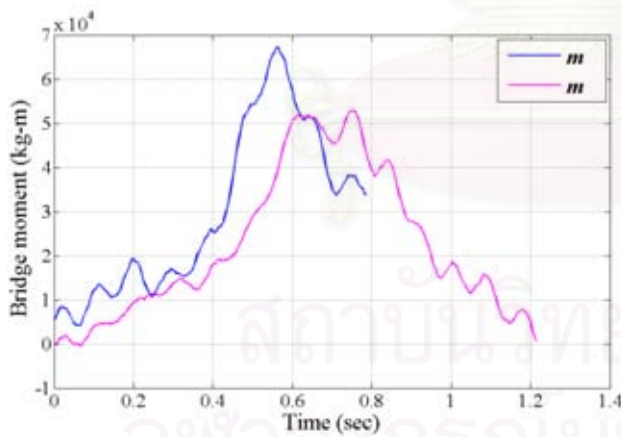


รูปที่ 6.5 ข น้้าหนักรวมที่คำนวณได้, \hat{N}_t (เส้นสีแดง)

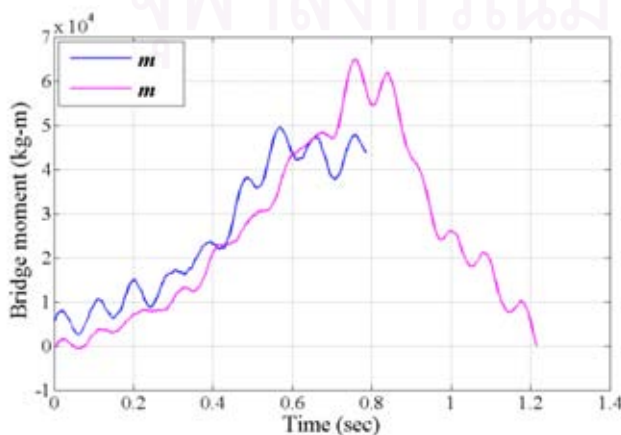
6.2.1 ประสิทธิภาพการหาน้้าหนักรถบรรทุก

จากการศึกษาการหาน้้าหนักรถบรรทุกทั้ง 574 กรณี พบว่าระบบการหาน้้าหนักรถบรรทุกที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณได้ 501 กรณี หรือคิดเป็น 87.28% ซึ่งมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้้าหนักน้อยกว่าผลการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในบทที่ 4 (98%) และผลการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามในบทที่ 5 (100%)

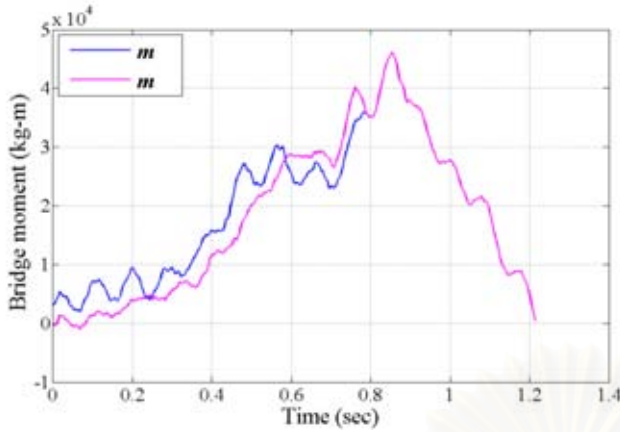
เมื่อพิจารณากรณีที่ระบบการหาน้้าหนักไม่สามารถหาทั้ง 73 กรณี พบว่ากรณีที่มีปัญหาส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ โดยกลุ่มแรกคือกรณีที่ค่าโมเมนต์ดัดจริงที่แปลงค่ามาจากสัญญาณความเครียดที่วัดได้มีความไม่สมบูรณ์ ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดจริงกรณีที่ 32 ซึ่งเป็นกรณีที่มีปัญหา กับค่าโมเมนต์ดัดจริงกรณีที่ 40 ซึ่งเป็นกรณีที่สามารถคำนวณได้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณโมเมนต์ดัดจากกรณีดังกล่าวไม่สอดคล้องกับโมเมนต์ดัดที่ระบบจะคำนวณได้จากฟังก์ชันของเส้นอิทธิพล จึงทำให้ไม่สามารถหาน้้าหนักได้



รูปที่ 6.6ก สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ไม่สมบูรณ์ กรณีที่ 32, $m_1(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 40, $m_2(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ L/3

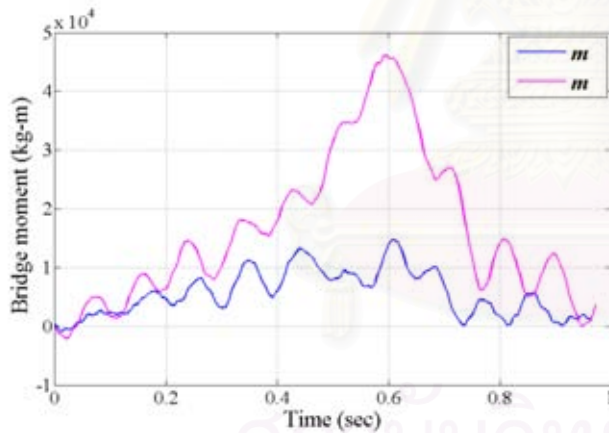


รูปที่ 6.6ข สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ไม่สมบูรณ์ กรณีที่ 32, $m_2(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 40, $m_2(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ L/2

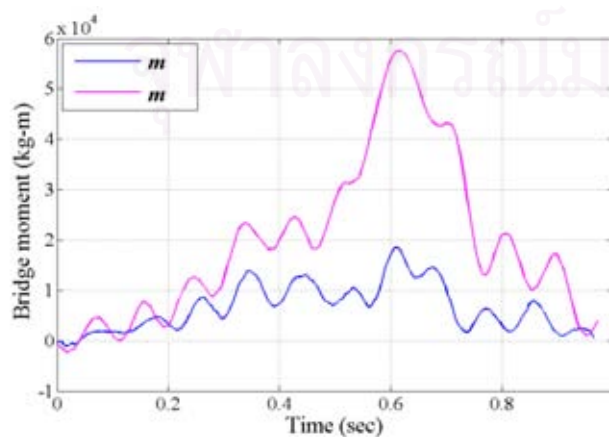


รูปที่ 6.6ค สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ไม่สมบูรณ์กรณีที่ 32, $m_3(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 40, $m_3(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $2L/3$

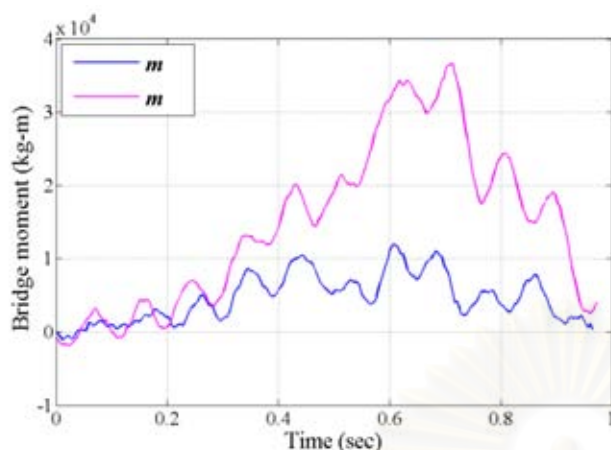
กรณีที่มีปัญหากลุ่มที่สองเป็นกรณีที่ค่าโมเมนต์ดัดจริงที่แปลงค่ามาจากสัญญาณความเครียดที่วัดได้ไม่มีค่าสูงสุดชัดเจนเพียงพอที่ระบบการหาน้ำหนักจะสามารถหาน้ำหนักได้ กรณีดังกล่าวได้แก่กรณีการหาน้ำหนักที่ 16 ซึ่งได้เปรียบเทียบกับกรณีที่ 56 ซึ่งเป็นกรณีที่สามารถหาน้ำหนักได้ และมีความเร็วรถใกล้เคียงกันดังรูปที่ 6.7 เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้จากกรณีดังกล่าวจะประมาณได้ว่ากรณีนี้รถบรรทุกมีน้ำหนักเบา ซึ่งอาจเป็นรถบรรทุกเปล่าที่มีน้ำหนักรวมต่ำกว่า 10 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์ดัดในกรณี 56 ที่สามารถคำนวณน้ำหนักรวมได้ 22.94 ตัน



รูปที่ 6.7ก สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ค่าสูงสุดไม่ชัดเจนกรณีที่ 16, $m_1(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 56, $m_1(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $L/3$



รูปที่ 6.7ข สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ค่าสูงสุดไม่ชัดเจนกรณีที่ 16, $m_2(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 56, $m_2(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $L/2$



รูปที่ 6.7ค สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่ค่าสูงสุดไม่ชัดเจนกรณีที่ 16, $m_3(t)$ (เส้นน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับ สัญญาณโมเมนต์ดัดจริงที่สมบูรณ์กรณีที่ 56, $m_3(t)$ (เส้นสีม่วง) ที่ระยะ $2L/3$

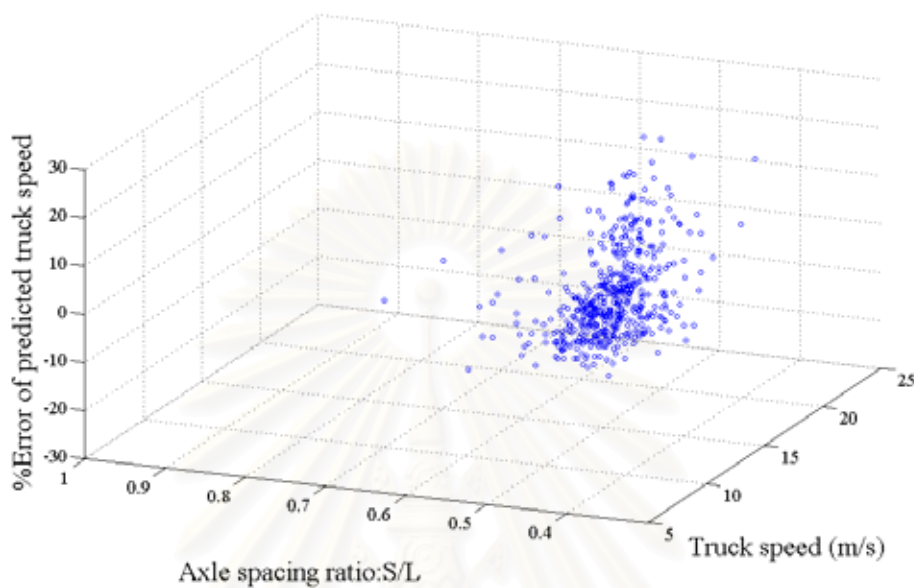
เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่สามารถหาน้ำหนักได้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของสัญญาณ และความไม่ชัดเจนของค่าสูงสุดพบว่า มีจำนวน 47 กรณี และถ้าตัดกรณีเหล่านี้ออกจะเหลือกรณีที่ไม่สามารถหาน้ำหนักได้ 26 กรณี ดังนั้นกรณีที่สามารถหาน้ำหนักได้จึงเป็น 501 กรณีในจำนวน 527 กรณี หรือคิดเป็น 95.07% สำหรับในจำนวนกรณีที่ยังหาค่าตอบไม่ได้ 26 กรณี เมื่อทำการหาน้ำหนักโดยปลดเงื่อนไขขอบเขตล่างของน้ำหนักเพลาน้ำหนัก (คือน้ำหนักเพลาน้ำหนักต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 ตัน) ออก (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2.1) จะสามารถหาน้ำหนักเพิ่มได้ 19 กรณี ในส่วนของอีก 9 กรณีที่เหลือ สามารถหาค่าตอบได้โดยปรับเงื่อนไขการคำนวณความเร็วเปรียบเทียบ (หัวข้อที่ 4.1 สมการที่ 4.2 และ 4.3) จากเดิมที่ให้มีความแตกต่างของความเร็วที่คำนวณได้ กับความเร็วเปรียบเทียบไม่เกิน 6% เป็นมีความแตกต่างได้ 20% ดังนั้นวิธีการหาน้ำหนักกรณีครบทุกที่เสนอสามารถหาน้ำหนักกรณีสัญญาณโมเมนต์ดัดมีความสมบูรณ์ได้หมดทั้ง 527 กรณี

6.2.2 ผลการหาน้ำหนักกรณีครบทุก

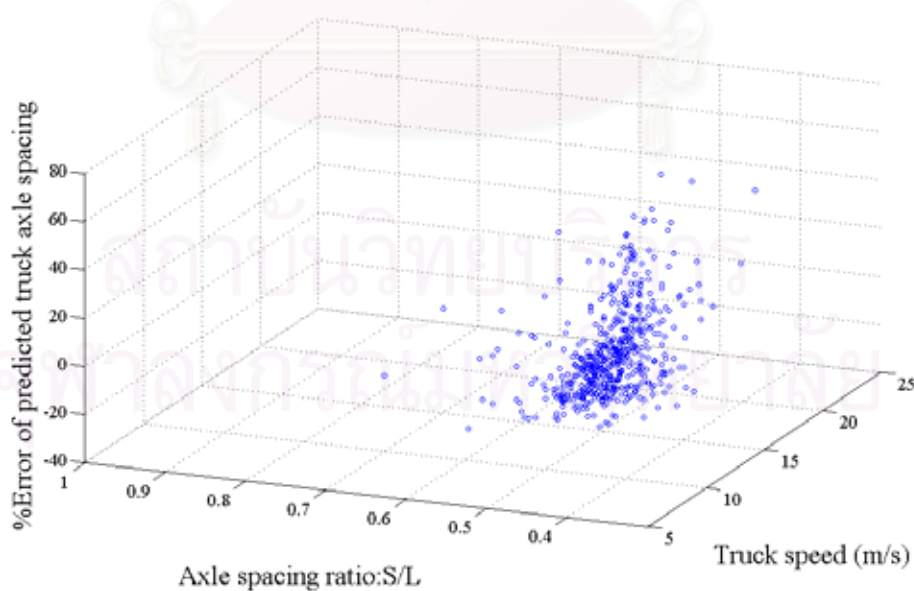
จากการคำนวณหาน้ำหนักกรณีครบทุกทั้ง 527 กรณีสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ความเร็วของรถบรรทุกที่คำนวณได้ (\hat{v}) อยู่ในช่วง 5 ถึง 24 เมตร/วินาที โดยมีความคลาดเคลื่อน 21% ถึง -21% มีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.67% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.29%
- ระยะห่างเพลาคำนวณได้ (\hat{S}) อยู่ในช่วง 3 ถึง 7.3 เมตร โดยมีความคลาดเคลื่อน 63% ถึง -40% มีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -0.90% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 15.25%
- น้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้ (\hat{N}_f) อยู่ในช่วง 1 ถึง 11 ตัน
- น้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้ (\hat{N}_r) อยู่ในช่วง 4 ถึง 35 ตัน
- น้ำหนักรวมที่คำนวณได้ (\hat{N}_t) อยู่ในช่วง 6 ถึง 41 ตัน

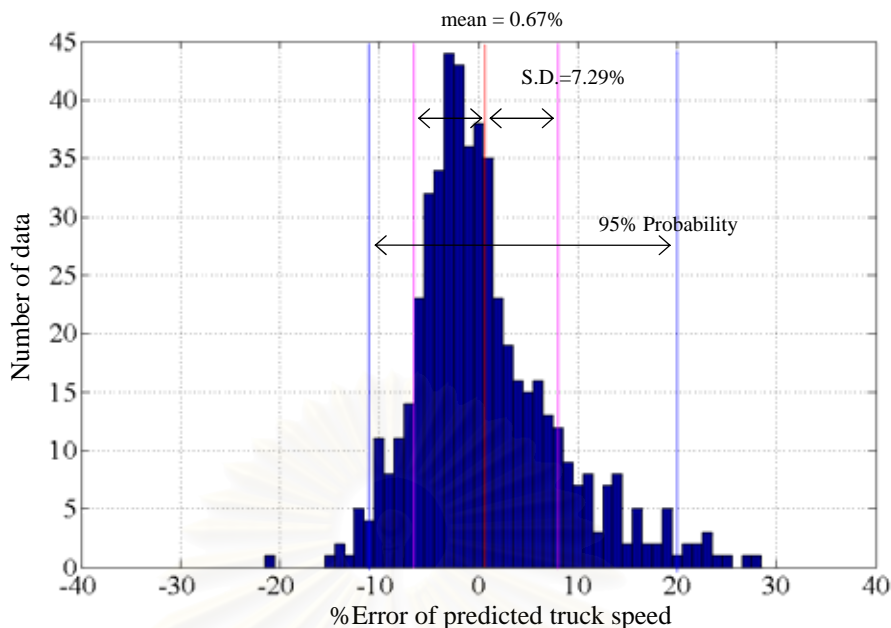
ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว และระยะห่างเพลาคำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าความเร็วจริงกับระยะห่างเพลาคจริงแสดงในรูปที่ 6.8 โดยที่แสดงการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของความเร็ว และระยะห่างเพลานี้ในรูปที่ 6.9



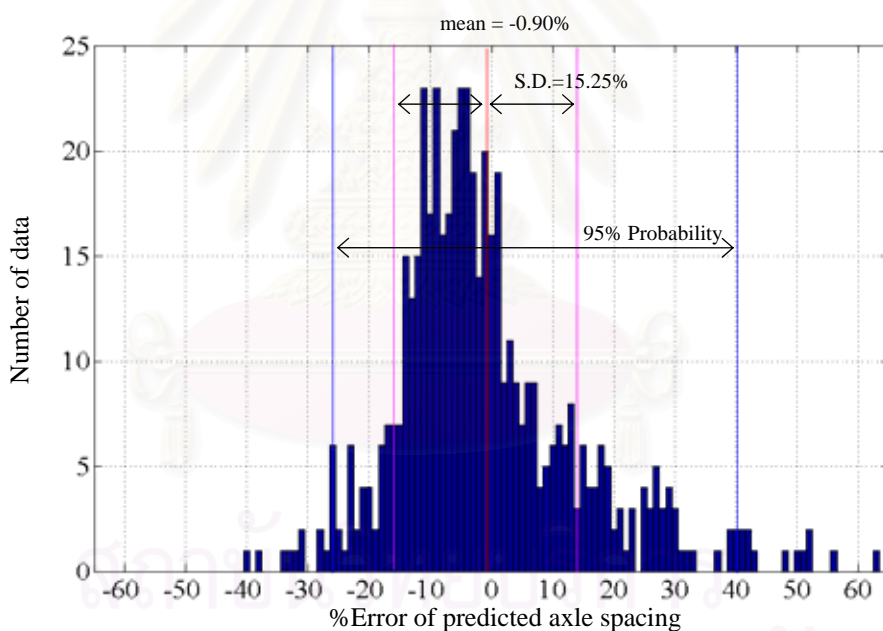
รูปที่ 6.8ก ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาคจริง



รูปที่ 6.8ข ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลาคำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาคจริง



รูปที่ 6.9ก การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้



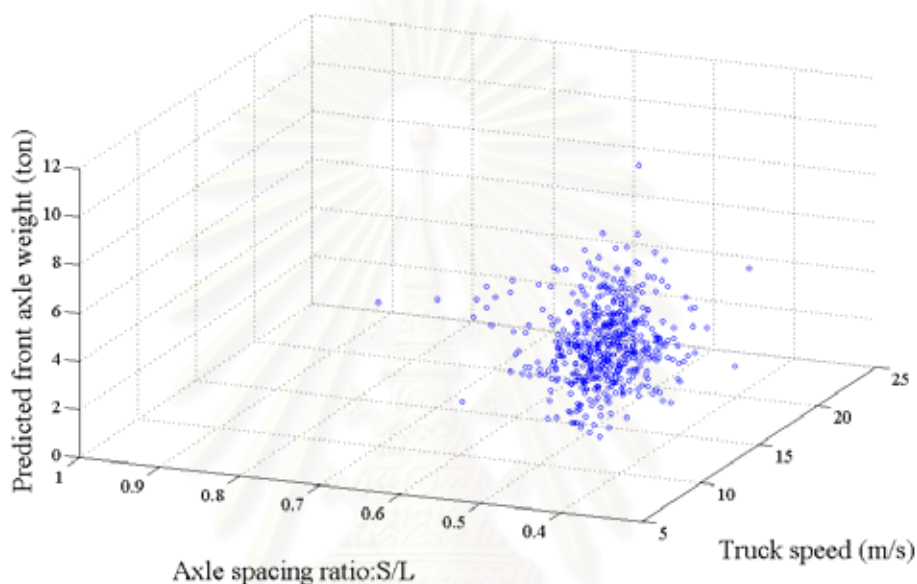
รูปที่ 6.9ข การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้

จากรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนของทั้งความเร็ว และระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้มีค่ามากขึ้น เมื่อรถบรรทุกแล่นด้วยความเร็วมากขึ้น หรือเมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกมีค่าน้อยลง โดยที่แนวโน้มของความคลาดเคลื่อนในลักษณะนี้สอดคล้องกับการทดลองการหาน้ำหนักรถบรรทุกในภาคสนามที่ได้ศึกษาในบทที่ 5

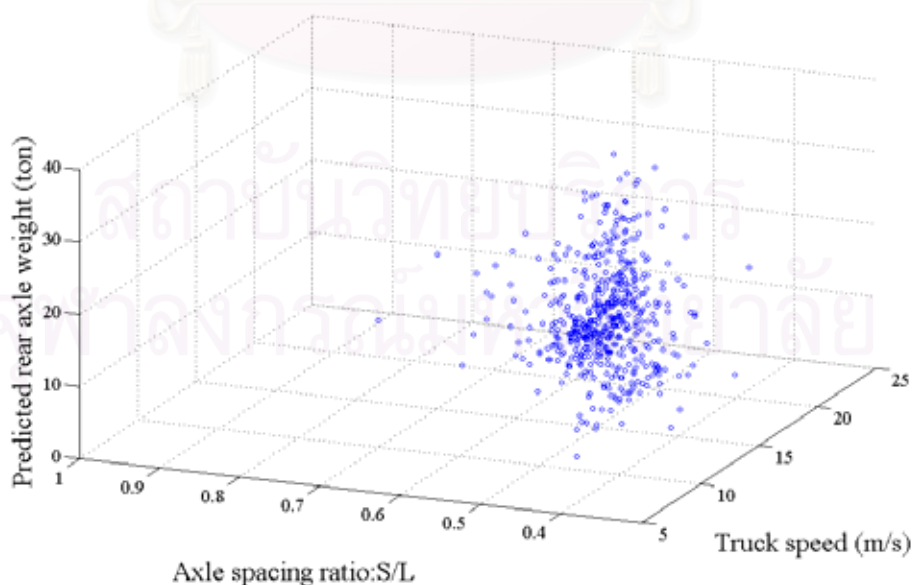
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของความเร็ว และระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้จากการวาดกราฟแบบฮิสโทแกรมในรูปที่ 6.9 จะพบว่า กราฟของการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนของความเร็ว และของระยะห่างเพลลามีลักษณะคล้ายกันคือกราฟมีข้อมูลเบ้ไปทางขวา หรือการกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่ค่อนไปทางซ้าย โดยที่ค่าเฉลี่ยของความเร็ว และระยะห่างเพลลาจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ (ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของ

ความเร็ว และระยะห่างเพลาท่ากับ 0.67% กับ -0.90% ตามลำดับ) ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของของระยะห่างเพลามีการกระจายตัวมากกว่าข้อมูลความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณได้ประมาณสองเท่า (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของความเร็ว และของระยะห่างเพลาท่ากับ 7.29% กับ 15.25% ตามลำดับ) ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงความเป็นไปได้ 95% ของความเร็วจึงมีขอบเขตที่น้อยกว่าคืออยู่ในช่วง +20% ถึง -10% โดยที่ความคลาดเคลื่อนในช่วงความเป็นไปได้ 95% ของระยะห่างเพลายู่ในช่วง +40% ถึง -27%

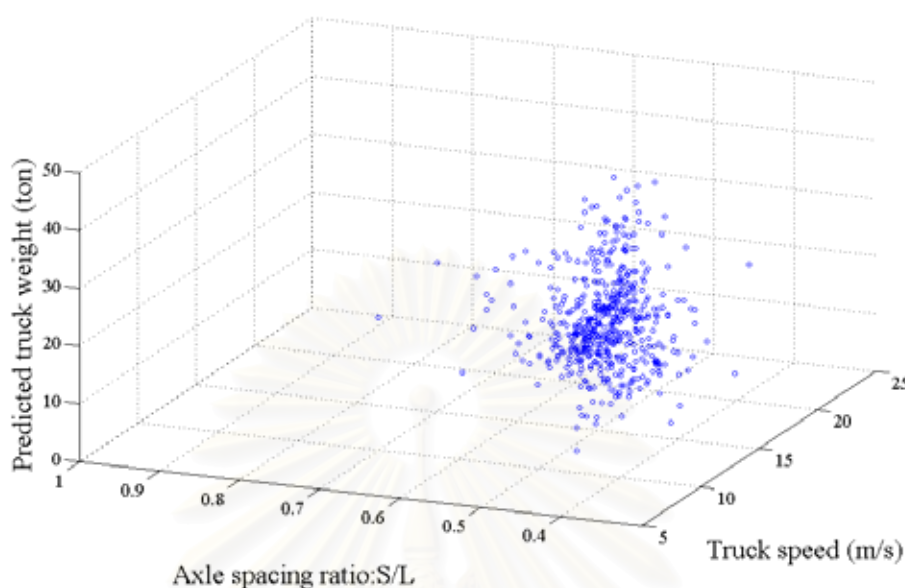
ถัดมาพิจารณาค่าน้ำหนักเพลาคำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าความเร็วจริงกับระยะห่างเพลจริงแสดงในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10ก น้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลจริง



รูปที่ 6.10ข น้ำหนักเพลาลังที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลจริง



รูปที่ 6.10ค น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วจริง และอัตราส่วนระยะห่างเพลาจริง

เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของรถบรรทุกที่คำนวณได้จากรูปที่ 6.10 จะพบว่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง 6 ถึง 41 ตัน ซึ่งจากการศึกษาการหาน้ำหนักรถจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามในบดที่ 5 พบว่าผลการหาน้ำหนักรถทั้งหมด ได้ค่าต่ำกว่าน้ำหนักจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -17% ถึง -3% ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่คำนวณได้จากการทดสอบการนำไปใช้งานจริงในบดนี้ จะได้น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่มีค่าไม่มากกว่าค่าน้ำหนักรถบรรทุกจริง จากข้อมูลดังกล่าวพบว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินกว่า 25 ตัน (ซึ่งเป็นค่าพิกัดน้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อตามราชกิจจานุเบกษา เล่ม 122 ตอนพิเศษ 150ง วันที่ 28 ธันวาคม 2548) มีจำนวน 172 คัน หรือประมาณ 30% ของกรณีศึกษาทั้งหมด

ในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกทั้ง 527 กรณี ใช้เวลาในการคำนวณโดยเฉลี่ย 49 วินาที มีเวลาในการคำนวณน้อยที่สุดคือ 6 วินาที และเวลาในการคำนวณที่มากที่สุดคือ 8 นาที 5 วินาที โดยที่จำนวนของกรณีที่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า 1 นาที มีจำนวน 115 กรณี หรือประมาณ 22% ของกรณีทั้งหมด และ กรณีที่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า 2 นาที มีจำนวนทั้งสิ้น 44 กรณี หรือคิดเป็น 8% ของกรณีทั้งหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการคำนวณหาน้ำหนักรถที่เสนอใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักรถจริงได้

6.3 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากข้อมูลการใช้งานจริงของสะพาน สามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาน้ำหนักที่ได้เสนอใช้ในงานวิจัยนี้มีความสัมฤทธิ์ผลเพียงพอที่จะนำมาหาน้ำหนักรถบรรทุกจริง โดยวิธีการนี้จะหาน้ำหนักได้ค่อนข้างดีเมื่อค่าโมเมนต์ดัดจริงที่แปลงจากสัญญาณความเครียดที่วัดได้มีความสมบูรณ์ และค่าสูงสุดของค่าโมเมนต์ดัดมีความชัดเจน โดยที่ค่าสูงสุดจะชัดเจนพอเมื่อน้ำหนักรถบรรทุกมากกว่า 10 ตันขึ้นไป และเมื่อตัดกรณี

ที่ค่าโมเมนต์ดัดไม่สมบูรณ์เพียงพอ วิธีกำหนดน้ำหนักที่ศึกษาจะมีความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณ 95.07% ซึ่งกรณีที่เหลืออีก 4.93% สามารถหาน้ำหนักได้โดยการลดเงื่อนไขขอบเขตล่างของน้ำหนักเพลาน้ำหนัก (กำหนดไว้ที่ 1 ตัน) และเงื่อนไขความเร็วเปรียบเทียบ (กำหนดไว้ที่ 6%) ออก ซึ่งน้ำหนักเพลาน้ำหนักทั้งหมดที่คำนวณได้ทั้งหมดมีค่าน้ำหนักน้อยกว่า 1 ตัน เมื่อพิจารณาความแตกต่างของความเร็วเปรียบเทียบพบว่า มีกรณีที่มีความแตกต่างมากกว่ากำหนดไว้จำนวน 44 กรณี หรือคิดเป็น 9% ของกรณีทั้งหมด แต่ถ้าปรับเงื่อนไขความเร็วเปรียบเทียบไว้ที่ 10% จะมีกรณีที่มีความแตกต่างของความเร็วเปรียบเทียบเกินพิกัดที่กำหนดไว้จำนวน 2 กรณี หรือคิดเป็น 0.4% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเงื่อนไขความเร็วเปรียบเทียบที่ 10% จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่าในทางปฏิบัติ

เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว และระยะห่างเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วที่แท้จริงพบว่า เมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้นความคลาดเคลื่อนของทั้งสองพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในบทที่ 4 และการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามในบทที่ 5 ในทางปฏิบัติถ้าต้องการหาน้ำหนักของรถบรรทุกให้มีความแม่นยำมากขึ้น อาจเลือกใช้เส้นทางที่รถบรรทุกแล่นด้วยความเร็วต่ำ หรือกำหนดให้รถบรรทุกแล่นด้วยความเร็วต่ำ ก็จะสามารถปรับปรุงให้ค่าสัญญาณความเครียดที่วัดได้มีค่าที่ดีขึ้น

และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับอัตราส่วนระยะห่างเพลาน้ำหนักพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะห่างเพลาน้ำหนักมีค่าน้อยลง ซึ่งผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบในภาคสนามเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อระยะห่างเพลาน้ำหนักน้อยลง กระบวนการหาน้ำหนักจะหาน้ำหนักได้ยากขึ้นเพราะสัญญาณความเครียดที่วัดได้ จะคล้ายกับสัญญาณความเครียดของรถเพลาน้ำหนักแล่นข้ามสะพาน ระบบการหาน้ำหนักจะไม่สามารถแยกได้ว่ารถบรรทุกที่แล่นมีสองเพลาน้ำหนัก ข้อเสนอแนะในการนำไปประยุกต์ใช้คือเลือกสะพานที่มีอัตราส่วนความยาวต่อระยะห่างเพลาน้ำหนักของรถบรรทุกทั่วไปที่เหมาะสมซึ่งอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 (หรือ axle spacing ratio : S/L อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.6)

ในส่วนของผลน้ำหนักที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับพิกัดน้ำหนักรถที่กำหนดไว้ตามกฎหมายหรือ 25 ตัน จะพบว่า มีจำนวนรถที่น้ำหนักเกินกำหนดประมาณ 30% ซึ่งเป็นจำนวนที่มากพอสมควรเมื่อคิดเป็นปริมาณรถที่ใช้งานทั้งหมด

โดยสรุปวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่เสนอใช้ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้เพียงพอที่จะนำมาใช้น้ำหนักรถบรรทุกจริง ทั้งจากการพิจารณาความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักรถบรรทุก และพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในส่วนของความแม่นยำในการคำนวณยังต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมให้ระบบสามารถคำนวณได้แม่นยำมากขึ้นทั้งในส่วนของความเร็ว และระยะห่างเพลาน้ำหนัก ในส่วนของการพัฒนาให้ระบบสามารถหาน้ำหนักรวมได้แม่นยำมากขึ้น ได้เสนอให้เน้นไปที่การพัฒนาความแม่นยำของการหาน้ำหนักเพลาน้ำหนักดังที่ได้เสนอในบทที่ 5

บทที่ 7

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถ ทั้งการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในบทที่ 4 การศึกษาจากข้อมูลผลการทดสอบภาคสนามในบทที่ 5 และการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบใช้งานจริงในบทที่ 6 สามารถสรุปผลโดยแยกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

7.1 ความเป็นไปได้ของการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถ

จากปัญหาของการใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาเพื่อที่จะใช้หาข้อมูลตำแหน่งรถบรรทุก ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการนำไปใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบ bridge weigh in motion หรือ B-WIM งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การหาน้ำหนักรถโดยไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถดังกล่าว แต่จะใช้การหาค่าน้อยที่สุดของออฟเจ็คทีฟฟังก์ชัน ทำการหาน้ำหนักรถหลายๆ ไปกับการหาตำแหน่งรถ (ซึ่งถูกเขียนเป็นฟังก์ชันของความเร็ว และระยะห่างเพลลา) เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการคำนวณในคอมพิวเตอร์ เนื่องจากออฟเจ็คทีฟฟังก์ชันดังกล่าวเป็นฟังก์ชันที่มีตัวแปรอยู่เพียง 4 ตัวแปรคือ ความเร็วของรถบรรทุก ระยะห่างเพลลา น้ำหนักเพลลาหน้า และน้ำหนักเพลลาหลังของรถบรรทุก ทำให้การเขียนสมการออฟเจ็คทีฟฟังก์ชันเพื่อที่จะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักมีความซับซ้อนน้อย ดังนั้นความซับซ้อนในการหาคำตอบจึงไม่มากเกินไป ประกอบกับรถบรรทุกใช้เวลาแล่นข้ามสะพานไม่มากนักจึงทำให้เมทริกซ์ที่เก็บข้อมูลมีขนาดไม่ใหญ่ จึงทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์คำนวณได้สะดวก โดยใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 5 ถึง 10 วินาที ในแต่ละรอบการคำนวณ เมื่อกำหนดให้โปรแกรมทำการคำนวณไม่เกิน 100 รอบ รวมเป็นเวลาในการคำนวณมากที่สุดประมาณ 15 นาที จากการศึกษาค่าความเป็นไปได้เบื้องต้นของวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกในแบบจำลองคอมพิวเตอร์พบว่า วิธีการนี้สามารถหาน้ำหนักรถได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถหาน้ำหนักรถได้ 98% ของกรณีศึกษาทั้งหมด โดยที่กรณีที่เหลือสามารถหาน้ำหนักได้โดยพิจารณาปรับเงื่อนไข และขอบเขตของตัวแปรต่างๆ เป็นกรณีๆ ไป จากผลการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์วิธีการหาน้ำหนักที่เสนอใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด 5 วินาที และใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุด 25 นาที โดยเวลาคำนวณเฉลี่ยอยู่ที่ 39 วินาที โดยที่มีจำนวนกรณีที่ใช้เวลาคำนวณมากกว่า 5 นาทีทั้งสิ้น 13 กรณี หรือคิดเป็น 1.13% ของกรณีศึกษาทั้งหมด ดังนั้นจากหลักการ และผลการทดสอบในแบบจำลองคอมพิวเตอร์สามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถที่เสนอมีความเป็นไปได้ทางทฤษฎีเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก

7.2 ประสิทธิภาพและผลของปัจจัยต่างๆ

7.2.1 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อความแม่นยำในการหาน้ำหนักรถบรรทุก

ผลของพารามิเตอร์ที่ศึกษาในการหาน้ำหนักได้แก่ผลของ ความเร็ว (v) ระยะห่างเพลลา (S) น้ำหนักเพลลาหน้า (N_f) น้ำหนักเพลลาหลัง (N_r) และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก (N_t) จากการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์พบว่า ผลของความเร็วของรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความคลาดเคลื่อนของทุกตัวแปร มีค่ามากขึ้น โดยที่ความเร็วรถบรรทุกที่มากกว่า 15 เมตร/วินาที (54 กม./ชม.) จะทำให้ความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ เพิ่มขึ้น

ในส่วนของอัตราส่วนระยะห่างเพลลาที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์มากขึ้นได้แก่ อัตราส่วนระยะห่างเพลลาเท่ากับ 0.2 โดยพารามิเตอร์ที่ไวต่ออัตราส่วนระยะห่างเพลลาคือ ระยะห่างเพลลา, น้ำหนักเพลลาหน้า และน้ำหนักเพลลาหลัง โดยที่อัตราส่วนระยะห่างเพลลา 0.2 นั้นยากต่อการระบุตำแหน่งของระบบการหาน้ำหนัก ทำให้มีความคลาดเคลื่อนในระยะห่างเพลลา แล้วจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาตามมา แต่เนื่องจากทิศทางของความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหน้า กับน้ำหนักเพลลาหลัง มีทิศทางที่สวนทางกัน ทำให้เมื่อรวมเป็นน้ำหนักรวมของรถบรรทุกความคลาดเคลื่อนในพิกัดอัตราส่วนระยะห่างเพลลา 0.2 ไม่เด่นชัดนักเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนระยะห่างเพลลาอื่นๆ โดยสรุปแล้วอัตราส่วนระยะห่างเพลลาต่อความยาวสะพานที่เหมาะสมในการหาน้ำหนักด้วยวิธีการที่เสนอนั้นอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.6

นอกจากนี้ถ้าอัตราส่วนน้ำหนักเพลลาหน้าต่อน้ำหนักเพลลาหลังมีค่าน้อยแล้ว ค่าโมเมนต์ดัดของเพลลาหน้าจะถูกค่าโมเมนต์ดัดของเพลลาหลังบดบัง ทำให้ระบบการหาน้ำหนักไม่สามารถหาน้ำหนักเพลลาหน้าได้แม่นยำ ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราส่วนน้ำหนักเพลลาหน้าต่อน้ำหนักเพลลาหลังมีค่ามาก ก็จะทำให้ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาหลังมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยรวมแล้วน้ำหนักรถบรรทุกยิ่งมากจะยิ่งทำให้ระบบสามารถหาน้ำหนักรถบรรทุกได้แม่นยำขึ้น เนื่องจากผลทางแรงทางพลศาสตร์จะมีค่าน้อยลง ซึ่งผลดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์แบบพื้นผิวสะพานมีความขรุขระ

เมื่อพิจารณาผลของพารามิเตอร์ต่อการหาน้ำหนักจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จะไม่สามารถพบความสัมพันธ์ได้อย่างชัดเจนเหมือนในการศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการแปรผันพารามิเตอร์ในการทดสอบน้อยและแคบเกินไปด้วยข้อจำกัดทางกายภาพ (ระยะห่างเพลลา และ น้ำหนักเพลลา) และเหตุผลด้านความปลอดภัย (ความเร็วของรถบรรทุก) ทำให้ไม่สามารถพิจารณาเปรียบเทียบในตัวแปรดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบใช้งานจริงในบทที่ 6 จะได้ผลของความไว และระยะห่างเพลลาที่สอดคล้องกับผลการทดสอบจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์คือ ความเร็วของรถบรรทุกที่มาก หรืออัตราส่วนระยะห่างเพลลาที่น้อยจะส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ มาก

7.2.2 ผลของความขรุขระต่อความแม่นยำในการหาน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาผลของความขรุขระจากการศึกษาในคอมพิวเตอร์จะพบว่า ความขรุขระที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของตัวแปรต่างๆ มากขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญคือน้ำหนักรวมของรถบรรทุก จะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นจาก 14% ในกรณีพื้นผิวสะพานเรียบเป็น 40% ในกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ โดยกรณีที่ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมไวต่อผลกระทบจากความขรุขระคือกรณีที่รถบรรทุกมีน้ำหนักรวมน้อยกว่า 20 ตัน เมื่อตัดกรณีที่น้ำหนักรวมของรถบรรทุกน้อยกว่า 20 ตันออก ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจะอยู่ในช่วง 23%

จากการศึกษาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าผลของความขรุขระที่สร้างขึ้น จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ต่างๆ มาก โดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก แต่เมื่อพิจารณาการศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามในบทที่ 5 จะพบว่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมากที่สุดอยู่ในช่วง -15% ถึง 1% ซึ่งมีค่าไม่มากเท่ากับการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยอาจมีเหตุผลจากจำนวนกรณีของการทดลองในคอมพิวเตอร์มีมากกว่ากรณีการทดลองหาน้ำหนักจริงในภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามกรณีที่ศึกษาในการทดสอบภาคสนามก็เป็นกรณีที่รถบรรทุกมีค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพต่างๆ

(ความเร็ว ระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก) เหมือนกับกรณีที่รถบรรทุกใช้งานปกติทั่วไป ดังนั้นผลการหาน้ำหนักดังกล่าวจึงสะท้อนต่อความเป็นจริงมากกว่ากรณีการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพานในการทดสอบจริงไม่ส่งผลต่อความแม่นยำในการหาน้ำหนักมากนัก

7.2.3 ความสัมฤทธิ์ผล ความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิผลในเชิงความสำเร็จ หรือความสัมฤทธิ์ผลของวิธีการหาน้ำหนักจากการศึกษาในคอมพิวเตอร์ พบว่าวิธีการหาน้ำหนักที่เสนอสามารถหาน้ำหนักในได้มากกว่า 98% ของกรณีศึกษา 1,150 กรณี ทั้งกรณีที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ และกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ โดยมีความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง $\pm 14\%$ ในกรณีที่พื้นผิวสะพานราบเรียบ และ ความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 40\%$ ในกรณีที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระ เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามพบว่าวิธีการหาน้ำหนักที่เสนอสามารถหาน้ำหนักได้ทั้งหมด 47 กรณี หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผล 100% โดยมีความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง $\pm 15\%$ สำหรับประสิทธิผลของการหาน้ำหนักของวิธีการที่เสนอในการศึกษาการหาน้ำหนักจากข้อมูลใช้งานจริง ซึ่งพิจารณาเฉพาะกรณีที่รถบรรทุกทั่วไปแล่นข้ามสะพาน โดยที่สัญญาณโมเมนต์ตัดมีความสมบูรณ์ พบว่าวิธีการที่เสนอมีประสิทธิผลในการหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ประมาณ 95% จากกรณีที่พิจารณาทั้งสิ้น 527 กรณี โดยทั้งกรณีศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และการศึกษาจากข้อมูลใช้งานจริง สามารถหาน้ำหนักรถบรรทุกในกรณีที่ไม่สามารถหาน้ำหนักในตอนแรกได้ปรับเงื่อนไข และขอบเขตของตัวแปรต่างๆ เป็นกรณีไป ทำให้การทดลองหาน้ำหนักรถบรรทุกทั้ง 2,300 กรณีในการศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ 47 กรณีในการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม และ 527 กรณีในการศึกษาจากข้อมูลการประยุกต์ใช้งานจริง สามารถหาคำตอบได้ทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่งรถที่เสนอมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักสูง

ในส่วนของความแม่นยำในการหาน้ำหนักกรณีพิจารณาจากการหาน้ำหนักจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามพบว่าความแม่นยำในการหาน้ำหนักรถอยู่ในช่วงปานกลางคือ $\pm 15\%$ โดยความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมจากวิธีแบบไม่ใช้ข้อมูลตำแหน่งรถ มีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมจากการหาน้ำหนักโดยวิธีใช้ข้อมูลตำแหน่งรถโดยเฉลี่ย 3% ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลมาจากน้ำหนักเพลลาหน้าของรถบรรทุกที่หาค่าได้มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักเพลลาหน้าสถิตค่อนข้างมาก ทำให้น้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้ค่าน้อยกว่าน้ำหนักรวมที่แท้จริง การพัฒนาเพิ่มเติมจึงควรมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาให้ระบบสามารถหาน้ำหนักเพลลาหน้าของรถบรรทุกได้แม่นยำมากขึ้น

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงเวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกของวิธีการคำนวณหาน้ำหนักที่เสนอ ซึ่งในการศึกษาจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ใช้เวลาในการคำนวณส่วนมาก (หรือประมาณ 99% ของกรณีทั้งหมด) อยู่ในช่วง 5 วินาที ถึง 5 นาที โดยเวลาคำนวณเฉลี่ยอยู่ที่ 39 วินาที ในการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามใช้เวลาในการคำนวณอยู่ในช่วง 5 ถึง 45 วินาที เวลาคำนวณเฉลี่ยอยู่ที่ 17 วินาที ในส่วนของการศึกษาจากข้อมูลการประยุกต์ใช้งานจริงใช้เวลาในการคำนวณอยู่ในช่วง 6 วินาที ถึง 8 นาที ซึ่งกรณีที่ใช้เวลาในการคำนวณเกินกว่า 3 นาที จะมีเพียง 18 กรณีจากทั้งหมด 527 กรณีหรือคิดเป็น 3% เท่านั้น และเวลาคำนวณเฉลี่ยอยู่ที่ 49 วินาที จะเห็นได้ชัดเจนว่าวิธีการดังกล่าวใช้เวลาในการหาน้ำหนักไม่นาน ประกอบกับความสัมฤทธิ์ผลในการคำนวณหาน้ำหนัก

รถบรรทุกที่สูงจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาน้ำหนักรถที่เสนอมีความเป็นไปได้ และเหมาะสมเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักจริง หรือพัฒนาให้มีความแม่นยำในการหาน้ำหนักได้ดียิ่งขึ้นต่อไป

7.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

7.3.1 ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้จริง

จากผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น การประยุกต์ใช้งานจริงจึงควรเลือกสะพานที่มีอัตราส่วนความยาวสะพานต่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกทั่วไปที่เหมาะสมคือประมาณ 1.5 ถึง 2.5 หรือ ค่าอัตราส่วนระยะห่างเพลลา (axle spacing ratio : S/L) ประมาณ 0.4 ถึง 0.6 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดทำให้โมเมนต์ดัดมีความชัดเจนของแรงในเพลลาหน้า และหลัง โดยไม่ทำให้ผลของแรงในเพลลาหลังที่มากกว่าไปทำให้ผลของแรงในเพลลาหน้าไม่ชัดเจน

ความเร็วของรถบรรทุกมีผลโดยตรงในการทำให้ตัวแปรต่างๆ ที่หาได้มีความแม่นยำลดลง เนื่องจากผลของโมเมนต์ดัดที่ปั่นป่วนมากขึ้นเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรเลือกสะพานที่อยู่ใกล้กับเขตจำกัดความเร็วรถบรรทุก ทำให้รถบรรทุกแล่นด้วยความเร็วไม่มากนัก โดยความเร็วที่เหมาะสมคือไม่เกิน 15 เมตร/วินาที หรือ 54 กิโลเมตร/ชั่วโมง

ความขรุขระของพื้นผิวสะพานมีผลทำให้โมเมนต์ดัดที่วัดได้มีความแปรปรวนมากขึ้น ซึ่งทำให้ผลการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้น หรือไม่สามารถหาน้ำหนักรถได้ในกรณีที่โมเมนต์ดัดมีความแปรปรวนมาก ดังนั้นในการหาน้ำหนักรถในภาคสนามจึงควรเลือกสะพานที่พื้นผิวสะพานมีความขรุขระน้อยที่สุด ถ้าจำเป็นที่จะต้องใช้สะพานที่มีความขรุขระในการหาน้ำหนักรถ ควรซ่อมแซมพื้นผิวสะพานให้มีความขรุขระน้อยลงโดยอาจใช้การทำผิวจราจรใหม่ด้วยแอสฟัลท์

7.3.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

เนื่องจากระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่เสนอมีความสัมฤทธิ์ผลที่สูง และใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก การพัฒนาเพิ่มเติมจึงควรมุ่งเน้นไปที่ความแม่นยำในการหาน้ำหนักเพลลาหน้าให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยอาจปรับปรุงจากเดิมระบบใช้การจำลองรถบรรทุกแบบสองเพลลา ให้เป็น 3 เพลลาแทน โดยที่เพลลาหลังมีค่าระยะห่างเพลลาคงที่ และรถบรรทุกถ่านน้ำหนักไปที่เพลลาที่สองกับเพลลาที่สามเท่ากัน ซึ่งการจำลองนี้อาจทำให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดของสะพานมีความใกล้เคียงกับโมเมนต์ดัดที่วัดได้มากขึ้น

นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้ในการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม มีความปั่นป่วนมากกว่าโมเมนต์ดัดที่จำลองขึ้นจากการศึกษาในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจจะเกิดจากการโยนตัว หรือการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของรถบรรทุกก่อนเข้าสะพาน การศึกษาเพิ่มเติมจึงอาจเพิ่มผลของการเคลื่อนที่ดังกล่าวเข้าไปในแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถจำลองโมเมนต์ดัดได้มีความใกล้เคียงกับโมเมนต์ดัดที่วัดได้มากยิ่งขึ้น

วิธีการในการพัฒนาให้ระบบสามารถหาน้ำหนักรถได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น อาจพัฒนาโดยการใช้ฟังก์ชันเส้นอิทธิพลที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้น (หรือ dynamic influence line) ซึ่งอาจให้ค่าคำตอบของน้ำหนักเพลลาได้ดีกว่าการใช้ฟังก์ชันเส้นอิทธิพลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็ว (static influence line) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

รายการอ้างอิง

- Bellman, R. **Introduction to the Mathematical Theory of Control Processes**. New York : Academic Press, 1967.
- Chan, T. H. T., Law, S. S., Yung, T. H. and Yuan, X. R. An Interpretive Method for Moving Force Identification. **Journal of Sound and Vibration**. 1999 : 503-524.
- Chan, T. H. T., Law S. S. and Yung, T. H. Moving Force Identification Using an Existing Prestressed Concrete Bridge. **Engineering Structures**. 2000 : 1261-1270.
- Chopra, A. K. **Dynamics of Structures**. New Jersey : Prentice-Hall, 1995.
- Daniel, J. I. **Engineering Vibration**. New Jersey : Prentice-Hall, 1996.
- European Commission. WEIGING-IN-MOTION OF AXLES AND VEHICLES FOR EUROPE (WAVE) **Report of Work Package 1.2 Bridge WIM systems (B-WIM)**. University College Dublin, 2001.
- Fletcher, R. **Practical Methods of Optimization, Vol. 1, Unconstrained Optimization**. New York : John Wiley & Sons, 1980.
- Gary, C. H., and Wong, K. **Structural Dynamics for Structural Engineers**. New York : John Wiley & Sons, 1999.
- Hanselman, D., Littlefield, B. **Mastering MATLAB : a comprehensive tutorial and reference**. New Jersey : Prentice-Hall, 1996.
- Jacobs, O. L. R. **An introduction to dynamic programming : the theory of multistage decision processes**. London : Chapman and Hall, 1970.
- Jiang, R. J., Au, F. T. K. and Cheung, Y. K. Identification of Vehicles Moving on Continuous Bridges with Rough Surface. **Journal of Sound and Vibration**. Available Online. 2003.
- Jiang, R. J., Au, F. T. K. and Cheung, Y. K. Identification of Masses Moving on Multi-Span Beams Based on A Genetic Algorithm. **Computers & Structures**. 2003: 2137-2148.
- Karn, J. A., Bjorn, W. **Computer-Controlled Systems Theory and Design**. New Jersey : Prentice-Hall, 1997.
- Koniditsiotis, C. **Australian Weigh-In-Motion Technology**. Road & Transport Research, 1995 : 114-120.
- Laman, J. A., and Nowak, A. S. Fatigue-Load Models for Girder Bridges. **Journal of Structural Engineering**. 1996 : 726-733.
- Law, S. S., Chan, T. H. T., and Zeng, Q. H. Moving Force Identification a Frequency and Time Domains Analysis. **Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control**. Sep.1999: 394-401.
- Law, S. S., Chan, T. H. T., and Zeng, Q. H. Regularization in Moving Force Identification. **Journal of Engineering Mechanics**. 2001: 136-148.

- Law, S. S., and Fang, Y. L. Moving Force Identification : Optimal State Estimation Approach. *Journal of Sound and Vibration*. 2001: 233-254.
- Leonard, M. *Principles and Techniques of Vibrations*. New Jersey : Prentice-Hall, 1997.
- Leming, S. K., and Stalford, H. L. **Bridge weigh-in-motion system development using static truck /bridge models**. Proceeding of the American Control Conference. Anchorage, Alaska, 2002 : 3672-3677.
- Leming, S. K., and Stalford, H. L. **Bridge Weighin-Motion System Development Using Superposition of Dynamic Truck/ Static Bridge Interaction**. Proceeding of the American Control Conference. Denver, Colorado, 2003 : 815-820.
- Moses, F. Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges. *Transportation Engineering Journal*. ASCE, 1979: 233-249.
- Pierre, D. A. *Optimization theory with applications*. New York : John Wiley & Sons, 1969.
- Sharma, S. C., Stamatinos, G. and Wyatt, J. Evaluation of IRD-WIM-5000 a Canadian Weigh-In-Motion System. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1990: 514-520.
- Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method. *American Society for Testing and Materials*. ASTM E1318-94, 1994: 734-745 .
- Thater, G., Chang P., Schelling, D. R. and Fu, C. C. Estimation of Bridge Static Response and Vehicle Weights by Frequency Response Analysis. *Canada Journal of Civil Engineering*. 1998: 631-639.
- Trujillo, D. M. Application of Dynamic Programming to the General Inverse Problem. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. 1978: 613-624.
- Wu, J. C., Yang, J. N. and Schmitendouf, W. Reduced-order H-Infinity and LQR Control for Wind-Excited Tall Buildings. *Journal of Engineering Structures*. 1998a: 222-236.
- Yu, L. and Chan, T. H. T. Moving Force Identification from Bending Moment Response of Bridge. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*. 2002: 151-170.
- Zhu, X. Q. and Law, S. S. Moving Forces Identification on a Multi-Span Continuous Bridge. *Journal of Sound and Vibration*. 1999: 377-396.
- Zhu, X. Q. and Law, S. S. Identification of Vehicle Axle Loads From Bridge Dynamic Responses. *Journal of Sound and Vibration*. 2000: 705-724.
- Zhu, X. Q., and Law, S. S. Moving Loads Identification Through Regularization. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE, 2002: 989-1000.
- Zhu, X. Q. and Law, S. S. Identification of Moving Interaction Forces with Incomplete Velocity Information. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2003a: 1349-1366.
- Zhu, X. Q. and Law, S. S. Dynamic axle and wheel loads identification: laboratory studies. *Journal of Sound and Vibration*. 2003b: 855-879.

- ธวัช อัครวิทยาภูมิ. การเพิ่มความถูกต้องของการหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยเทคนิคการ
คำนวณซ้ำ วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- พลกฤษณ์ พนาปวุฒิกุล. การหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- พัทรพงษ์ อาสนจินดา. การหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2546.
- ภาณุ ฟุ้งสุข. การหาน้ำหนักถบรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม วิทยานิพนธ์
ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2547.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปาลพิพัฒน์ แสงชูวงศ์ เกิดวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนพิมลวิทย์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดราชบพิธ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย