

การเปรียบเทียบวิธีการหาหน้าหน้ากระดาษทุกจากผลตอบสนองของสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF TRUCK WEIGHT IDENTIFICATIONS METHODS FROM BRIDGE RESPONSE  
BY FIELD TESTING

Mr. Pongsatron Aramwad



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 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบวิธีการหาน้ำหนักกรดบรจาก

ผลตอบสนองของสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม

โดย

นายพงศธร อร่ามวัต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้ับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนงจันทร์ไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา)

พงศธร อร่ามวัต : การเปรียบเทียบวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลตอบสนองของสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม (COMPARISON OF TRUCK WEIGHT IDENTIFICATIONS METHODS FROM BRIDGE RESPONSE BY FIELD TESTING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว, 82 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน เพื่อนำข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่าไปใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมและการควบคุมน้ำหนักบรรทุก ในอดีตมีนักวิจัยนำเสนอการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกจากผลตอบสนองของสะพานด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจากผลการศึกษาในอดีตได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักของอัลกอริทึมต่างๆ แต่ยังคงขาดการศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างแต่ละวิธี ในศึกษานี้จะเปรียบเทียบอัลกอริทึมการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลแบบต่างๆ 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง โดยการเปรียบเทียบอาศัยผลตอบสนองของสะพานด้วยการทดสอบสะพานจริงในภาคสนาม

จากผลการทดสอบในภาคสนามทั้งหมดจำนวน 18 การทดสอบ พบว่าการคำนวณหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกของทั้ง 3 วิธีให้ความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ โดยพบว่าทุกวิธีมีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นหากรถบรรทุกแล่นข้ามสะพานด้วยความเร็วที่มากขึ้น โดยผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกพบความคลาดเคลื่อนในเพลาลหน้า เพลาลหลัง และน้ำหนักบรรทุกรวมของแต่ละวิธีมีค่าเท่ากับ  $\pm 71\%$ ,  $\pm 10\%$  และ  $\pm 9\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต  $\pm 85\%$ ,  $\pm 12\%$  และ  $\pm 10\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต  $\pm 57\%$ ,  $\pm 6\%$  และ  $\pm 10\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง แม้ทั้ง 3 วิธีให้ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกรวมที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกรวมในทุกกรณีที่ทดสอบมีค่าไม่เกิน  $\pm 10\%$  แต่จากผลการศึกษาเปรียบเทียบพบค่าความคลาดเคลื่อนในเพลาลหน้าและเพลาลหลังนั้นวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงให้แนวโน้มความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าอีกสองวิธี

จากผลการศึกษาที่ได้รับในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกทั้ง 3 วิธี ซึ่งจากการศึกษาเปรียบเทียบแม้ไม่พบความแตกต่างในประสิทธิภาพที่มีนัยสำคัญ แต่หากพิจารณาถึงความสะดวกในการประยุกต์ใช้พบว่าวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงจะมีข้อดีเหนือกว่าวิธีการอื่น เพราะสามารถสะท้อนพฤติกรรมแท้จริงของสะพาน เช่น สภาพของฐานรองรับสะพานได้ถูกต้องกว่าวิธีการอื่นและมีแนวโน้มที่จะให้ค่าน้ำหนักบรรทุกในแต่ละเพลาลที่ถูกต้องกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5470282921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: INFLUENCE LINE / BRIDGE / TRUCK WEIGHT / STRAIN SIGNAL

PONGSATRON ARAMWAD: COMPARISON OF TRUCK WEIGHT IDENTIFICATIONS METHODS FROM BRIDGE RESPONSE BY FIELD TESTING. ADVISOR: ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, Ph.D., 82 pp.

This thesis studies on the weight identification of a truck while it is moving on bridge by field testing. The strain signals at bridge mid-span are used as input data. Although many identification methods have been proposed, their comparisons based on actual bridge data are not clearly addressed especially their accuracy. This study compares identification methods using 3 different influence lines including the theoretical static influence line, the theoretical dynamic influence line and the influence line from direct measurements.

From 18 cases of field tests on an actual bridge, it is found that the 3 methods provide sufficient accuracy on truck weight identification. The identification errors become larger as the truck's speeds increase. The errors of front axle, rear axle and total truck weights are found to be, respectively, within  $\pm 71\%$ ,  $\pm 10\%$  and  $\pm 9\%$  for the theoretical static influence line,  $\pm 85\%$ ,  $\pm 12\%$  and  $\pm 10\%$  for the theoretical dynamic influence line,  $\pm 57\%$ ,  $\pm 6\%$  and  $\pm 10\%$  for the influence line from direct measurements. Although the errors of total truck weight identifications are all within  $\pm 10\%$  without significant differences. The errors of front and rear axles are smaller using the influence line from direct measurements.

These obtained results indicate the effectiveness of the three methods for truck weight identification. Although the significant differences of identification effectiveness are not clearly noticed. The application of the weight identification using the influence line from direct measurement seems to be more attractive since it can take into account real behavior of bridges such as support conditions. In addition, the method tends to provide higher accuracy of axle weight prediction.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ รวมถึงการให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการทำวิจัยและการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดียิ่งมาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งให้คำปรึกษาและคอยดูแลในทุกๆ เรื่องตลอดช่วงระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ และศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ดีไชย ที่ให้ความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้ง ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา ที่ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งคณาจารย์ทุกท่านได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างยิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอุปถัมภ์ อบรมสั่งสอน ตลอดจนคอยให้กำลังใจ จนทำให้ผู้แต่งสามารถผ่านพ้นอุปสรรคตลอดระยะเวลาการเรียนการศึกษา

ขอขอบคุณคณะทำงานของหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน รวมทั้งคุณวรรณภา กรสวัสดิ์ อธิการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือประสานงานด้านระเบียบการและเอกสารต่าง ๆ เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ดร.ธีระชัย ตีสมนสุข ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างยิ่งตลอดงานวิจัยนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงตามเป้าหมายด้วยดี รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกท่าน

ท้ายที่สุดนี้ ผู้แต่งมีความตั้งใจอย่างยิ่งในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้หวังว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่มีความสนใจศึกษา และเป็นข้อมูลการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ เพื่อประโยชน์สืบต่อไป

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	10
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	10
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย .....	11
1.6 การดำเนินงานวิจัย .....	11
บทที่ 2 .....	12
2.1 เส้นอิทธิพลของผลตอบสนองสะพาน.....	12
2.1.1 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต (Theoretical static influence line).....	13
2.1.2 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต (Theoretical dynamic influence line).....	14
2.1.3 เส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง (Influence line from direct measurements).....	15
2.2 อัลกอริทึมคำนวณหาหน้าหนักรถบรรทุก .....	16
2.2.1 การประมาณค่าผลตอบสนองจากเส้นอิทธิพล .....	16
2.2.2 ค่าผลตอบสนองจริงของสะพาน .....	17
2.2.3 การหาหน้าหนักรถบรรทุก .....	18
2.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization).....	20
2.3.1 หลักการทั่วไป .....	20

2.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ด้วยวิธีนิวตัน (Newton's method).....	20
2.3.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ด้วยวิธีกึ่งนิวตัน (quasi Newton's method).....	21
2.3.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ด้วยวิธี BFGS.....	23
บทที่ 3 .....	24
3.1 ข้อมูลทั่วไปของสะพานที่ทำการทดสอบ .....	24
3.2 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	31
3.3.1 มาตรวัดความเครียด (Strain gauge).....	32
3.3.2 ระบบบันทึกข้อมูล.....	33
3.3.3 เครื่องตรวจจับเพลลา (Axle Detector).....	34
3.3.4 ตัววัดสัญญาณความเร่ง (Acceleration Transducer) .....	35
3.3.5 กล้องวีดีโอ .....	36
3.4 การทดสอบภาคสนาม .....	36
บทที่ 4 .....	39
4.1 การหาเส้นอิทธิพลของผลตอบสนองของสะพาน .....	40
4.1.1 การหาเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต.....	41
4.1.2 การหาเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต .....	41
4.1.3 การหาเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง.....	42
4.2 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุกต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก .....	43
4.3 อิทธิพลของช่องจราจรต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก .....	45
4.4 ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดของสะพาน .....	47
4.5 ผลการหาน้ำหนักรถบรรทุก.....	52



บทที่ 5 .....	59
5.1 บทสรุป.....	59
5.1.1 ผลของการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพล.....	59
5.1.2 เปรียบเทียบการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 วิธี .....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	60
รายการอ้างอิง .....	62
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	82



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1รูปแบบการทดสอบสะพาน.....	37
ตารางที่ 4.1ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียด, $\beta$ .....	50
ตารางที่ 4.2สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุก (กรณีความเร็วช้ามาก).....	54
ตารางที่ 4.3สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุก (กรณีความเร็วช้า).....	55
ตารางที่ 4.4สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุก(กรณีความเร็วปานกลาง).....	55







ตารางที่ ผ. 25 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทัดด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง  
กรณีช่องจราจรขวา (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจราจรขวามาเป็นตัวแทนในการหาเส้น  
อิทธิพล) .....80

ตารางที่ ผ. 26 สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทัดด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัด  
โดยตรง .....81



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองสะพานและรถบรรทุก .....	12
รูปที่ 2.2 เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่จุดวัดตำแหน่ง .....	14
รูปที่ 2.3 แบบจำลองสะพานและรถบรรทุกแบบ 3 เพลา.....	17
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกทุก.....	19
รูปที่ 3.1 ภาพจากดาวเทียมแสดงตำแหน่งสะพานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ.....	25
รูปที่ 3.2 มุมมองต่างๆ บริเวณสะพานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ .....	25
รูปที่ 3.3 มุมมองภาพตัดโครงสร้างส่วนบนของสะพานที่ทำการทดสอบ .....	26
รูปที่ 3.4 ลักษณะของโครงสร้างส่วนล่างของสะพานที่ทำการทดสอบ.....	26
รูปที่ 3.5 ลักษณะของโครงสร้างส่วนล่างของสะพานที่ทำการทดสอบ(ต่อ).....	27
รูปที่ 3.6 การเสริมเหล็กในคานสะพานตัวกลางช่วงของสะพานที่ทำการทดสอบ .....	28
รูปที่ 3.7 การเสริมเหล็กในคานสะพานตัวริมช่วงของสะพานที่ทำการทดสอบ .....	29
รูปที่ 4.1 สัญญาณของผลตอบสนองสะพานในการทดสอบกรณีที่ 1 .....	39
รูปที่ 4.2 การเฉลี่ยค่าความเครียดของในการทดสอบกรณีที่ 1.....	40
รูปที่ 4.3 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต.....	41
รูปที่ 4.4 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต .....	42
รูปที่ 4.5 เส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงจากผลการทดสอบกรณีที่ 1.....	42
รูปที่ 4.6 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีที่ 1, 7 และ 15 .....	44
รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีที่ 4, 10 และ 18 .....	44
รูปที่ 4.8 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วช้ามาก .....	45
รูปที่ 4.9 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วช้า .....	46
รูปที่ 4.10 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วปกติ .....	46
รูปที่ 4.11 หน้าตัดคานและพื้นของสะพานที่ทำการทดสอบ .....	47

รูปที่ 4.12 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่งกึ่งของสะพานกรณีที่ 1 .....	50
รูปที่ 4.13 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่งกึ่งของสะพานกรณีที่ 10 .....	51
รูปที่ 4.14 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่งกึ่งของสะพานกรณีที่ 13 .....	51
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดจากผลการตรวจวัดจริงกับค่าประมาณจาก แบบจำลอง(กรณีความเร็วช้ามาก).....	52
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดจากผลการตรวจวัดจริงกับค่าประมาณจาก แบบจำลอง(กรณีความเร็วช้า) .....	53
รูปที่ 4.17 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดจากผลการตรวจวัดจริงกับค่าประมาณจาก แบบจำลอง(กรณีความเร็วปานกลาง) .....	53
รูปที่ 4.18 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วของ รถบรรทุก .....	56
รูปที่ 4.19 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วของรถบรรทุก	57
รูปที่ 4.20 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกรวมที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วของ รถบรรทุก .....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย

น้ำหนักของยานพาหนะที่สัญจรเป็นข้อมูลที่สำคัญมาก เนื่องจากมีผลกระทบต่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานของสะพานและถนน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากในการออกแบบโครงสร้างสะพานและถนนตลอดจนการบำรุงรักษาในระยะเวลาการใช้งาน รวมทั้งการกำหนดนโยบายด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับพิกัดน้ำหนักรถบรรทุกด้วย

เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้ จึงได้มีการพัฒนาระบบ weigh-in-motion (WIM) ขึ้นมา โดยระบบ weigh-in-motion หรือ WIM คือระบบอุปกรณ์ที่ใช้หาข้อมูลต่างๆ เช่น จำนวนเพลาระยะห่างระหว่างเพล่า และน้ำหนักเพล่าของยานพาหนะขณะกำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือสะพานซึ่งระบบดังกล่าวนี้มีข้อได้เปรียบกว่าระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกของด่านซึ่งตรงที่ไม่ต้องหยุดหรือชะลอรถบรรทุกขณะที่ทำการหาน้ำหนัก ไม่ทำให้เกิดการรบกวนการจราจร อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบต่ำกว่าด่านซึ่งแบบปกติมาก

ระบบ weigh-in-motion ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบ Bridge weigh-in-motion หรือ B-WIM โดยเป็นระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ข้อมูลความเครียดที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ผิวท้องสะพาน และข้อมูลของตำแหน่งรถที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพล่าบริเวณราวสะพาน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวที่ได้มาทำการหาน้ำหนักรถบรรทุก ซึ่งวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกนั้นจะมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมคือวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากเส้นอิทธิพล เนื่องจากสามารถใช้ผลตอบแทนของสะพานเพียงหน้าตัดเดียวในการหาน้ำหนักรถบรรทุกซึ่งง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีอื่น อีกทั้งสามารถคำนวณหาน้ำหนักได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบอัลกอริทึมการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง โดยใช้ข้อมูลผลการตรวจวัดของสะพานชุดเดียวกัน ซึ่งจากการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการคำนวณหาน้ำหนัก ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของแต่ละวิธี ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้อัลกอริทึมในการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้อย่างเหมาะสมต่อไป



## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Moses และคณะ (1979) ได้สรุปว่าในการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง จะมีผลกระทบทางพลศาสตร์เป็นปัญหาหลัก เนื่องมาจากความขรุขระของผิวทางและการกระแทกที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักของตัวรถเองนั้น เป็นผลให้แรงทางพลศาสตร์มีค่าเป็น 30-40% ของค่าทางสถิตซึ่งทำให้เกิดการทำนายที่ผิดพลาดได้[1]

Ghosn และ Xu (1989) ได้พิจารณาผลของแรงทางพลศาสตร์เพิ่มเติมอันเนื่องมาจากผลกระทบทางพลศาสตร์ที่ปัญหาหลักในการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง โดยการเพิ่มพจน์ของโคไซน์และไซน์เข้าไปในสมการการเคลื่อนที่ และทำการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ (fourier analysis) ซึ่งวิธีนี้สามารถหาแรงเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ได้ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายถึงมากถึง 50%[2]

Ansari (1990) ได้ทำการกรองผลของพลศาสตร์ออกจากข้อมูลที่เก็บ โดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบดิจิทัล (digital filter) และใช้วิธีการเซบิ์เซบโพลีโนเมียล (chebyshev polynomial) มาทำการจำลองเส้นอิน ฟลูเอนซ์ไลน์ (Influence line) เนื่องจากผลทางสถิตเท่านั้น ซึ่งจากเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์นี้จะทำให้สามารถหาค่าน้ำหนักเพลาแต่ละเพลลาได้ และนำน้ำหนักเพลาแต่ละเพลลามา รวมกันจะได้น้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ด้วยอุปสรรคดังกล่าวกับการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง Moses (1979) และคณะได้เพิ่มการวัดความเค้นของสะพานเพื่อที่จะบรรลุผลในการคำนวณน้ำหนักของรถ Moses และคณะได้อธิบายว่าวิธีการวัดน้ำหนักจากคาน (girder) ของสะพานคือการวัดน้ำหนักรถจากผิวทาง แรงพลศาสตร์ที่ผิวสัมผัสของยางจะถูกกรองออกและลดลงโดยความเฉื่อยเนื่องจากมวล (massive inertia) ของสะพาน และอาจจะถูกกำจัดได้หมดด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (strain) กับการทำนายบนพื้นฐานของความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลลาจะสามารถหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกได้

Laman และ Nowak (1996) จากประเทศอเมริกา ได้นำระบบ WIM มาทำการวัดกับสะพานที่ประกอบด้วยคาน (girder) เหล็ก 5 อัน เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความถี่ โดยความเครียดจะถูกวัดจากการจรรยาปกติ โดยวิธีการของเรนโพล (rainflow) ข้อมูลดังกล่าวจะถูกเก็บรวบรวมและบันทึกด้วยการใช้เครื่องมือ 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ระบบการวัดความเค้น (Stress Measuring System; SMS) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมความเครียดในอดีตที่ผ่านมา ภายใต

การจราจรปกติและได้ทำการรวบรวมเข้ากับแผนภูมิแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธี rainflow และโดยวิธีอื่นๆ ชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก ( Truck Weighing System ; TWS ) ทำการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุก และน้ำหนักเพลจากความเร็วในอดีต โดยการใช้เส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ (influence line) ของสะพาน ซึ่งองค์ประกอบต่างๆของรถบรรทุกจะสามารถหาได้โดยการใช้ตัวเซนเซอร์ 2 ตัวติดขนานกันไว้กับผิวทาง และแบตเตอรี่ที่ใช้สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องถึง 3 สัปดาห์ ในการศึกษา[3]

Thater G., Chang P., Schelling D.R. และ Fu C.C. (1998) ได้นำระบบ WIM มาใช้ในการทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของรถขณะเคลื่อนที่โดยทำการจำลองในคอมพิวเตอร์แล้วทำการแยกผลทางพลศาสตร์ออกเพื่อหาน้ำหนักทางสถิต ด้วยการ ใช้ Equivalent Dynamic Filter Technique (EDFT) แยกแรงออกเป็น Dynamics และ Pseudo static response โดยใช้ Fast Fourier Transform เทียบผลจากการแอนตัวเป็นสัดส่วน เรียกว่า equivalent filtering ratio (EFT) ซึ่งผลที่ได้พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณ อีกทั้งยังให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำนายน้ำหนักรถได้ถึง  $\pm 5\%$  ในขณะที่ใช้ระบบ WIM ที่มีอยู่เดิมแล้วนั้นให้ความถูกต้องแม่นยำในช่วง  $\pm 10\%$  เท่านั้น แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถหาน้ำหนักรถในแต่ละเพลได้ และยังไม่ได้นำคุณสมบัติของสะพานจริงมาพิจารณา[4]

Chan T.H.T., Law S.S., Yung T.H. และ Yuan X.R. (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการใช้ปฏิบัติการตอบสนองของสะพาน รูปแบบของคำตอบที่แน่นอน (closed-form solution) สามารถหาได้เพื่อใช้ในการหา น้ำหนักคงที่ที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) จะถูกนำมาใช้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้จะอยู่บนพื้นฐานของสมการของออยเลอร์ (euler's equation) ของคาน และแบบจำลองของรถที่ใช้ในการสร้างปฏิบัติการตอบสนองจะพิจารณาเป็น 2 เพล[5]

Zhu X.Q., Law S.S. (1999) ได้ทำการจำลองรูปแบบสะพานเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วงคาน และมีหน้าตัดไม่คงที่ โดยใช้หลักการของ Hamilton โดยจุดรองรับภายในจะถูกแทนด้วยสปริงที่มีความแข็งมากมาวิเคราะห์ พฤติกรรมการสั่นไหวของคานภายใต้ น้ำหนักที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการหาน้ำหนักจะใช้หลักการของซูเปอร์โพสิชันเชิงโหมด (modal superposition) และเทคนิค optimization ซึ่งน้ำหนักที่หาได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา[6]

Law S.S., Chan T.H.T. และ Zeng Q.H. (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักของรถขณะกำลังเคลื่อนที่ด้วยการทดสอบจากแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลของปฏิกิริยาตอบสนองของการสั่นไหวของสะพานเพียงอย่างเดียวในรูปของ Frequency – Time domain ปราศจากการใช้ข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งรถนั้นถูกจำลองให้มีรูปแบบเป็น 1 เพลา และ 2 เพลา (กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาไว้คงที่) ให้เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาและมีค่าความหน่วง (viscous damping) สามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของคานได้โดยผ่านการแปลงพิกัดเชิงโหมด (modal coordinate) ซึ่งผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับฟูเรียร์ทรานส์-ฟอร์ม (fourier transforms) และน้ำหนักของรถจะถูกแปลงกลับไปสู่โดเมนของเวลา (time domain) ความถูกต้องของค่าน้ำหนักที่หาได้จะถูกตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกันระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นมาจากน้ำหนักที่หาได้ วิธีการดังกล่าวจะสามารถทำนายน้ำหนักของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ โดยใช้เฉลี่ยค่าแรงที่หาได้มาทำการหาน้ำหนักของรถ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้ให้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง 20% การเฉลี่ยค่าแรงนี้เมื่อพิจารณาจากแรงที่ได้จริงพบว่าลักษณะของแรงมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง คือมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจนมีค่าลบในบางช่วง ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ไม่มีความน่าเชื่อถือ จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานจริง[7]

Chan T.H.T., Law S.S. และ Yung T.H. (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะกำลังเคลื่อนที่ โดยเลือกใช้สะพานที่เป็นคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) โดยได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดและเครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (girder) ของสะพานตลอดจนเครื่องตรวจนับจำนวนเพลา (axle sensors) ที่ผิวทางของสะพาน และนำรถบรรทุก 2 เพลามาใช้ในการทดสอบเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม สามารถหาน้ำหนักที่เพลาทางพลศาสตร์ได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ดังนั้นสามารถหาน้ำหนักรวมของรถได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาให้ไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (fourier transform) ซึ่งพบว่าใช้เวลาอย่างมากถึง 30 นาทีเมื่อใช้ Cpu รุ่น Pentium II 300MHz ในการหาน้ำหนักและน้ำหนักที่หาได้ในโดเมนของเวลายังมีความแปรปรวนสูงมากจนไม่สามารถเชื่อถือได้ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) แม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนต่ำถึง  $\pm 5\%$  ก็ตาม[8]

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักรถขณะกำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) โดยใช้ทฤษฎีของแผ่นบาง (orthotropic rectangular theory) และหลักการของซูปเปอร์โพสิชันที่เชิงโหมด

(modal superposition principle) มาวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ ซึ่งจะสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา (time domain) โดยนำน้ำหนักที่หาได้จากวิธีการจำลองรูปแบบเป็นคานากับวิธีการจำลองรูปแบบเป็นแผ่นบางมาเปรียบเทียบกับ รวมทั้งทำการทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วน ผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนที่ต่ำมากคือไม่เกิน 5% อยู่ในระดับสัญญาณรบกวนที่ต่ำมาก (1%) แต่ในการหาน้ำหนักจะต้องใช้เวลานานมาก เพราะต้องมีการหาค่าพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมในการคำนวณแต่ละครั้งอีกทั้งค่าพารามิเตอร์ มีผลต่อการหาน้ำหนักค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงและการหาน้ำหนักด้วยการใช้ความเร่งจะให้ผลที่ดีกว่าการใช้ความเครียด และยังพบว่าการใช้วิธีนี้ยังมีผลให้ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย[9]

Law S.S., Chan T.H.T. และ Zeng Q.H. (2001) พบว่าการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูงที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่า สภาวะที่บกพร่อง (ill-conditioned) Law S.S. และคณะ จึงได้เพิ่มวิธีการ Regularization เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณโดยทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่หาได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวถ่วงน้ำหนัก ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้นใช้เวลาในการคำนวณที่นานและมีความสั่นเปลืองเกินไป[10]

Law S.S. และ Fang Y.L. (2001) ได้ทำการหาน้ำหนักรถขณะกำลังเคลื่อนที่จากแบบจำลองย่อส่วน โดยการใช้เทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (dynamic programming) เข้ามาช่วยซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นมาจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งน้ำหนักในรูปแบบของเสตทสเปซ (state-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูลา (recursive formular) บนพื้นฐานของการใช้ตัวเซ็นเซอร์หลายๆตัวในการวัดปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน การคำนวณด้วยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มนี้ จะใช้เวลาที่น้อยกว่าวิธีอื่น และมีความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับ regularization พารามิเตอร์เช่นกัน และไม่สามารถละทิ้งพารามิเตอร์นี้ได้ ซึ่งการใช้ค่า regularization พารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามาก[11]

คณะกรรมการยุโรป (2001) ได้ทำการพัฒนาระบบ WIM ด้วยการใส่สะพานเป็นหลัก เรียกว่า Bridge WIM หรือ B-WIM โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งในการ optimization จะ

ค่านิ่งถึงพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบพร้อมๆ กันเพื่อให้ได้ค่าความเร็ว จำนวนเพลลา ระยะห่างเพลลา และน้ำหนักรวม และทำการพัฒนาการวิเคราะห์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็น 2 มิติ เพื่อค่านิ่งผลของตำแหน่งที่เอียงศูนย์ตามแนวขวาง และตรวจสอบโดยทำการทดลองในสนามจริง โดยใช้สะพานที่มีลักษณะแบบ orthotopic deck และค่านิ่งถึงพารามิเตอร์จากสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ผลของอุณหภูมิจากฤดูกาล และความชันตามแนวขวางของผิวทาง และยังได้ทดสอบกับสะพานช่วงเดียวหรือหลายช่วง เพื่อตรวจสอบหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ซึ่งระบบการหาน้ำหนักในงานวิจัยนี้ค่าความเร็วและระยะห่างเพลลาจากการทำนายพร้อมกันเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน โดยพบว่าการใช้การวิเคราะห์แบบ 2 มิติจะมีความถูกต้องแม่นยำได้มากกว่าการวิเคราะห์แบบมิติเดียว แต่ผลการหาแรงทางพลศาสตร์ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มากเนื่องจากมีความแปรปรวนของข้อมูลสูง สำหรับผลการหาน้ำหนักรวมทางสถิติให้ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$ [12]

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2002) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีโดเมนของเวลา (time domain method) ด้วยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองแบบคานต่อเนื่อง โดยการใช้ความเครียดและความเร่งที่วัดได้ของรถขณะเคลื่อนที่ และใช้วิธีการ Regularization ในการคำนวณเพื่อเพิ่มขอบเขตในการแก้ปัญหาและลดเวลาในการคำนวณ จากผลการทดลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งจะสามารถลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก (noise) ได้ และยังพบว่าการใช้ความเร่งเป็นพารามิเตอร์ในการหาน้ำหนักแทนการใช้ความเครียดนั้น จะต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นด้วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งวิธีการนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้กับวิธีการหาน้ำหนักแบบวิธีโดเมนของเวลาและวิธีโดเมนของความถี่และเวลา โดยการแก้ปัญหาใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition; SVD) และให้ความคลาดเคลื่อนที่มาน้อยตามระดับของสัญญาณรบกวน ซึ่งมีความแม่นยำสูงสุดถึง 4% แต่ใช้เวลานานในการคำนวณเนื่องจากขนาดของเมทริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่มาก และยังใช้เวลานานมากในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานจริง[13]

Yu L. และ Chan T.H.T. (2002) ได้ทำการทดสอบหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วนโดยการใช้ผลตอบสนองของสะพานด้วยโมเมนต์ตัด โดยเลือกใช้วิธีโดเมนของเวลา (Time Domain Method; TDM) และวิธีโดเมนของความถี่และเวลา (Frequency Time Domain Method; FTDM) และทำการเปรียบเทียบเทคนิคการแก้ระบบสมการเชิงเส้นระหว่างวิธี เทคนิคการใช้ซูโดอินเวอร์สเมทริกซ์ (Pseudo-Inverse matrix; PI) และวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน (Singular Value Decomposition; SVD) อีกทั้งยังได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ความถี่ที่

เลือกใช้ จำนวนโหมดทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถขณะเคลื่อนที่ จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ในการวัด จากผลการทำนายน้ำหนักที่ได้พบว่าการใช้เทคนิคซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชันสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำได้ทั้งในวิธี TDM และ FTDM โดยเฉพาะในกรณีของวิธี FTDM สามารถแก้ปัญหาสถานะบกพร่อง (ill-condition) ได้ดีกว่าการใช้เทคนิคซูโดอินเวอร์สมเมตริกซ์ และความคลาดเคลื่อนที่ได้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นนั้น ส่วนใหญ่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีคืออยู่ในช่วงไม่เกิน 5-10% แต่ค่าพารามิเตอร์มีผลต่อการหาน้ำหนักค่อนข้างมากในแต่ละกรณีก็คือจะต้องหาค่าค่าที่เหมาะสมที่สุดตลอดการคำนวณนั้นๆ จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานจริง

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2003) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการหาน้ำหนักรถระหว่าง 2 วิธี คือ วิธีแรกจะหาน้ำหนักรถโดยตรงจากลักษณะของสะพาน กับวิธีที่สองจะทำการหาน้ำหนักรถโดยใช้หลักการของทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผ่านแบบจำลองซึ่งจำลองเป็นลักษณะของสะพานและรถบรรทุก โดยศึกษาค่าตัวแปรหลายตัวแปร เช่น จำนวนโหมดของการสั่นไหวที่นำมาใช้ จำนวนจุดข้อมูลที่ติดตั้งเครื่องมือวัด ตลอดจนผลของการเยื้องศูนย์ของแนวการวิ่งของรถ เป็นต้น พบว่าวิธีแรกค่าความแม่นยำของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวิ่งของรถ ส่วนวิธีที่สองค่าความแม่นยำนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณ[14]

พลกฤษณ์ พนาปุฒิกุล (2003) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกบนสะพาน เพื่อหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะกำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิง (dynamic programming) โดยได้พิจารณาผลของการบิดด้วยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) และได้ศึกษาถึงผลกระทบของการหาน้ำหนักเนื่องจากความเร็วและความขรุขระ พบว่าผลของการหาน้ำหนักนั้นมีความคลาดเคลื่อนที่ซึ่งมีตัวแปรคือการเลือกใช้ Regularization parameter และค่าน้ำหนักที่หายได้มาจากการเฉลี่ยแรงในช่วงกลางของเวลาที่รถวิ่งบนสะพานทั้งสองเพลลา ซึ่งเป็นการจำกัดการนำไปใช้งานและไม่สามารถให้ความแม่นยำของแรงในเพลลาได้มากพอ และเนื่องจากมีการใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางซึ่งจะทำให้มีจำนวนองศาอิสระมาก ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถนานมาก ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง[15]

ธวัช อัครวิทยานุมิ (2003) ได้นำเสนอเทคนิคการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิง โดยตัดผลการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยโมเมนต์ตัดของหน้าตัด และทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มมากยิ่งขึ้นจากการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (iteration technique) โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มา

ทำการคำนวณในไดนามิคโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ค่าน้ำหนักบรรทุกู้เข้าหาค่าที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรกของไดนามิคโปรแกรมมิ่ง ผลที่ได้พบว่าน้ำหนักบรรทุกู้ที่หายได้มีความถูกต้องและแม่นยำสูง มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมากคืออยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ซึ่งยังใช้เวลาในการหายน้ำหนักน้อยกว่าวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชันหลายเท่าและได้ทำยืนยันข้อมูลที่ได้ด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนอีกด้วย[16]

Law S.S., Bu J.Q., Zhu X.Q. และ Chan S.L.(2004) ได้ใช้หลักการของทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์มาทำการหาน้ำหนักบรรทุกู้ โดยได้สร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์และทำการลดองศาอิสระระหว่างแบบจำลองรถทดสอบกับแบบจำลองสะพานด้วยวิธีคอนเดนเซชัน (condensation technique) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาสูงมากประมาณ  $\pm 15\%$  จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกู้เคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วนโดยการใช้ผลตอบสนองของสะพานด้วยค่าความเครียด พบว่าจำนวนองศาอิสระระหว่างแบบจำลองรถทดสอบกับแบบจำลองสะพานที่ได้จากวิธีคอนเดนเซชัน (condensation technique) จะต้องมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนของจุดวัดผลตอบสนองของสะพาน จึงจะได้ค่าความเครียดที่สอดคล้องกับแบบจำลองย่อส่วน

พัชรพงษ์ อาสนจินดา (2004) ได้ทำการหาน้ำหนักบรรทุกู้เคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนสะพานและรถบรรทุกู้ โดยใช้การคำนวณหาน้ำหนักด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิ่ง เนื่องจากพบว่ามีความเร็วที่เร็วกว่าวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพสิชัน ร่วมกับการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำเพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักที่คำนวณได้ โดยศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ มวลและความเร็วของรถบรรทุกู้, ระดับความขรุขระของพื้นผิวสะพาน, ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถตามแนวขวางของสะพาน, ประเภทฐานรองรับของสะพาน และผลของจำนวนเพลารถบรรทุกู้ ซึ่งพบว่าการนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำการเฉลี่ยแล้วนำไปหาค่าน้ำหนักนั้นจะสามารถลดผลของการบิดตัวของสะพานที่เกิดจากตำแหน่งของรถตามแนวขวางได้ดี โดยรถบรรทุกู้ที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการหายน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่ดีกว่ารถบรรทุกู้ที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงมากขึ้นตามระดับความขรุขระของพื้นผิวสะพาน รูปแบบของฐานรองรับของสะพานนั้นมีผลต่อการหายน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ โดยสะพานแบบช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะให้ผลการหายน้ำหนักที่ดีกว่าสะพานแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ยังพบว่ากรณีรถบรรทุกู้แบบ 2 เพลาคือเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิวไม่มีความขรุขระนั้นให้ผลการหายน้ำหนักรวมที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  แต่ยังคงขาดการทดสอบในภาคสนามอันจะเป็นการสนับสนุนกระบวนการดังกล่าวว่าสามารถใช้กับสะพานจริงได้[17]

ภาณุ ฟุ้งสุข (2005) ได้ทำการทดสอบภาคสนาม โดยทำการติดตามวัดความเครียดสำหรับ วัดผลตอบสนองของสะพานจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเช่นกัน ซึ่งทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ที่ใต้สะพาน จากผลการทดสอบทั้ง 51 การทดสอบซึ่งในกรณีเคลื่อนที่โดยใช้ช่องจราจรกลาง ค่าความคลาดเคลื่อนน้ำหนักรวมไม่เกิน  $\pm 6\%$  เมื่อพิจารณาผลการกระแทกของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งข้ามสะพาน โดยมีผลของการกระแทกก่อนเข้าสะพานและผลของการกระแทกช่วงกลางสะพาน พบว่าผลการทายน้ำหนักรวมโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$ [18]

กิตติ จิวโพธิ์เจริญ (2009) ได้ทำศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกแบบปราศจากข้อมูลตำแหน่ง โดยใช้เทคนิคการหาค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดจากฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) มาทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกไปพร้อมๆกับการหาดำแหน่งรถ (ซึ่งความคลาดเคลื่อนถูกเขียนเป็นฟังก์ชันของความเร็ว และระยะห่างเพลลา) ซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 5 ถึง 10 วินาที ในแต่ละรอบการคำนวณ โดยผลที่ได้มาจาก 4 ตัวแปรคือ ความเร็วของรถบรรทุก น้ำหนักเพลลาหน้า น้ำหนักเพลลาหลัง และระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่จะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักมีความซับซ้อนน้อยความสัมฤทธิ์ผลของวิธีการหาน้ำหนักจากการทดสอบในภาคสนามพบว่าวิธีการหาน้ำหนักสามารถหาน้ำหนักของรถสิบล้อได้ทั้งหมด 112 กรณี หรือคิดเป็นความสัมฤทธิ์ผล 100% โดยมีความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง  $\pm 15\%$  สำหรับประสิทธิผลของการหาน้ำหนักรถบรรทุกกึ่งพ่วงจากข้อมูลใช้งานจริง ซึ่งพิจารณาเฉพาะกรณีทีรถบรรทุกแล่นข้ามสะพาน โดยที่สัญญาณโมเมนต์ตัดมีความสมบูรณ์ พบว่าวิธีการที่เสนอมีประสิทธิผลในการหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ประมาณ 95% จากกรณีทีพิจารณาทั้งสิ้น 23 กรณี โดยมีความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง  $\pm 10\%$ [19]

Hua Zhao และ Nasim Uddin (2010) ได้ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากการทดสอบภาคสนามด้วยระบบ BWIM การทดสอบได้มีการติดตามวัดความเครียดสำหรับวัดผลตอบสนองของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเช่นกันโดยจะทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ใต้สะพาน นอกจากนี้ยังทำการติดตามวัดความเครียดสำหรับใช้ในการตรวจจับเพลลาบริเวณใต้สะพานในตำแหน่งใกล้กับหัวและท้ายของช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ โดยใช้รถบรรทุกที่ทราบค่าน้ำหนักและระยะห่างเพลลามาใช้ในการทดสอบที่ความเร็วต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการหาน้ำหนักด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงซึ่งได้ค่าความแม่นยำในการหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอยู่ในช่วง  $\pm 7\%$  และน้ำหนักของแต่ละเพลลาอยู่ในช่วง  $\pm 20\%$ [20, 21]



จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักของอัลกอริทึมต่างๆ แต่ยังคงขาดการศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างแต่ละวิธี ในการศึกษาครั้งนี้จะเปรียบเทียบอัลกอริทึมการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลแบบต่างๆ 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง การศึกษาใช้ผลการทดสอบที่สะพานทางแยกต่างระดับหนองขาม-ท่าเรือแหลมฉบัง สะพานข้ามทางรถไฟ กม. 4+547.5 ทางหลวงหมายเลข 7 ซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอขนาด 2 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) โดยช่วงสะพานที่ทำการทดสอบมีความยาวช่วง 14 เมตร และมีความกว้าง 11 เมตร รถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบเป็นรถสิบล้อหนัก 25 ตัน วิ่งด้วยความเร็วค่าต่างๆ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยอัลกอริทึมที่อาศัยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบ แล้วทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการทำนายน้ำหนักที่ได้รับ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของแต่ละวิธี ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้อัลกอริทึมการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้อย่างเหมาะสมต่อไป

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัลกอริทึมการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลแบบต่างๆ 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานจากผลการทดสอบสะพานจริงภาคสนาม
2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถบรรทุก

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พิจารณาสะพานที่มีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว (Simply supported bridge) ที่มีการกระจายของมวลและความแข็งเกร็งอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของสะพาน
2. พิจารณาพฤติกรรมของสะพาน เนื่องจากรถบรรทุกที่ทราบค่าน้ำหนักและระยะเพลลาเคลื่อนที่ไปบนสะพานเพียงคันเดียว
3. สมมติฐานว่าล้อรถบรรทุกสัมผัสกับพื้นผิวของสะพานตลอดเวลาในระหว่างการเก็บข้อมูล
4. รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานในช่องทางเดิมและมีความเร็วคงที่ตลอดความยาวของสะพาน
5. ทำการเก็บข้อมูลความเครียดของสะพาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวสะพาน
6. พิจารณาการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานและรถบรรทุกในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ผลเปรียบเทียบการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลตอบสนองของสะพานด้วยเส้นอิทธิพลแบบต่างๆ 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง
2. ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลตอบสนองของสะพานด้วยเส้นอิทธิพลแบบต่างๆ
3. วิธีการที่เหมาะสมในการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากผลตอบสนองของสะพานด้วยเส้นอิทธิพล

### 1.6 การดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ด้วยการรวบรวมข้อมูลและทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมการทดสอบภาคสนาม
3. สร้างเส้นอิทธิพลแบบต่างๆ 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง
4. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
5. ทำการเก็บข้อมูลความเครียดของสะพาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกจากการทดสอบจริงในภาคสนาม
6. ทำการเตรียมข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบจริงภาคสนามเพื่อนำมาใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุก
7. ทำการศึกษาการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพล เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกจากข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม
8. ทำการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบ
9. อภิปรายผลการศึกษา
10. สรุปผลการศึกษา
11. จัดทำวิทยานิพนธ์

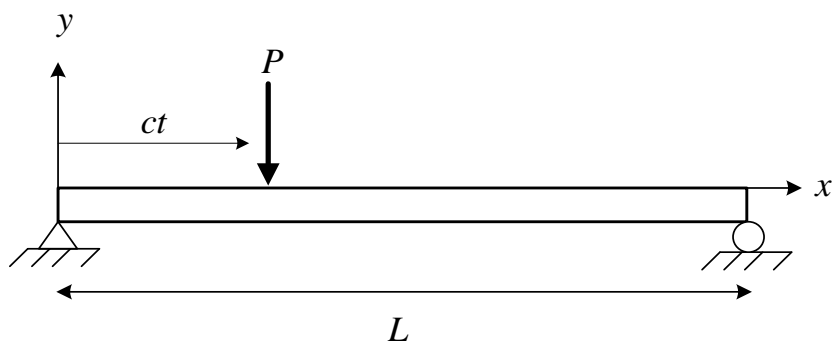
## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีเกี่ยวข้อง

ข้อมูลของแรงที่เกิดจากยานพาหนะกระทำต่อสะพานที่ถูกต้องตามความเป็นจริงนั้น เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ออกแบบสะพาน เนื่องจากการพิจารณาความปลอดภัย หรือแม้กระทั่งความคงทนของสะพานล้วนขึ้นอยู่กับน้ำหนักของยานพาหนะที่มากระทำ การวัดค่าแรงดังกล่าวโดยตรงจากการใช้เครื่องมือที่ติดตั้งไว้กับรถจะมีการเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นระบบการหาน้ำหนักรถที่แท้จริงขณะเคลื่อนที่บนสะพาน ซึ่งเรียกว่าระบบ Bridge Weigh-In-Motion หรือ B-WIM จึงได้ถูกนำมาใช้

#### 2.1 เส้นอิทธิพลของผลตอบสนองสะพาน

อัลกอริทึมที่นิยมใช้คำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลโมเมนต์ดัด จะพิจารณาแบบจำลองสะพานและรถบรรทุกที่จำลองสะพานด้วยคานช่วงเดียวซึ่งมีจุดรองรับอย่างง่ายทั้งสองข้าง และจำลองรถบรรทุกด้วยแรงกดแบบจุดมีขนาดคงที่กระทำที่ตำแหน่งเพลารถที่เคลื่อนที่ไปบนสะพานดังภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดงน้ำหนักเพลารถ  $P$  (พิจารณาแยกกรวยเพลารถ) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $c$  การวิเคราะห์โครงสร้างของแบบจำลองจะทำให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดและค่าความเครียดในสะพาน หากกำหนดค่า  $P$  ได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักเพลารถแท้จริง ก็จะทำให้ค่าความเครียดของแบบจำลองสะพานเท่ากับค่าที่ตรวจวัดได้จากสะพานจริง



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสะพานและรถบรรทุก

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ตัดจากแบบจำลองเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ จึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ตัดในสะพานกับผลของแรงกด  $P$  จากเพลารถในรูปแบบของเส้นอิทธิพลโมเมนต์ตัด

### 2.1.1 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต (Theoretical static influence line)

โดยอาศัยสมมูลของระบบแรงเชิงสถิตของแบบจำลองดังรูปที่ 2.2 สามารถเขียนเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ตัดที่หน้าตัด เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งแรง และความยาวช่วงสะพาน ได้ดังนี้[22, 23]

$$IL_j(x_v) = \begin{cases} x_v - \frac{x_v \cdot x_j}{L}, & x_v \leq x_j \\ x_j - \frac{x_v \cdot x_j}{L}, & x_j < x_v \leq L \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่

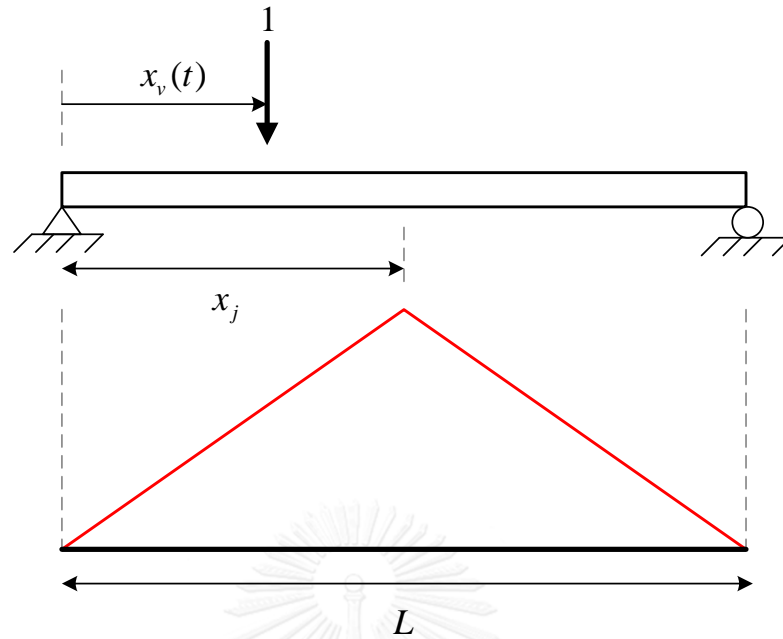
$IL_j(x)$  คือ เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ตัดเชิงสถิตของหน้าตัดที่ตำแหน่ง  $j$  เนื่องจาก  
น้ำหนัก เพลารถบรรทุกที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ

$L$  คือ ความยาวของสะพาน

$x_j$  คือ ระยะของหน้าตัดที่ตำแหน่ง

$x_v$  คือ ระยะของตำแหน่งเพลารถ สำหรับรถบรรทุกสี่ล้อประกอบด้วย

$x_f, x_m, x_r$  ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่จุดวัดตำแหน่ง

### 2.1.2 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต (Theoretical dynamic influence line)

โดยอาศัยสมมูลของระบบแรงเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองดังรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน ได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} = \delta(x-ct) P \quad (2.2)$$

โดยที่

$y(x,t)$	คือ	ระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่ง $x$ และเวลา $t$
$\rho$	คือ	มวลต่อความยาว
$C$	คือ	ค่าการหน่วงเนื่องจากมีความหนืด
$E$	คือ	ค่าอีลาสติกโมดูลัสของหน้าตัดของสะพาน, นิวตัน-เมตร <sup>2</sup>
$I$	คือ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของสะพาน, เมตร <sup>4</sup>
$P$	คือ	แรงจากเพลารถ, นิวตัน
$c$	คือ	ความเร็วของรถ, เมตร/วินาที
$t$	คือ	เวลา
$\delta(x)$	คือ	ดิแรกเดลตาฟังก์ชัน

สมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งผลคำตอบจะแสดงการเคลื่อนที่ตามแนวตั้งของสะพานในตำแหน่งต่างๆ ภายใต้การเปลี่ยนตำแหน่งของแรง  $P=1$  ไปบนสะพาน หากสมมติให้สะพานมีค่าความหน่วงที่ต่ำกว่าค่าความหน่วงวิกฤติมาก (ซึ่งเป็นสภาพปกติของสะพานทั่วไป) จะได้ผลคำตอบเป็น[24]

$$y(x,t) = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{L} \frac{1}{n^2(n^2 - \alpha^2)} \times \left( \sin n\omega t - \frac{\alpha}{n} e^{-\omega_d t} \sin \omega_{(n)} t \right) \quad (2.3)$$

โดยที่

$v_0$	คือ	ระยะการโก่งตัวสถิตที่ตำแหน่ง $x_j$ ด้วยแรง $P$ มีค่าเท่ากับ $\frac{2PL^3}{\pi^4 EI}$ โดยที่ $P=1$
$n$	คือ	ลำดับของโหมดการสั่นไหว
$\omega$	คือ	ความถี่ของแรงเคลื่อนที่ที่มากกระทำกับสะพาน
$\omega_{(n)}$	คือ	ความถี่โหมดการสั่นไหวที่ $n$ ของสะพาน
$\omega_d$	คือ	ความถี่ที่มีความหน่วงของสะพาน
$\alpha$	คือ	พารามิเตอร์ของความเร็ว มีค่าเท่ากับ $\frac{cL}{\pi} \left( \frac{\rho}{EI} \right)^{1/2}$

จากสมการที่ (2.3) เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดเชิงพลวัตที่หน้าตัด ของสะพาน เนื่องจากน้ำหนักเพลของรถบรรทุกที่ตำแหน่งใดๆ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.4)

$$IL(x_j, \frac{x_v}{c}) = -EI \frac{\partial^2 y(x, \frac{x_v}{c})}{\partial x^2} \Big|_{x=x_j} \quad (2.4)$$

### 2.1.3 เส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง (Influence line from direct measurements)

หากสามารถทำการทดสอบสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า โดยให้น้ำหนักบรรทุกดังกล่าวเคลื่อนตำแหน่งไปบนสะพาน แล้วตรวจวัดผลตอบสนองจากสะพานได้ ก็จะสามารถสร้าง

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแรงกับผลตอบสนองสะพานในรูปของเส้นอิทธิพลได้ ด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้เส้นอิทธิพลที่มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของสะพานที่สุด

เมื่อพิจารณาการตรวจวัดผลตอบสนองสะพานด้วยสเตรนเกจ (strain gauge) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งได้ง่ายและราคาถูก ในกรณีนี้จะสามารถหาเส้นอิทธิพลค่าความเครียด ของสะพาน จากผลการตรวจวัดสะพานภายใต้รถบรรทุกที่ทราบน้ำหนัก[21] ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$IL \ x_v = [W]^{-1} \times \{\varepsilon\} \quad (2.5)$$

โดยที่

$IL$	คือ	เวกเตอร์ของเส้นอิทธิพล
$W$	คือ	เมทริกซ์ประกอบของน้ำหนักเพลารถและตำแหน่ง
$\varepsilon$	คือ	เวกเตอร์ผลตอบสนองของสะพาน

## 2.2 อัลกอริทึมคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก

### 2.2.1 การประมาณค่าผลตอบสนองจากเส้นอิทธิพล

อาศัยการวิเคราะห์เส้นอิทธิพลจากแบบจำลองสะพานและรถบรรทุกข้างต้น จะสามารถประมาณค่าผลตอบสนองสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกสี่ล้อซึ่งมี 3 เพลา ตามรูปที่

2.3 เป็น

$$\hat{m}_j(x_v) = \hat{P}_v \cdot IL_k(x_v) \quad (2.6)$$

โดยที่

$\hat{m}_j$	คือ	ค่าประมาณผลตอบสนอง (โมเมนต์ดัดหรือความเครียด) จากแบบจำลองที่หน้าตัด $x_j$
$\hat{P}_v$	คือ	ค่าประมาณน้ำหนักของเพลา ได้แก่ $\hat{P}_f, \hat{P}_m, \hat{P}_r$ สำหรับเพลาหน้า เพลา กลางและเพลาหลังตามลำดับ
$IL_k$	คือ	ฟังก์ชันเส้นอิทธิพล ได้แก่ $IL_1, IL_2, IL_3$ สำหรับแบบสถิต, พลศาสตร์ และแบบการตรวจวัดโดยตรง
$x_v$	คือ	ระยะของตำแหน่งเพลารถ ประกอบด้วย $x_f, x_m, x_r$

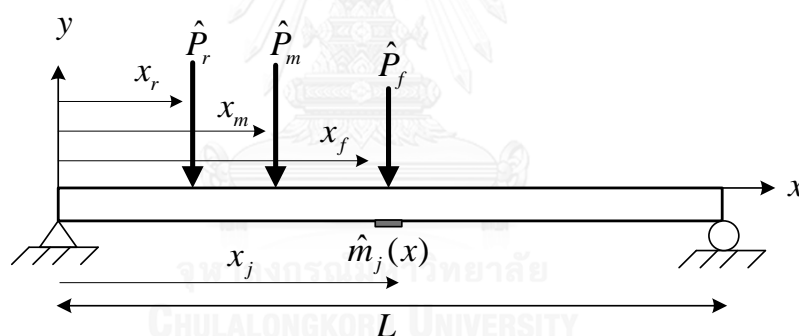
เมื่อรวมผลของแรงจากน้ำหนักเพลารถทั้ง 3 เพลาแล้ว จะได้ค่าประมาณผลตอบสนองของสะพานด้วยเส้นอิทธิพลแบบที่  $k$  ซึ่งแจกแจงตามลำดับเวลาที่ตรวจวัดสะพานได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{m}_{j1} \\ \hat{m}_{j2} \\ \vdots \\ \hat{m}_{jN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{P}_f \cdot IL_{k1}(x_f) + \hat{P}_m \cdot IL_{k1}(x_m) + \hat{P}_r \cdot IL_{k1}(x_r) \\ \hat{P}_f \cdot IL_{k2}(x_f) + \hat{P}_m \cdot IL_{k2}(x_m) + \hat{P}_r \cdot IL_{k2}(x_r) \\ \vdots \\ \hat{P}_f \cdot IL_{kN}(x_f) + \hat{P}_m \cdot IL_{kN}(x_m) + \hat{P}_r \cdot IL_{kN}(x_r) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

โดยที่

$\hat{m}_{ji}$  คือ ค่าประมาณผลตอบสนองจากแบบจำลองที่หน้าตัดที่  $x_j$  ลำดับเวลา  $i$  ใดๆ

$N$  คือ จำนวนลำดับเวลาทั้งหมดที่ตรวจวัดสะพานนับตั้งแต่เพลาน้ำเข้าสะพาน จนกระทั่งเพลาลงพื้นสะพาน



รูปที่ 2.3 แบบจำลองสะพานและรถบรรทุกแบบ 3 เพลา

## 2.2.2 ค่าผลตอบสนองจริงของสะพาน

ค่าผลตอบสนองจริงของสะพานที่หน้าตัด  $x_j$  อันได้แก่ ค่าความเครียด และโมเมนต์ดัด เนื่องจากรถบรรทุกแล่นไปบนสะพานตามระยะ  $x_v$  นั้น หากจากการตรวจวัดโดยตรงด้วยอุปกรณ์อ่านค่าความเครียด ส่วนค่าโมเมนต์ดัดจะใช้ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้หาจากสมการ

$$m_j(x_v) = EI \cdot \beta \cdot \frac{\varepsilon_j(x_v)}{\gamma} \quad (2.8)$$

โดยที่

$m_j(x_v)$  คือ ค่าโมเมนต์ดัดจริงของหน้าตัด  $x_j$



$E$	คือ	ค่าอิลาสติกโมดูลัสของหน้าตัดของสะพาน, นิวตัน-เมตร <sup>2</sup>
$I$	คือ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของสะพาน, เมตร <sup>4</sup>
$\beta$	คือ	ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดของสะพาน (การศึกษานี้ใช้ค่าจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบตามตารางที่ 4.1 [3])
$\gamma$	คือ	ตำแหน่งของแกนสะเทินของหน้าตัดสะพาน, เมตร
$\varepsilon_j(x_j)$	คือ	ค่าความเครียดที่อ่านค่าได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดที่หน้าตัด $x_j$

### 2.2.3 การหาน้ำหนักบรรทุก

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเส้นอิทธิพล (influence line method) ทำการหาน้ำหนักของรถบรรทุก ( $\hat{P}_f, \hat{P}_m, \hat{P}_r$ ) โดยการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) ของความคลาดเคลื่อนระหว่างผลตอบสนองจริงจากการตรวจวัดสะพาน  $Z(t)$  ในหน้าตัด  $x_j$  ซึ่งมีทั้งสิ้น  $j$  หน้าตัด กับค่าประมาณผลตอบสนองจากแบบจำลองสะพาน  $\hat{Z}(t)$  ในตำแหน่งหน้าตัดที่สอดคล้องกัน[22] โดยที่

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{Bmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ \vdots \\ m_j(t) \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

ขณะที่

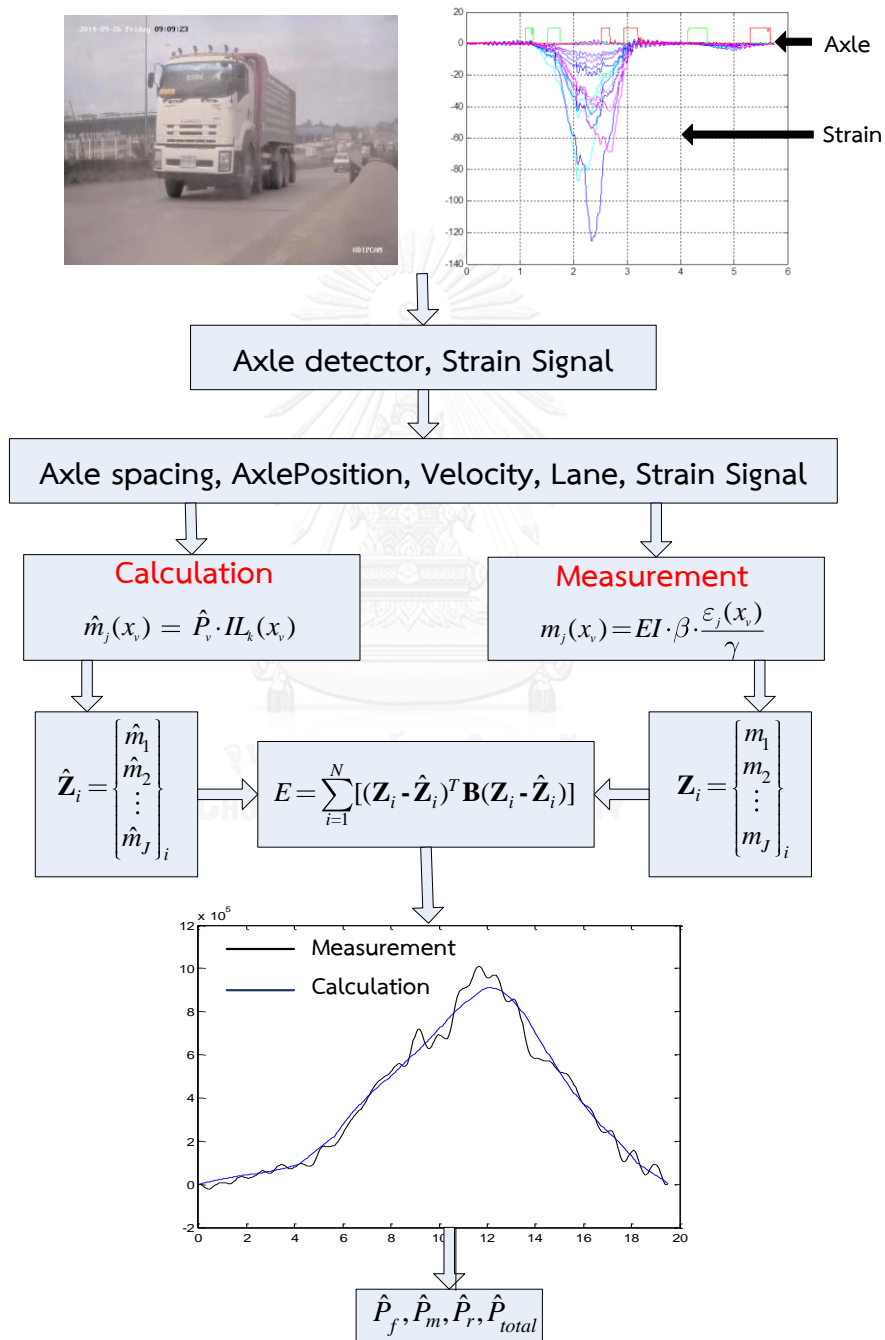
$$\hat{\mathbf{Z}}(t) = \begin{Bmatrix} \hat{m}_1(t) \\ \hat{m}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{m}_j(t) \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) ที่จะถูกหาค่าต่ำสุด (หรือหาค่าเหมาะที่สุด) คือค่ากำลังสองของผลต่างระหว่างค่าทั้งสอง

$$E = \sum_{i=1}^N [(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i)^T \mathbf{B}(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i)] \quad (2.11)$$

**B** เป็นเมทริกซ์น้ำหนัก (weighting matrix) ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติเป็นบวกแน่นอน (positive definite) และ  $N$  คือจำนวนลำดับเวลาของข้อมูล

จากสมการที่ 2.11 จะสามารถหาค่าน้ำหนักของรถบรรทุก ( $\hat{P}_f, \hat{P}_m, \hat{P}_r$ ) ที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่า  $E$  ที่ต่ำที่สุด ซึ่งขั้นตอนการหาน้ำหนักรถบรรทุกแสดงตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก

## 2.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization)

### 2.3.1 หลักการทั่วไป

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) เป็นวิธีการหลักในการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (unconstrained optimization) ในการหาผลลัพธ์ วิธีการ BFGS นี้เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกึ่งนิวตัน (Quasi-Newton algorithm) โดยที่หลักการของวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนามาจากวิธีการของนิวตันซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป[25]

### 2.3.2 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

$$f(x + \delta x) \cong f(x) + f'(x)\delta x + \frac{1}{2} f''(x)\delta x^2 \quad (2.12)$$

ซึ่งสมการ 2.73 จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ  $\delta x$  เป็นคำตอบของสมการ

$$f'(x) + f''(x)\delta x = 0 \quad (2.13)$$

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

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f'(x_n)}{f''(x_n)} \quad \text{โดยที่ } n \geq 0 \quad (2.14)$$

ซึ่งค่า  $x_{n+1}$  จะลู่อเข้าสู่ค่า  $x^*$

สมการที่ 2.75 นี้สามารถใช้ได้ในสมการหลายตัวแปร โดยการแทนที่อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของฟังก์ชัน  $f'(x)$  ด้วย เกรเดียนต์ (gradient),  $\nabla(x)$  และในทำนองเดียวกันทำการแทนที่ส่วนกลับของ

อนุพันธ์ลำดับที่สองของฟังก์ชัน,  $1/f''(x)$  ด้วย เมทริกซ์ผกผันของเฮสเซียนเมทริกซ์ (inverse of the Hessian matrix),  $Hf(x)^{-1}$  ในสมการที่ 2.75 ได้

$$x_{n+1} = x_n - Hf(x_n)^{-1} \nabla f(x_n), n \geq 0 \quad (2.15)$$

โดยทั่วไปแล้ววิธีนิวตันจะถูกดัดแปลงโดยเพิ่มขั้นตอนการคำนวณขนาดเล็ก  $0 < \gamma < 1$  แทนที่จะใช้  $\gamma = 1$

$$x_{n+1} = x_n - \gamma \cdot Hf(x_n)^{-1} \nabla f(x_n), n \geq 0 \quad (2.16)$$

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

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

$$p_n = x_{n+1} - x_n = -\gamma \cdot Hf(x_n)^{-1} \nabla f(x_n) \quad \text{โดยที่ } n \geq 0 \quad (2.17)$$

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

### 2.3.3 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธีกึ่งนิวตัน (quasi Newton's method)

ในวิธีกึ่งนิวตันเฮสเซียนเมทริกซ์ของฟังก์ชันไม่จำเป็นต้องถูกนำมาพิจารณา เฮสเซียนเมทริกซ์จะถูกหาโดยเวกเตอร์เกรเดียนต์แทน วิธีกึ่งนิวตันจึงใช้หลักการของวิธีซีแคนต์ (secant method) หลักการของวิธีนี้ เริ่มต้นเหมือนหลักการของวิธีนิวตันโดยการกระจายฟังก์ชันด้วยวิธีการกระจายแบบแทย์เลอร์ ถึงเทอมอนุพันธ์อันดับที่สอง

$$f(x_0 + \Delta x) \cong f(x_0) + \nabla f(x_0)^T \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T H \Delta x \quad (2.18)$$

โดยที่  $\nabla f$  คือเกรเดียนต์ของฟังก์ชัน  $f(x)$   
 $H$  คือเฮซเซียนเมทริกซ์

ทำการประมาณเกรเดียนต์ด้วยวิธีการกระจายแบบเทย์เลอร์ถึงเทอมอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งได้

$$\nabla f(x_0 + \Delta x) \cong \nabla f(x_0) + H \Delta x \quad (2.19)$$

สมการที่ 2.80 คือสมการซีแคนต์ (secant equation) หาคำตอบของสมการนี้โดย  $\nabla f(x_0 + \Delta x) = 0$  ได้

$$\Delta x_0 = -H^{-1} \nabla f(x_0) \quad (2.20)$$

แต่  $H$  คือตัวแปรไม่ทราบค่า ในปัญหาหนึ่งตัวแปรการหา  $H$  โดยใช้วิธีนิวตันก็คือวิธีซีแคนต์นั่นเอง ในปัญหาหลายตัวแปรการหา  $H$  จะมีหลากหลายวิธี โดยทั่วไปเมทริกซ์เริ่มต้นของ  $H$  นิยมใช้เมทริกซ์เอกลักษณ์  $I$  ซึ่งบ่อยครั้งจะทำให้คำตอบที่คำนวณได้ลู่เข้าเร็วมาก ตัวแปรไม่ทราบค่า  $x_k$  ที่ถูกปรับปรุงค่าจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณแบบนิวตัน โดยการหาเฮซเซียนเมทริกซ์ต่อไป ลำดับการคำนวณของวิธีกึ่งนิวตัน สามารถแสดงได้ดังนี้

1. สมมติเมทริกซ์เริ่มต้นของ  $H$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์  $H_1 = I$
2. คำนวณค่า  $\Delta x_k = -\alpha_k H_k^{-1} \nabla f(x_k)$  โดยที่  $\alpha$  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. เฮซเซียนเมทริกซ์  $H_{k+1}$  จะถูกหาออกมาได้ หรือหาค่าผกผันของเฮซเซียนเมทริกซ์โดยตรง  $H_{k+1}^{-1} = H_k^{-1} - \frac{y_k y_k^T}{y_k^T H_k^{-1} y_k}$

### 2.3.4 การหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ด้วยวิธี BFGS

วิธี BFGS เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกึ่งนิวตัน ที่ถูกพัฒนาโดย Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno ในปี ค.ศ. 1970 เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เทคนิคไต่เขา (hill-climbing optimization techniques) เพื่อหาดำแหน่งคงที่ซึ่งมีเกรเดียนต์เท่ากับศูนย์ของฟังก์ชัน หลักการของวิธีนี้เริ่มจากพิจารณา  $\Delta x_k$  คือทิศทางของการค้นหาที่ลำดับ  $k$  สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.20

$$H_k \Delta x_k = -\nabla f(x_k) \quad (2.21)$$

การค้นหาเชิงเส้นในทิศทาง  $\Delta x_k$  ใช้หาดำแหน่งถัดไป  $x_{k+1}$  และแทนที่จะหาเฮสเซียนเมทริกซ์ที่ตำแหน่ง  $x_{k+1}$  เฮสเซียนเมทริกซ์จะถูกประมาณโดยการเพิ่ม 2 เมทริกซ์ดังนี้

$$H_{k+1} = H_k + U_k + V_k \quad (2.22)$$

โดยที่ทั้งเมทริกซ์  $U_k$  และ  $V_k$  เป็นเมทริกซ์ที่มีหนึ่งแรงค์ ลำดับการคำนวณของวิธี BFGS สามารถแสดงได้ดังนี้

1. สมมติเมทริกซ์เริ่มต้นของ  $H$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์  $H_1 = I$
2. หาค่า  $\Delta x_k$  โดยแก้สมการ  $H_k \Delta x_k = -\nabla f(x_k)$
3. ทำการค้นหาเชิงเส้นโดยใช้ค่า  $\alpha_k$  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

$$H_{k+1} = H_k + (y_k y_k^T) / (y_k^T \Delta x_k) - (H_k \Delta x_k \Delta x_k^T H_k) / (\Delta x_k^T H_k \Delta x_k) \quad (2.23)$$

การลู่เข้าของคำตอบสามารถตรวจสอบได้โดยนอร์มของเกรเดียนต์  $|\nabla f(x_k)|$  ในทางปฏิบัติ เฮสเซียนเมทริกซ์เริ่มต้นจะใช้เมทริกซ์เอกลักษณ์  $I$  และในขั้นตอนแรกของการคำนวณรอบถัดไป จะต้องคำนวณเมทริกซ์ผกผันของเฮสเซียนเมทริกซ์ (inverse of the Hessian matrix,  $H_{k+1}^{-1}$ ) ซึ่งโดยทั่วไปจะประยุกต์ใช้สูตรของเซอร์แมน-มอร์ริสัน (Sherman-Morrison formula) กับสมการที่ 2.23 ได้

$$\begin{aligned} H_{k+1}^{-1} &= H_k^{-1} + (1 + y_k^T H_k^{-1} y_k / \Delta x_k^T y_k) / (\Delta x_k \Delta x_k^T) (\Delta x_k^T y_k) \\ &\quad - (\Delta x_k y_k^T H_k^{-1} + H_k^{-1} y_k \Delta x_k^T) / (\Delta x_k^T y_k) \end{aligned} \quad (2.24)$$

ในที่สุดช่วงคำตอบที่เชื่อถือได้จะหาได้จากเมทริกซ์ผกผันของเฮสเซียนเมทริกซ์ของการคำนวณรอบสุดท้าย

## บทที่ 3

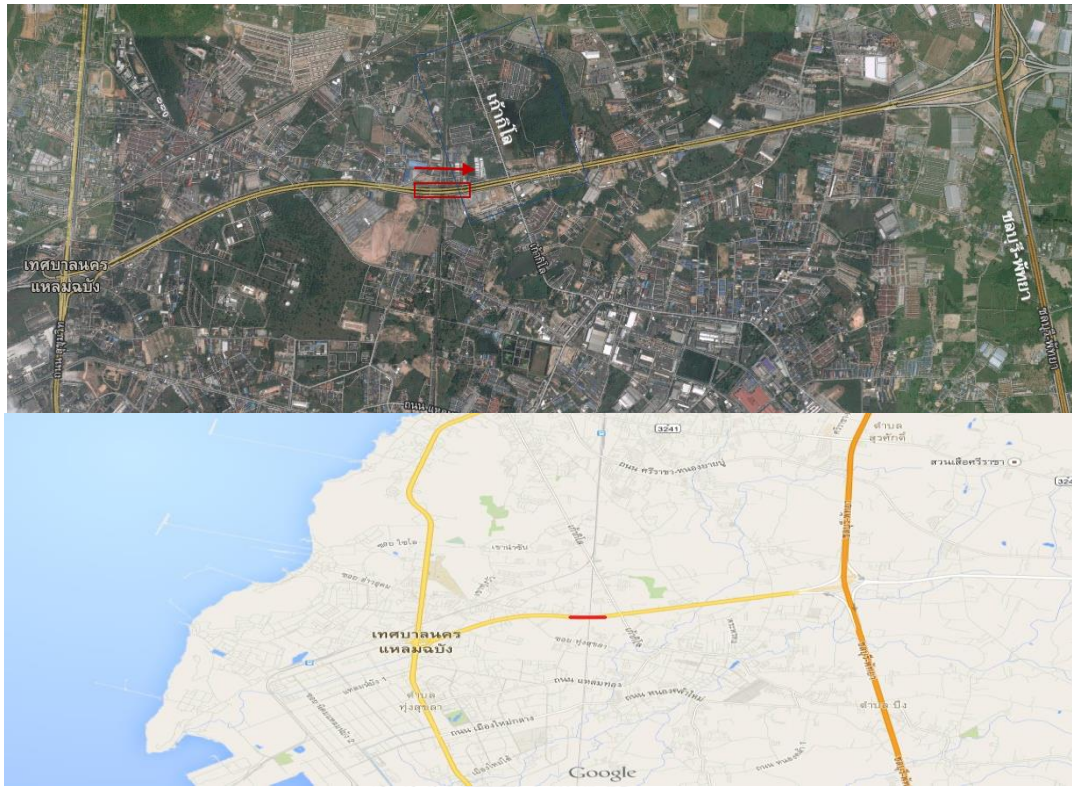
### การทดสอบภาคสนาม

จากการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักด้วยวิธีการต่างๆ หลายวิธี แต่ยังคงขาดการศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำของผลการทายน้ำหนักกรณีในแต่ละวิธี โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบจริงภาคสนามเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการศึกษาเปรียบเทียบการหาน้ำหนักด้วยวิธีต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมการทดสอบสะพานภาคสนาม ซึ่งจะประกอบด้วยเหตุผลในการเลือกสะพานสำหรับการทดสอบ ลักษณะของรถบรรทุก ตำแหน่งและขั้นตอนการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อประเมินความถูกต้องของการหาน้ำหนัก และพัฒนาระบบให้สามารถใช้งานจริงได้ต่อไป

เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมีความแม่นยำหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดนั้น ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำมาเป็นองค์ประกอบในการคำนวณเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยมีหลายปัจจัยเช่น ลักษณะของสะพานที่จะทำการทดสอบ จำนวนรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานวัสดุอุปกรณ์ในการติดตั้งเก็บข้อมูล สภาวะแวดล้อมบริเวณโดยรวม เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะนำพาให้การทดสอบสะพานเป็นไปอย่างสะดวกและทำให้ได้ข้อมูลเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบที่ค่อนข้างดีคือที่ไม่เบี่ยงเบนจากความเป็นความจริงมากมาทำการคำนวณ ทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความแม่นยำน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

#### 3.1 ข้อมูลทั่วไปของสะพานที่ทำการทดสอบ

สะพานทั่วไปที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่พบว่าเป็นสะพานคอนกรีตที่เป็นโครงสร้างระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูป สะพานตัวอย่างที่เลือกใช้ในการทดสอบ เป็นสะพานบนทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ตอนทางแยกต่างระดับหนองขาม - ท่าเรือแหลมฉบังข้ามทางรถไฟ กม. 4+547.5 เป็นสะพานข้ามทางรถไฟ (ฝั่งขาไปชลบุรี) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ในความดูแลของสำนักบำรุงทางชลบุรีที่ 2



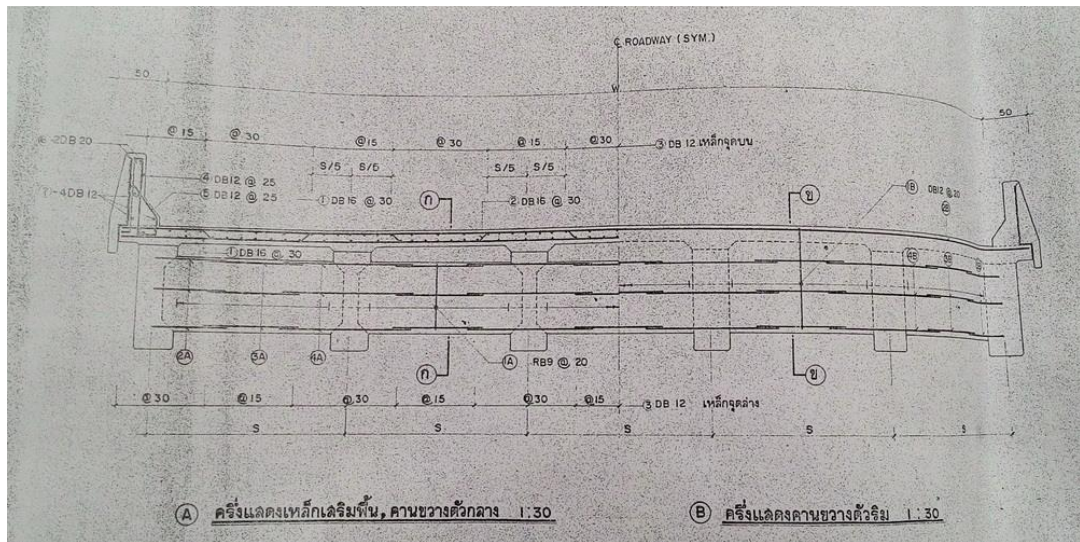
รูปที่ 3.1 ภาพจากดาวเทียมแสดงตำแหน่งสะพานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.2 มุมมองต่างๆ บริเวณสะพานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ



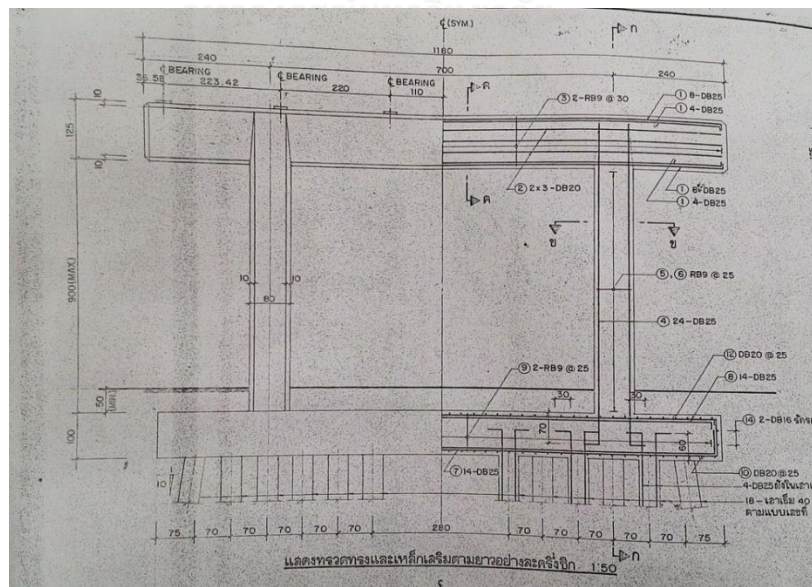
ลักษณะโครงสร้างของสะพานยึดตามแบบก่อสร้างที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง กรมทางหลวง โดยคานสะพานที่ทำหน้าที่รับพื้นสะพานมีจำนวน 6 ตัว ระยะห่างระหว่างคานช่วงในมีค่าเท่ากับ 2.20 เมตร โดยแสดงมุมมองภาคตัดโครงสร้างส่วนบนเป็นไปตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มุมมองภาคตัดโครงสร้างส่วนบนของสะพานที่ทำการทดสอบ

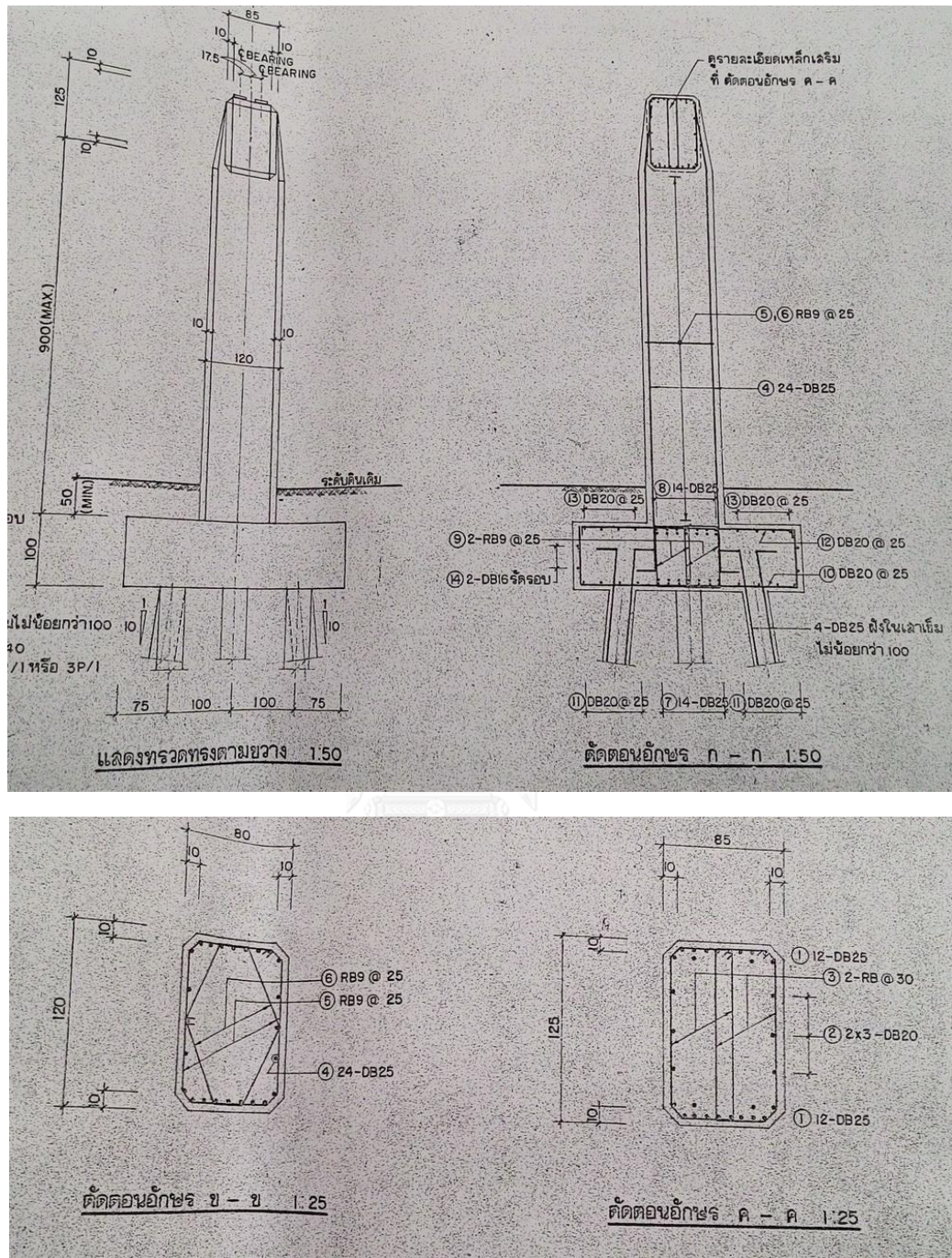
โครงสร้างส่วนล่างมีลักษณะเป็น Pier Column แบบคานขวางวางบนเสาจำนวน 2 ต้น ดังรูปที่

3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะของโครงสร้างส่วนล่างของสะพานที่ทำการทดสอบ

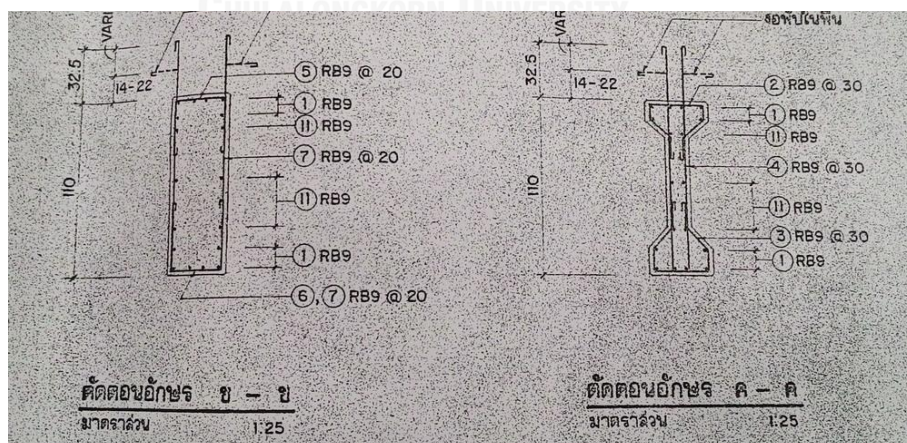
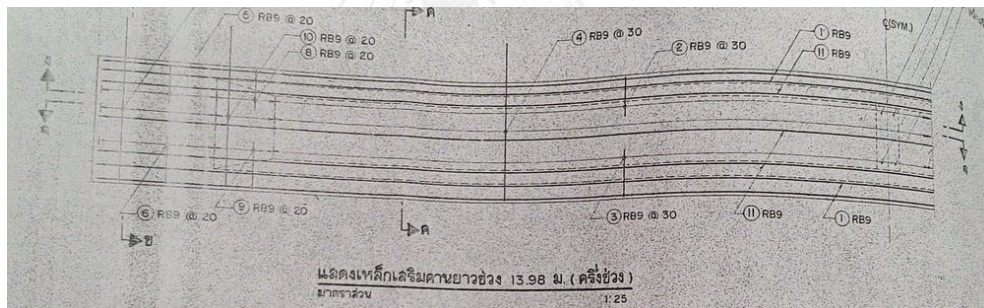
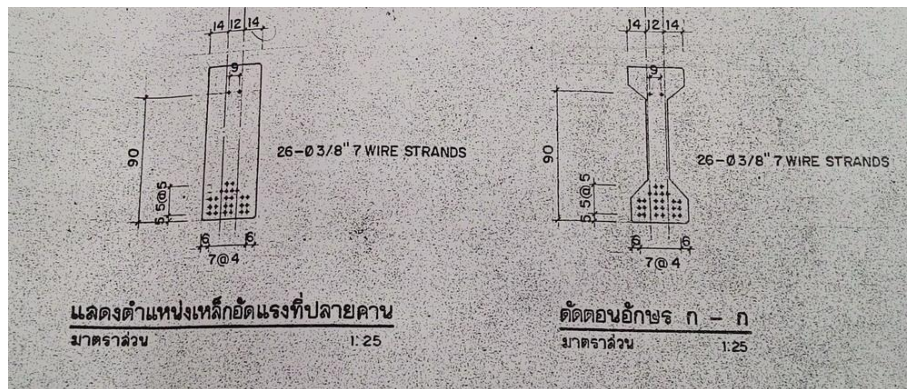
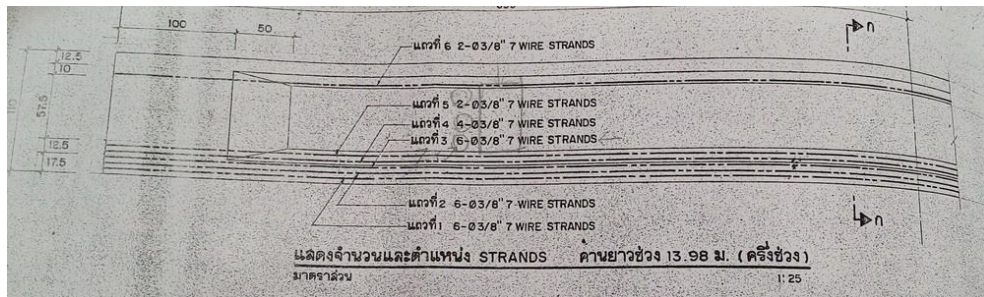




รูปที่ 3.5 ลักษณะของโครงสร้างส่วนล่างของสะพานที่ทำการทดสอบ(ต่อ)



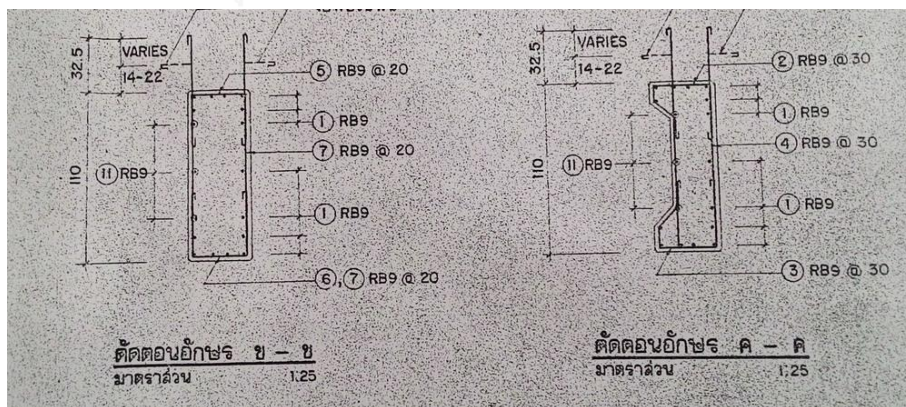
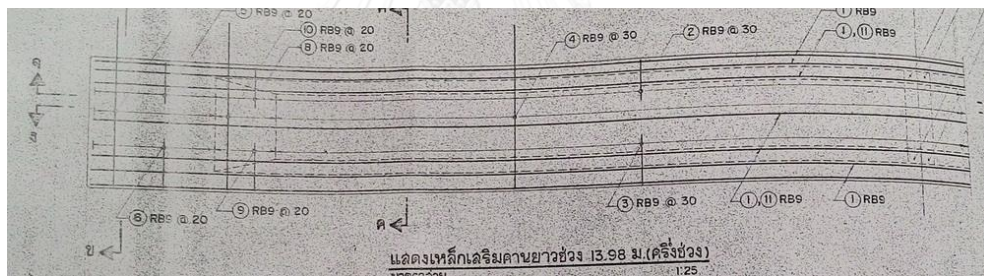
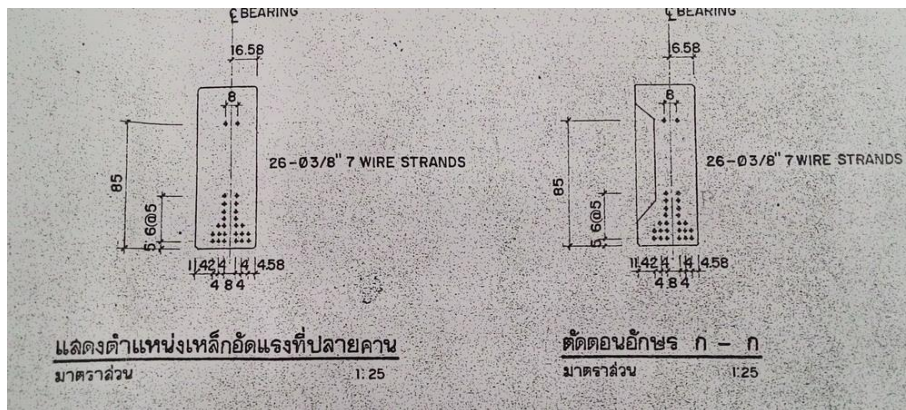
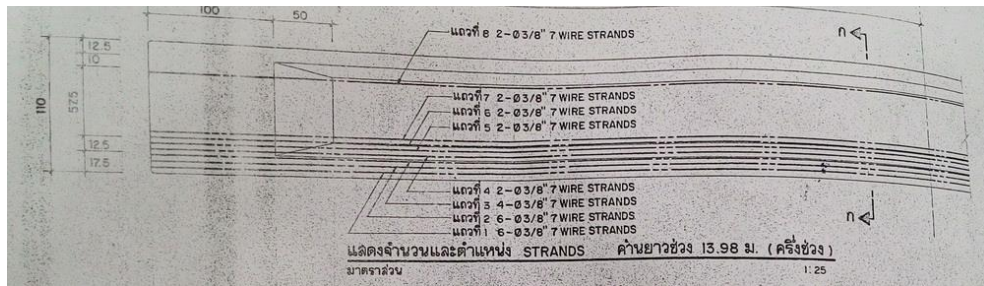
ลักษณะการเสริมเหล็กในคานสะพานตัวกลางช่วง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเสริมเหล็กในคานสะพานตัวกลางช่วงของสะพานที่ทำการทดสอบ



ลักษณะการเสริมเหล็กในคานสะพานตัวริมช่วง แสดงดังรูปที่ 3.7

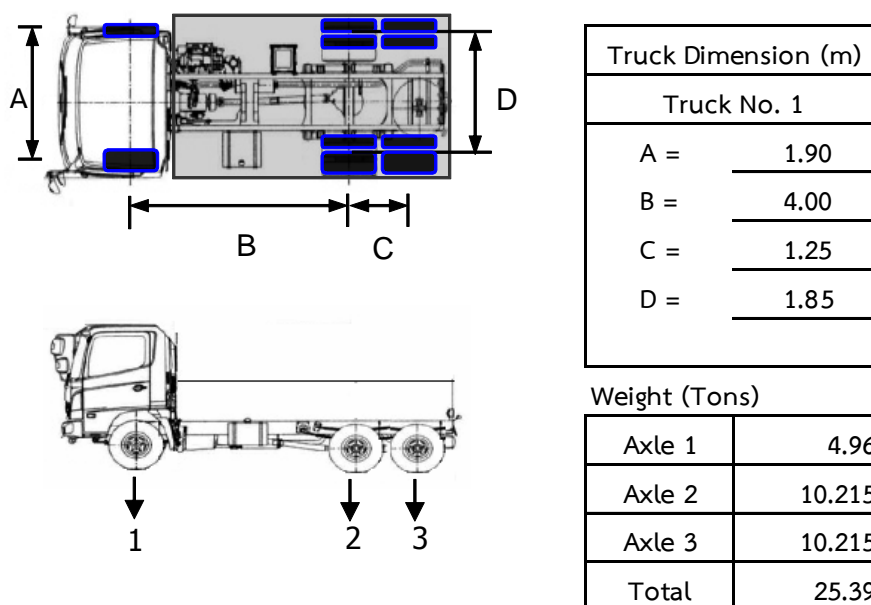


รูปที่ 3.7 การเสริมเหล็กในคานสะพานตัวริมช่วงของสะพานที่ทำการทดสอบ

สะพานทดสอบที่เลือกในการทดสอบนี้เป็นสะพานขนาดใหญ่ และมีปริมาณรถบรรทุกที่วิ่งผ่านเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นสะพานที่เป็นถนนสายหลักให้รถแล่นผ่านเข้าสู่บริเวณท่าเรือแหลมฉบัง ซึ่งเป็นจุดรับ-ส่งสินค้าขนาดใหญ่แห่งหนึ่งของประเทศไทย โดยโครงสร้างของสะพานทดสอบจะมีลักษณะส่วนบนเป็นแบบ I-Girder มีความกว้างสะพานรวมเท่ากับ 11.00 เมตร ความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 14 เมตร คานของสะพานที่ทำหน้าที่รับพื้นสะพานมีจำนวน 6 ตัว ระยะห่างระหว่างคานช่วงในมีค่าเท่ากับ 2.20 เมตรซึ่งบริเวณใต้สะพานมีบริเวณพื้นที่โล่ง ไม่มีน้ำขัง และไม่มียานพาหนะสัญจรผ่านทำให้สามารถทำงานได้ง่ายและสะดวก

### 3.2 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

ในทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกนั้น เป็นการทดสอบเพื่อนำข้อมูลไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองของสะพานที่ตรวจวัดกับค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำบนสะพาน และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของโครงสร้างสะพาน โดยการทดสอบนี้ได้เลือกใช้รถบรรทุกสิบล้อที่มีเพลาทั้งสิ้น 3 เพลา มีน้ำหนักรวม 25.39 ตัน โดยขนาดและน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่ใช้ทดสอบเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ในการทดสอบ

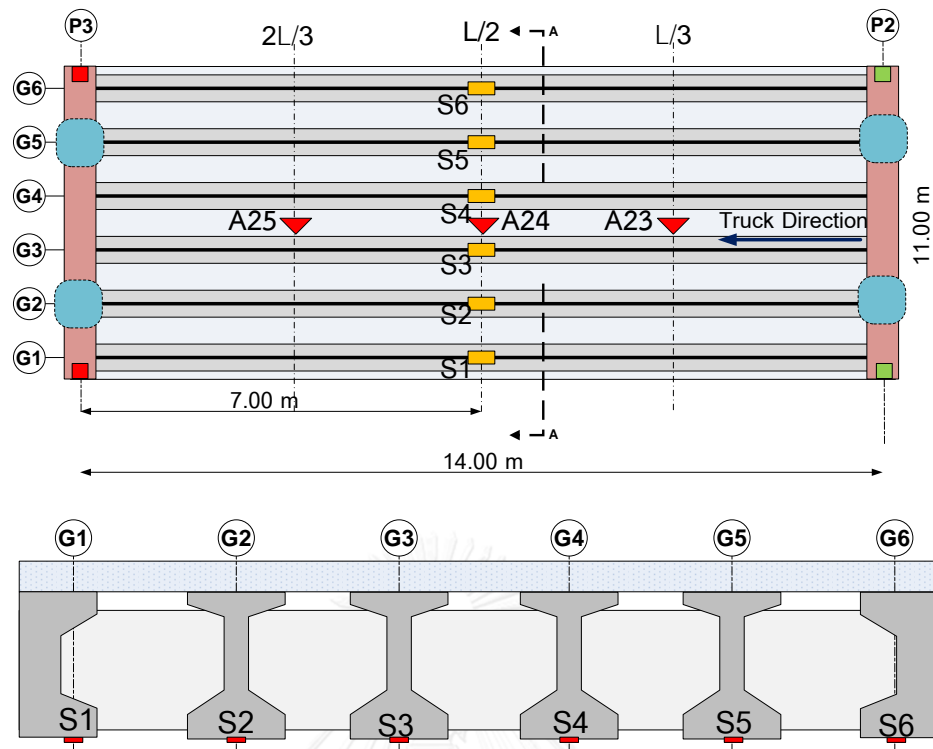
รถบรรทุกข้างต้นนั้นเป็นรถบรรทุกที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในประเทศไทย ซึ่งต่างจากรถบรรทุกต่างประเทศหรือรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ในกำหนดมาตรฐานการออกแบบสะพาน เพื่อให้ได้ผลที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงในประเทศจึงเลือกใช้รถบรรทุกลักษณะดังกล่าว

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

เมื่อได้สะพานทดสอบและสำรวจบริเวณโดยรอบแล้วเสร็จจึงได้เริ่มดำเนินงานภาคสนาม โดยเริ่มจากการติดตั้งตู้คอนเทนเนอร์บริเวณใต้สะพาน เพื่อใช้เป็นที่พักและเก็บอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงานตรวจวัด เช่น คอมพิวเตอร์ กล้องวิดีโอ อุปกรณ์เครื่องมือช่าง อุปกรณ์สำรองสำหรับสลับเปลี่ยนในกรณีฉุกเฉิน อุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ ในการส่งสัญญาณข้อมูล เป็นต้น ที่บริเวณท้องสะพานได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (strain gage) ตัววัดสัญญาณความเร่ง (acceleration transducer) และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (axle detector) ที่ราวสะพาน ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 นอกจากนี้ยังได้ทำการติดกล้องวิดีโอเพื่อบันทึกพฤติกรรมของรถที่วิ่งผ่านบนสะพานอีกด้วย



รูปที่ 3.9 การติดตั้งตู้คอนเทนเนอร์เพื่อใช้ในการดำเนินงานตรวจวัดที่ใต้สะพาน



Note : S = Concrete Strain Gauge (x6), A = Acceleration Transducer  
 ■ = Axle Detector

รูปที่ 3.10 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

### 3.3.1 มาตรการวัดความเครียด (Strain gauge)

ใช้มาตรการวัดความเครียดยี่ห้อ TML รุ่น PL-90-11-1L ทำการติดเข้ากับสะพานในตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัดตามรูปที่ 3.9 จากนั้นใช้เทปกาวปิดทับเพิ่มเพื่อป้องกันความชื้นเนื่องจากฝนหรือปัจจัยอื่นๆ โดยที่มาตรการวัดความเครียดและการติดตั้ง แสดงในรูปที่ 3.11





รูปที่ 3.11 มาตรการวัดความเครียดและการติดตั้ง ณ สะพานที่ทำการทดสอบ

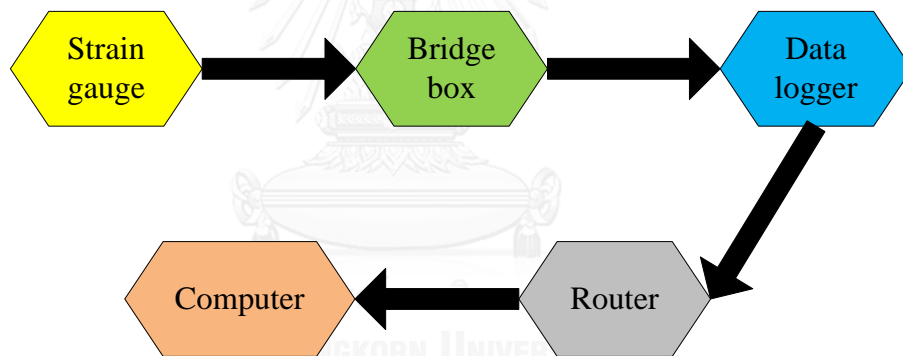
### 3.3.2 ระบบบันทึกข้อมูล

ในการบันทึกข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ได้ทำการเชื่อมต่อมาตรวัดความเครียด ตัวแปรสัญญาณการเคลื่อนที่ และตัวแปรสัญญาณความเร่งผ่านทางสายแลน (Cable Unshield Twist Pair) เข้ากับกล่องเก็บข้อมูล (data logger) โดยที่กล่องเก็บข้อมูลมีการเชื่อมต่อไปสู่คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้เป็นระบบบันทึกข้อมูลผ่านทางสายแลนเช่นเดียวกัน และถ่ายโอนข้อมูลการทดสอบที่ได้ไปสู่หน่วยความจำภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12





รูปที่ 3.12 อุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆที่ใช้การเก็บข้อมูล

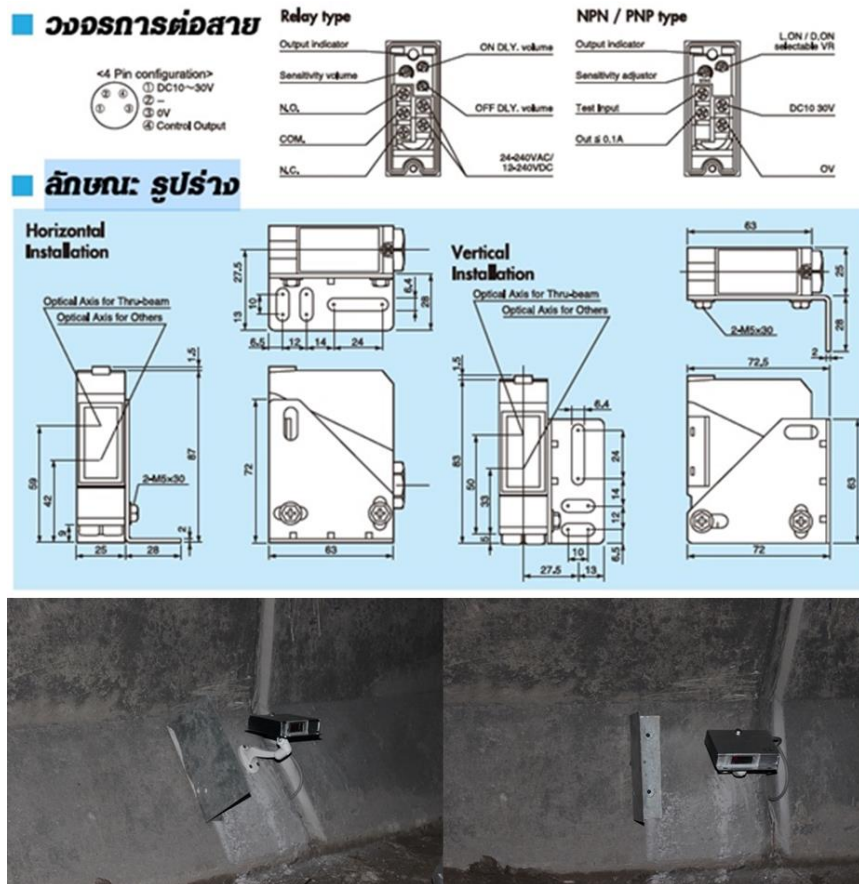


รูปที่ 3.13 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เก็บข้อมูล

### 3.3.3 เครื่องตรวจจับเพลลา (Axle Detector)

ใช้เครื่องตรวจจับเพลลาี่ห้อ OPTEX รุ่น NPN\_VT-4000 มีระยะการตรวจจับที่ 40 เมตร ตัวส่งสัญญาณเป็นระบบไฟ LED สีแดง และตัวรับสัญญาณเป็นระบบรีเลย์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ระบุตำแหน่งของเพลลาขณะวิ่งอยู่บนสะพาน มีลักษณะเป็นคู่คือตัวส่งและตัวรับสัญญาณระบบ Infrared โดยจะทำการติดตั้งบริเวณราวกันตกในช่วงขาเข้าสะพาน และขาออกของสะพาน เมื่อรถวิ่งผ่านจุดตัดสัญญาณขาเข้าและขาออกจะได้สัญญาณเพลลาของรถที่วิ่งผ่านซึ่งข้อมูลการตัดเพลลานี้จะนำไปคำนวณความเร็วของรถที่ต้องการพิจารณา โดยข้อมูลจะ

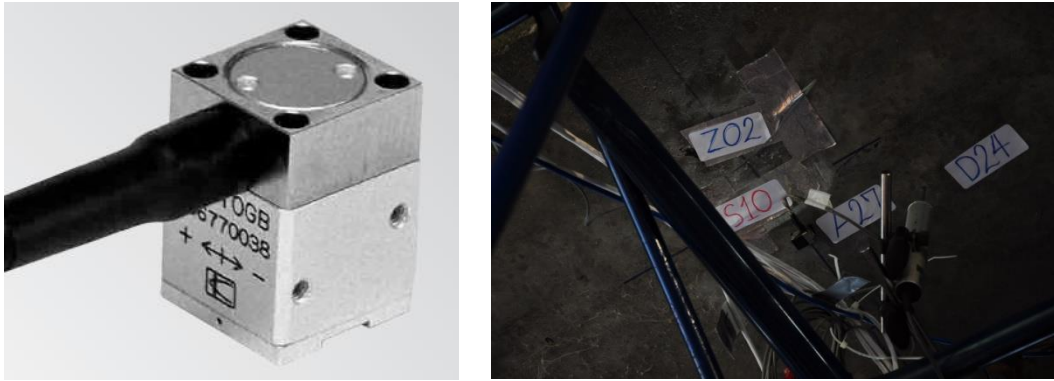
ระบุตำแหน่งของเพลารถ เพื่อนำไปประเมินพฤติกรรมของสะพานได้ซึ่งเครื่องตรวจจับเพลานี้แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องตรวจจับเพลานี้ทำการติดตั้งบนสะพาน

### 3.3.4 ตัววัดสัญญาณความเร่ง (Acceleration Transducer)

ในการตรวจวัดความเร่งเพื่อนำไปศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน เลือกใช้ตัววัดสัญญาณความเร่งยี่ห้อ KYOWA รุ่น AS-2GB ทำการติดตั้งเข้ากับสะพานโดยใช้เทปใสพันโดยรอบและติดเข้ากับสะพานโดยใช้กาวที่มีการยึดเหนี่ยวสูง แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัววัดสัญญาณความแรงและการติดตั้งที่หน้างาน

### 3.3.5 กล้องวิดีโอ

เพื่อใช้บันทึกวิดีโอของรถที่วิ่งผ่านสะพาน เพื่อใช้ในการประเมินพฤติกรรมของสะพาน ทั้งการแยกประเภทรถ และใช้ตรวจสอบความถูกต้องของค่าสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดมาได้ โดยทำการติดตั้งไว้บนขอบทางของ Barrier บริเวณกึ่งกลางของช่วงความยาวสะพานดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กล้องวิดีโอบันทึกภาพที่ทำการติดตั้งบนสะพาน

## 3.4 การทดสอบภาคสนาม

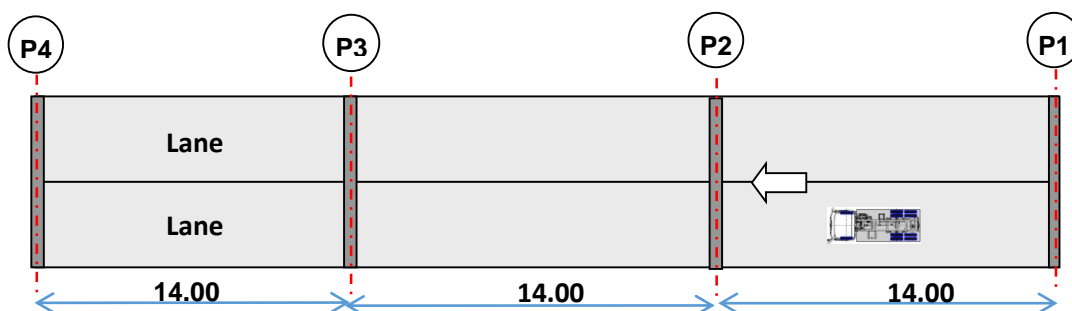
ในการทดสอบภาคสนามครั้งนี้ได้เลือกทดสอบในช่วงสะพานที่อยู่ระหว่างตอม่อที่ 2 และตอม่อที่ 3 ในทิศทางขาออกจากท่าเรือแหลมฉบังโดยช่วงสะพานดังกล่าวมีพื้นที่บริเวณใต้สะพานที่สามารถใช้ในการทดสอบและมีระดับความสูงถึงท้องสะพานที่เหมาะสมกับการทำการติดตั้งอุปกรณ์

การทดสอบสะพานด้วยรถบรรทุกที่ทราบน้ำหนักมีรูปแบบการทดสอบทั้งหมด 18 กรณี การทดสอบกระทำโดยการเคลื่อนรถบรรทุกทดสอบที่ช่องจราจรบนสะพานที่แตกต่างกัน ได้แก่ ช่องจราจรด้านซ้ายและด้านขวา และในแต่ละกรณีจะเคลื่อนรถบรรทุกด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วช้ามาก (ไม่เกิน 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ความเร็วช้า (15 - 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และความเร็วปานกลาง (25 - 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) รายละเอียดการทดสอบทั้ง 18 กรณีแสดงในตารางที่ 3.1

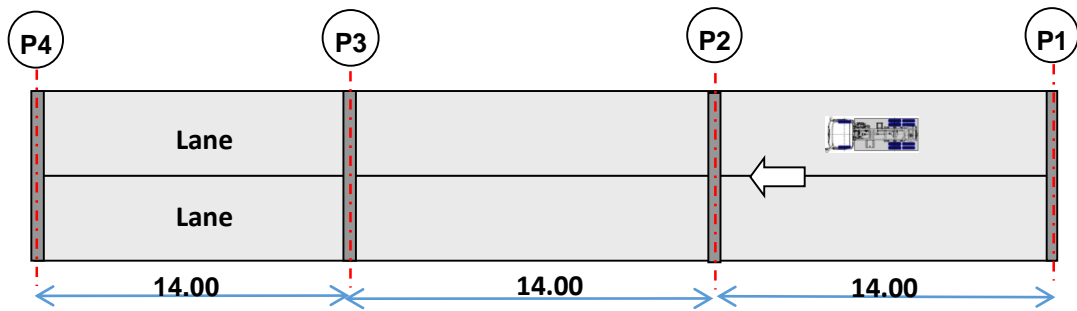
ตารางที่ 3.1 รูปแบบการทดสอบสะพาน

กรณี	ช่องจราจร	ความเร็ว
1,2,3	ซ้าย	ไม่เกิน 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
4,5,6	ขวา	ไม่เกิน 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
7,8,9	ซ้าย	15 - 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
10,11,12	ขวา	15 - 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
13,14,15	ซ้าย	25 - 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
16,17,18	ขวา	25 - 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรที่ 1 (ช่องจราจรซ้าย) ที่ความเร็วต่างๆ และจากรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรที่ 2 (ช่องจราจรขวา) ที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 3.17 การทดสอบในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรที่ 1 (ช่องจราจรซ้าย) ที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 3.18 การทดสอบในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งในช่องจราจรที่ 2 (ช่องจราจรขวา) ที่ความเร็วต่างๆ

ทั้งนี้ในการทดสอบมีการกำหนดรูปแบบการทดสอบให้ครอบคลุมรูปแบบต่างๆที่จะเกิดขึ้นในสภาวะการจราจรจริง ไม่ว่าจะเป็นช่องจราจรทั้งสองหรือความเร็วในระดับต่างๆ แต่ด้วยข้อจำกัดในการปิดการจราจรขณะทดสอบทำให้ไม่สามารถทำความเร็วสูงได้



รูปที่ 3.19 การทดสอบโดยใช้รถบรรทุกสลับเคลื่อนผ่านช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ

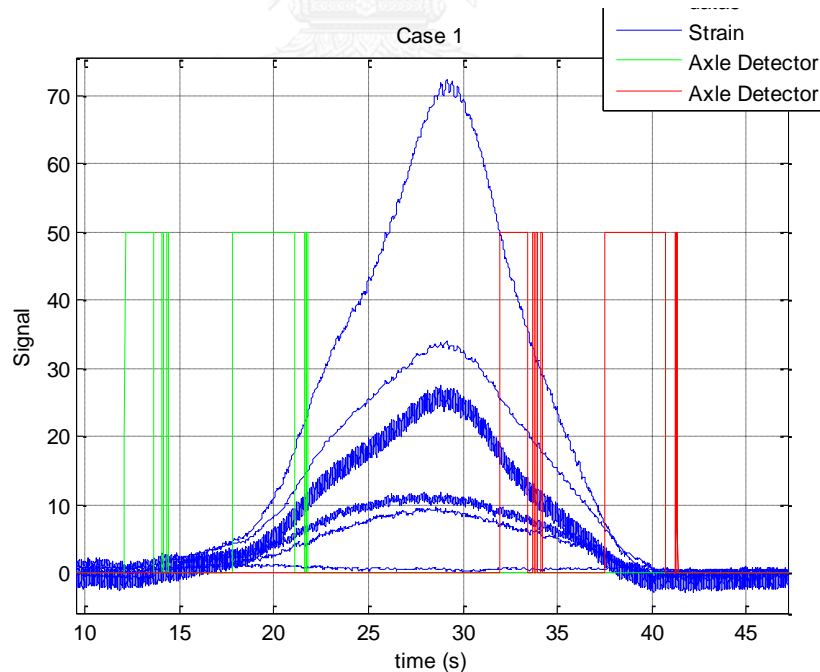
การทดสอบครั้งนี้ได้ทำการทดสอบในเวลาากลางคืนเพื่อหลีกเลี่ยงการจราจรในเวลากลางวันที่ค่อนข้างหนาแน่น โดยทำการปิดการจราจรเพื่อติดตั้งอุปกรณ์บริเวณด้านบนของช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ และนำรถบรรทุกที่ราบน้ำหนักมาวิ่งผ่านช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ จากนั้นทำการวัดระยะเพลาของรถบรรทุกเพื่อนำค่าไปใช้ในการคำนวณต่อไป



## บทที่ 4

### การหาน้ำหนักรถบรรทุก

การทดสอบหาน้ำหนักรถบรรทุกในครั้งนี้ได้นำผลทดสอบจากภาคสนามด้วยรถบรรทุกที่ทราบค่าน้ำหนักและระยะห่างเพลามาทำการหาน้ำหนักด้วยวิธีเส้นอิทธิพลทั้ง 3 วิธีได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง ตามทฤษฎีที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยนำผลตอบสนองที่จะต้องใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกมาจัดเตรียมและตรวจสอบความถูกต้องเพื่อใช้ในลำดับถัดไป โดยผลตอบสนองที่ใช้จะมี ค่าความเครียดที่วัดได้จากตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ผลการตรวจจับเพลาทิ้งขาเข้าและขาออก นอกจากนี้ยังใช้ค่าความเร่งที่บันทึกได้ในระหว่างการทดสอบมาทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติเพื่อใช้ส่วนของการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต ในลำดับแรกจะนำผลตอบสนองค่าความเครียดและผลการตรวจจับเพลามาตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่



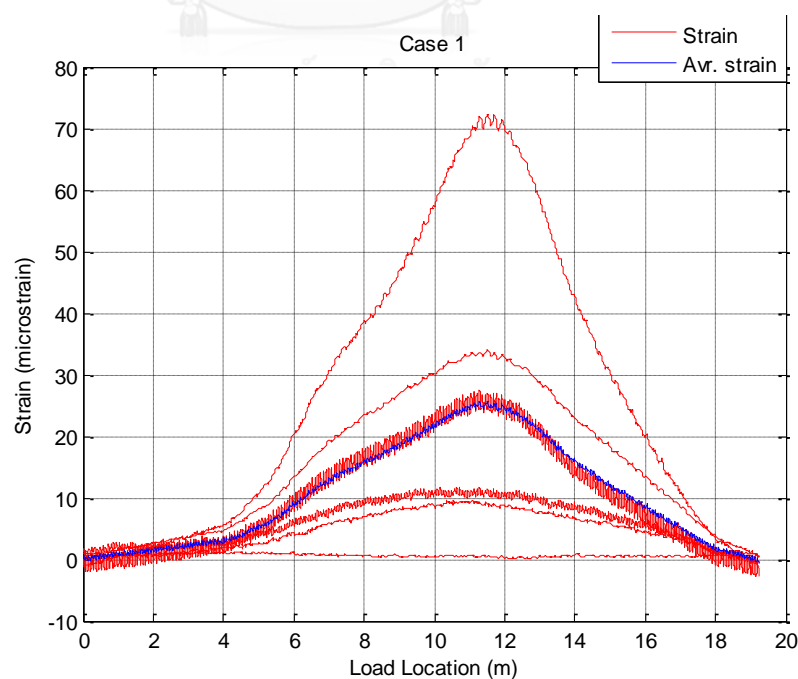
รูปที่ 4.1 สัญญาณของผลตอบสนองสะพานในการทดสอบกรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองค่าความเครียดของสะพานและผลจากการตรวจจับสนิทมีความสอดคล้องกัน โดยเมื่อรถบรรทุกผ่านอุปกรณ์ตรวจจับสนิทเข้านั้นค่าความเครียดของสะพานก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อรถบรรทุกผ่านอุปกรณ์ตรวจจับสนิทออกแล้วนั้นค่าความเครียดก็ลดลงจนมีค่าปกติเหมือนช่วงที่รถบรรทุกยังไม่ผ่านอุปกรณ์ตรวจจับสนิทเข้า

ในลำดับแรกนั้นจะนำค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสนิทมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาช่วงที่รถบรรทุกเข้าและออกจากช่วงสะพานที่ทำการทดสอบรวมถึงระยะเพลลา และนำค่าตำแหน่งที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านช่วงสะพานที่ทำการทดสอบไปหาค่าความเร็วเพื่อใช้ในการหาน้ำหนักรถบรรทุกต่อไป

#### 4.1 การหาเส้นอิทธิพลของผลตอบสนองสะพาน

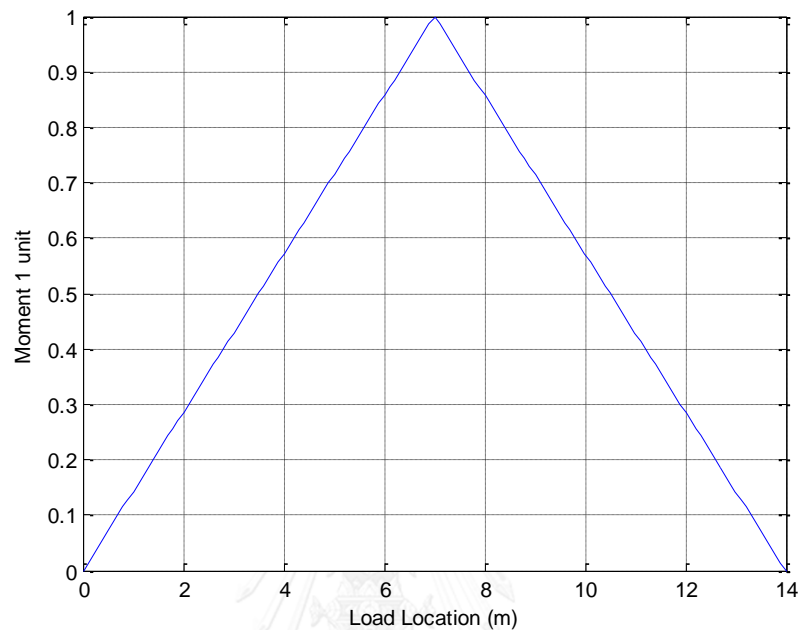
เมื่อได้ข้อมูลค่าความเครียดของการทดสอบแต่ละกรณีแล้ว จะนำค่าความเครียดในแต่ละตำแหน่งมาหาเฉลี่ยเพื่อใช้ค่าความเครียดเฉลี่ยเป็นตัวแทนค่าความเครียดของสะพานนำไปใช้ในการหาเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง ส่วนของเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิตและเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัตนั้นสามารถสร้างได้โดยใช้ทฤษฎีตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดย รูปที่ 4.2 แสดงการเฉลี่ยค่าความเครียดจากผลการทดสอบในกรณีที่ 1



รูปที่ 4.2 การเฉลี่ยค่าความเครียดของในการทดสอบกรณีที่ 1

#### 4.1.1 การหาเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต

จากสมการที่ (2.1) สามารถหาเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิตได้ตามรูปด้านล่าง ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักบรรทุกต่อไป

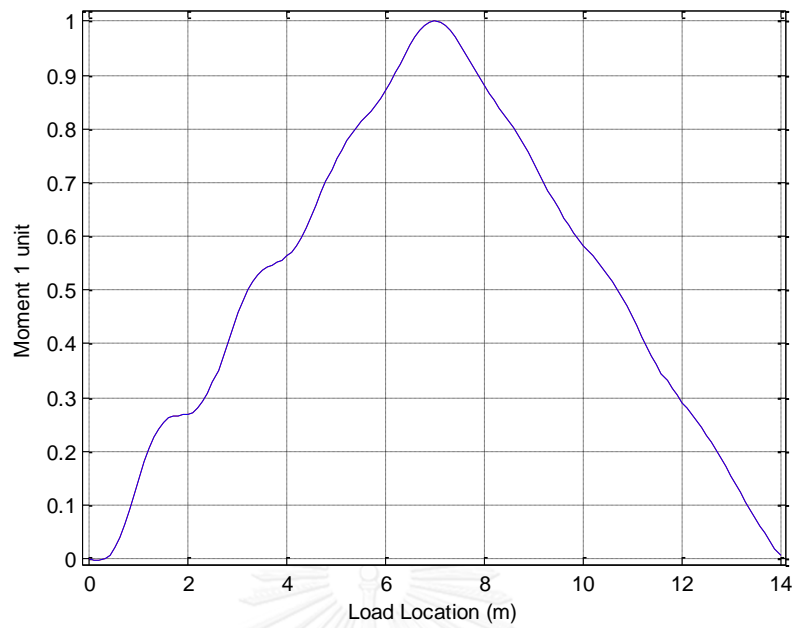


รูปที่ 4.3 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต

#### 4.1.2 การหาเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต

จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) สามารถหาเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัตได้ตามรูปด้านล่าง ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักบรรทุกต่อไป

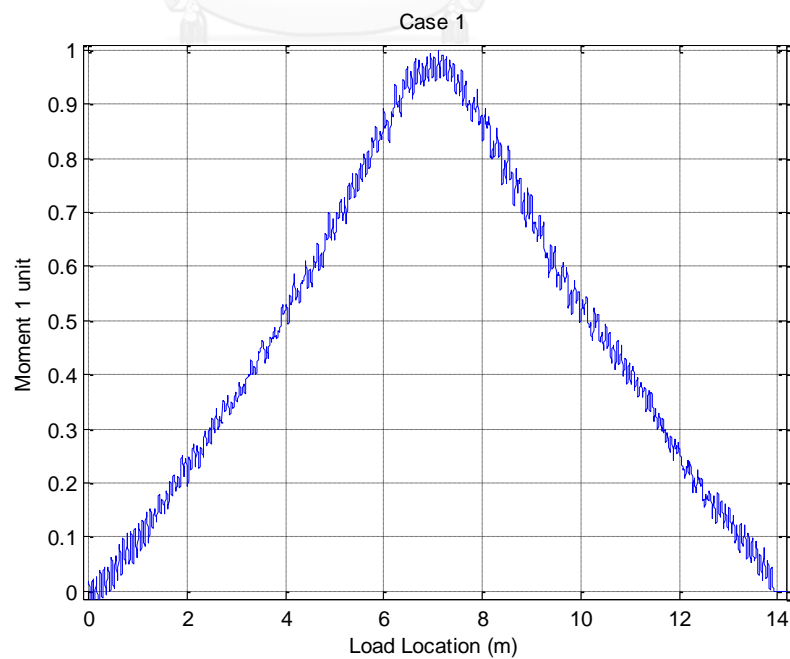




รูปที่ 4.4 เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต

#### 4.1.3 การหาเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง

จากสมการที่ (2.5) สามารถหาเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงได้ตามรูปด้านล่าง ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาน้ำหนักบรรทุกต่อไป

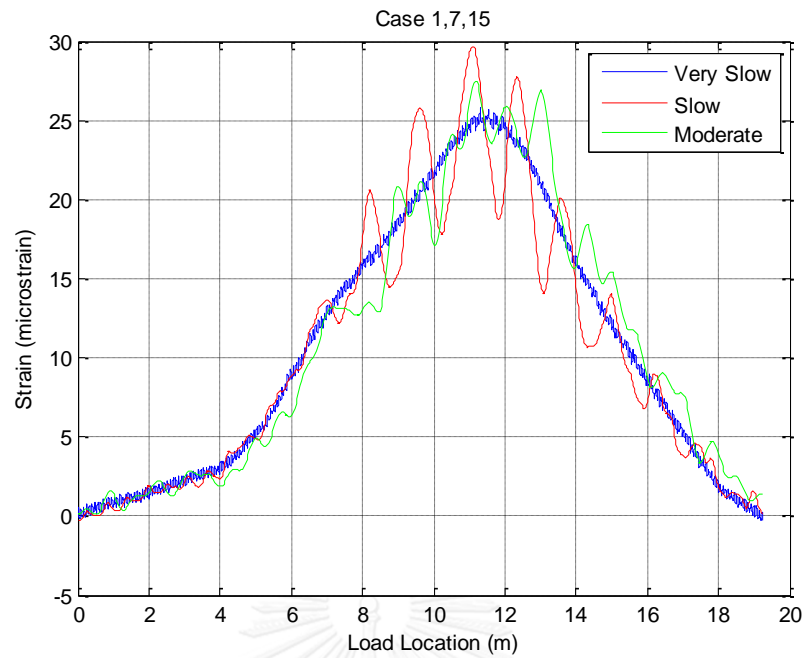


รูปที่ 4.5 เส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงจากผลการทดสอบกรณี 1

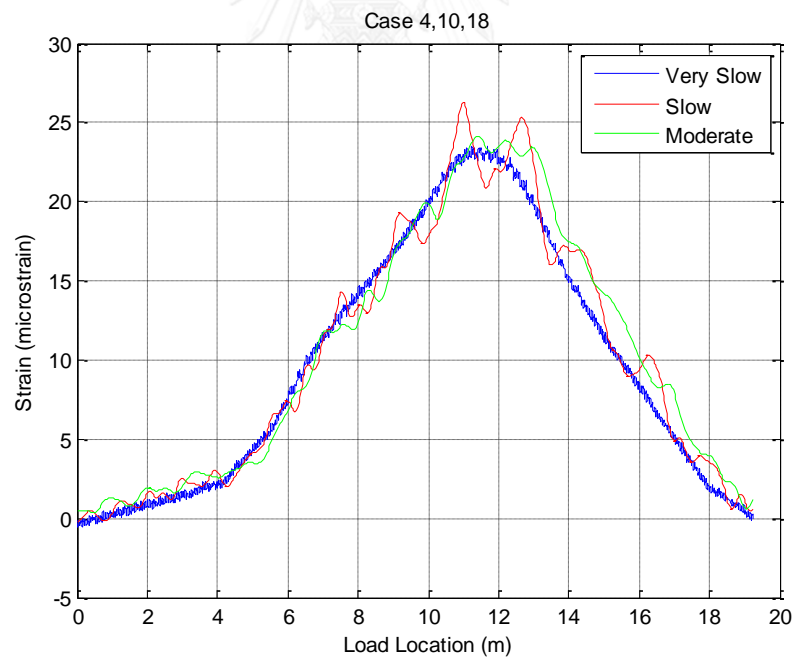
การวิเคราะห์เพื่อหาเส้นอิทธิพลที่จะใช้เป็นตัวแทนที่เหมาะสมในการหาน้ำหนักบรรทุกของทุกกรณีนั้นได้ทำการแยกพิจารณาออกเป็นหลายขั้นตอน เนื่องจากมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการหาน้ำหนักบรรทุก โดยจะกล่าวถึงอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อหาน้ำหนักบรรทุกในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ในลำดับต่อไป ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของผลการแยกพิจารณาในกรณีต่างๆ ไว้ในส่วภาคผนวก โดยที่ผลของเส้นอิทธิพลแบบสถิตินั้นจะแสดงดังตารางที่ ผ. 1 ถึง ตารางที่ผ.8 เส้นอิทธิพลแบบสถิตินั้นจะแสดงดังตารางที่ ผ. 9 ถึง ตารางที่ผ.16 และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงนั้นจะแสดงดังตารางที่ ผ. 17 ถึง ตารางที่ผ.26

#### 4.2 อิทธิพลของความเร็วของรถบรรทุกต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก

เมื่อทำการพิจารณาค่าความเครียดเฉลี่ยจากกรณีที่ค่าความเร็วของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบโดยเคลื่อนที่ในช่วงสะพานแตกต่างกันแล้วเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบระดับต่างๆ พบว่ารถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วสูง จะเป็นการส่งผลทำให้ค่าความเครียดเฉลี่ยมีลักษณะสัญญาณที่แปรปรวนมากขึ้น กล่าวคือในการที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็วสูงจะส่งผลทำให้เกิดแรงทางพลศาสตร์ที่ล้อรถกระทำกับสะพานมากกว่ารถบรรทุกที่วิ่งด้วยความเร็วที่ช้ากว่าดังแสดงในภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.7 ซึ่งแรงทางพลศาสตร์ที่ล้อรถบรรทุกกระทำกับผิวทางของสะพานมีค่าสูงมากขึ้นจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความเครียดเฉลี่ยในกรณีดังกล่าวนี้จะไม่สอดคล้องกับค่าความเครียดที่ใช้เปรียบเทียบการหาน้ำหนัก ซึ่งจะส่งผลทำให้ลักษณะแรงในเพลลาของรถบรรทุกที่หาได้มีความแปรปรวนสูง ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น เนื่องจากการหาน้ำหนักบรรทุกจะใช้การเฉลี่ยแรงในเพลลาของรถบรรทุก



รูปที่ 4.6 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีที่ 1, 7 และ 15



รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีที่ 4, 10 และ 18

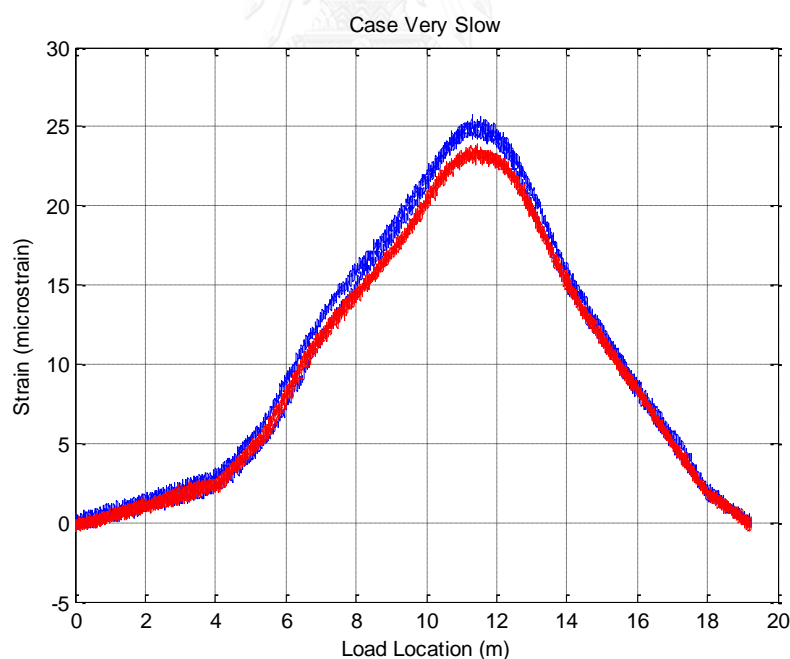
จากนั้นทำการสังเกตค่าความคลาดเคลื่อนของเพลาน้ำ เพลาลัง และน้ำหนักรวม ทั้งกรณี  
ที่คิดค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และกรณีที่คิดค่าความคลาดเคลื่อน

แบบผลต่างพบว่า เมื่อรถบรรทุกที่ทำการทดสอบวิ่งข้ามสะพานด้วยความเร็วที่สูงก็จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มสูงมากขึ้นเช่นกัน

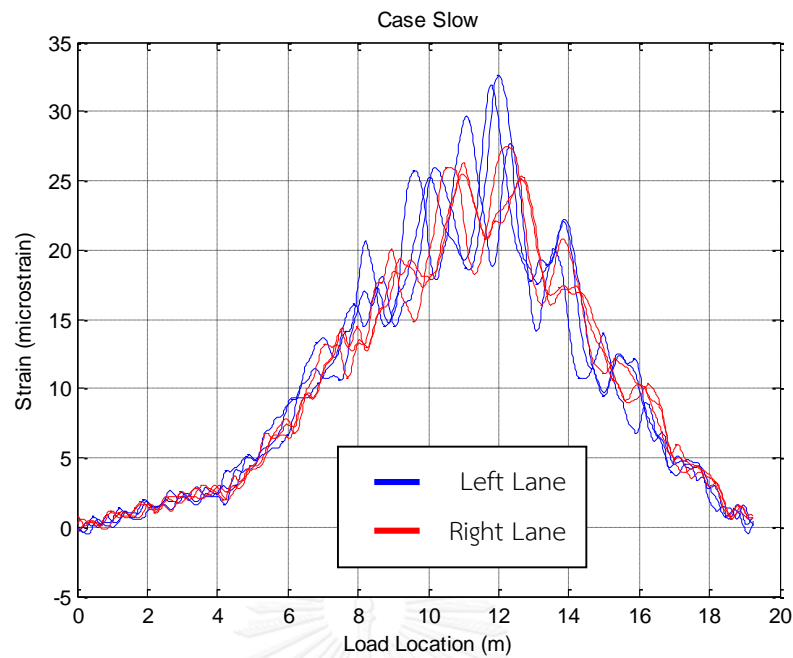
อย่างไรก็ดีการทดสอบในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบโดยมีช่วงของความเร็วรถบรรทุกอยู่ในช่วงไม่เกิน 35 กม./ชม.เท่านั้นเพราะมีข้อจำกัดในการทดสอบ

#### 4.3 อิทธิพลของช่องจราจรต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก

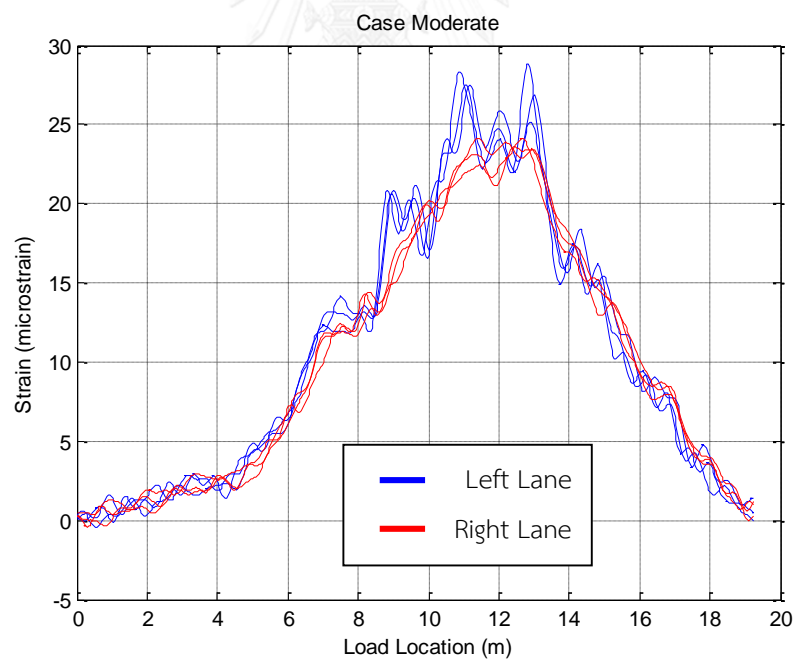
การพิจารณาค่าความเครียดเฉลี่ยจากกรณีการเลือกใช้ช่องจราจรของรถบรรทุกในการเคลื่อนที่ในช่วงสะพานที่แตกต่างกันแล้วเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบระดับต่างๆ พบว่าเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยช่องจราจรที่ต่างกัน จะส่งผลทำให้มีค่าความเครียดเฉลี่ยมีค่าที่ต่างกันด้วย ดังนั้นการที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานในช่องจราจรซ้ายก็จะเกิดค่าความเครียดสูงกว่ารถบรรทุกที่วิ่งในช่องจราจรขวาที่ใช้ความเร็วใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้ยากต่อการเปรียบเทียบและการหาน้ำหนักในระบบเดียวกัน จึงได้ทำการแบ่งกรณีทดสอบออกเป็นกรณีที่วิ่งในช่องจราจรซ้ายและกรณีที่วิ่งในช่องจราจรขวาซึ่งจะใช้ค่าเปรียบเทียบแยกกัน



รูปที่ 4.8 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วช้ามาก



รูปที่ 4.9 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วช้า



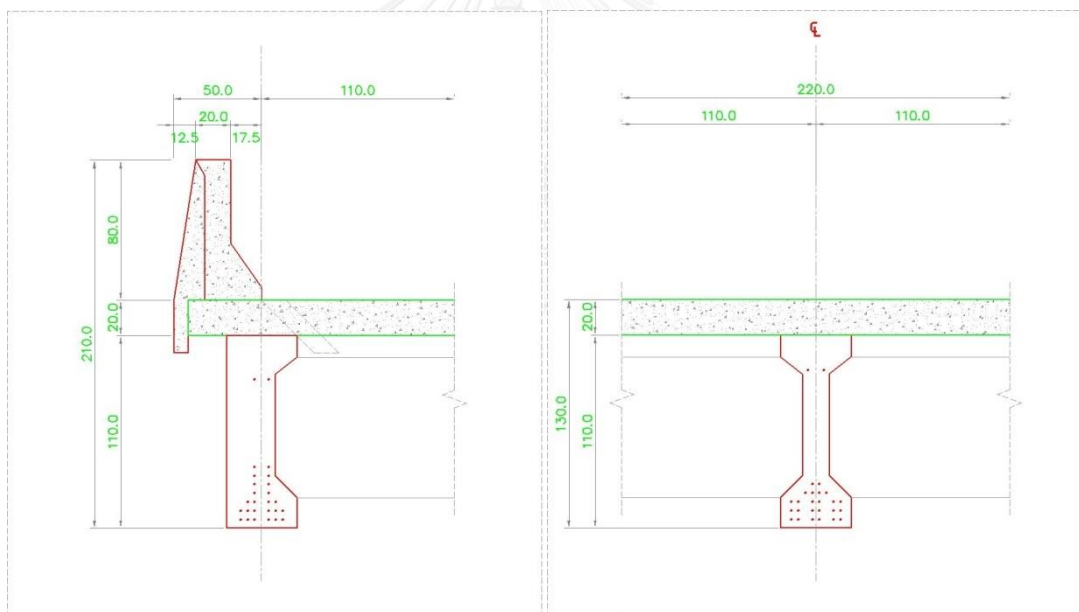
รูปที่ 4.10 ค่าความเครียดของสะพานในการทดสอบกรณีรถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วปกติ

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของช่องจราจรโดยจะทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยแยกกันของทั้งสองกรณี คือค่าเปรียบเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งช่องจราจรซ้ายและค่าเปรียบเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยในกรณีที่รถบรรทุกวิ่งช่องจราจรขวา เพื่อจัดผล

ของความไม่เท่าของค่าความเครียดเฉลี่ยของทั้งสองกรณีออกไป โดยอาศัยค่าเปรียบเทียบใน 2 กรณี โดยการศึกษาครั้งนี้เมื่อนำค่าความเครียดเฉลี่ยของแต่ละกรณีมาคูณด้วยค่าเปรียบเทียบของแต่ละกรณี แล้ว พบว่าค่าความเครียดเฉลี่ยกรณีวิ่งช่องจราจรซ้าย และกรณีวิ่งช่องการจราจรขวา ค่าที่ได้ออกมา ความใกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14

#### 4.4 ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดของสะพาน

วิธีที่จะใช้เปรียบเทียบสะพานจะต้องคำนึงถึงผลของความไม่เท่ากันของหน้าตัด (section modulus) ด้วย จึงได้ทำการหาค่าโมดูลัสหน้าตัด (section modulus) ของหน้าตัดของ แผ่นพื้นคอนกรีตของสะพานที่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดแต่ละตัวในสะพาน โดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ หน้าตัดที่อยู่ติดกับคานด้านนอกทั้งสองฝั่งจะเป็นคานรูปตัวซีรวมถึงมีราวกันตก มี 2 ตัว และหน้าตัดที่อยู่ติดกับคานด้านในจะเป็นคานรูปตัวไอมีทั้งหมด 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 หน้าตัดคานและพื้นของสะพานที่ทำการทดสอบ

เมื่อทำการคำนวณหาค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสหน้าตัดของแต่ละส่วนที่ประกอบด้วย ด้านซ้ายของสะพาน ตรงกลางของสะพาน ด้านขวาของสะพาน มีค่าเท่ากับ 1.49, 1.00 และ 1.49 ตามลำดับ โดยจะนำค่าอัตราส่วนที่ได้นี้มาใช้ในการหาค่าเฉลี่ยความเครียดของแต่ละหน้าตัด ซึ่งจะนำค่าความเครียดที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานของแต่ละหน้าตัด มาหาค่าเฉลี่ย

ความเครียดแบบถ่วงน้ำหนักตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยที่หามาได้นี้จะนำมาหาค่าปรับเทียบแบบจำลองสะพานอีกในขั้นตอนต่อไป

หลักการในการปรับเทียบแบบจำลองครั้งนี้จะทำการปรับเทียบสัญญาณค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการวัดสะพานจริงปรับให้เข้าหาค่าความเครียดที่ได้จากแบบจำลองคาน โดยค่าคุณสมบัติทั้งหมดของสะพาน เช่น ความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตของสะพาน ค่าโมดูลัสของสะพาน ตลอดจนจรรยาวัฏความลึกของแนวแกนสะพานของหน้าตัดสะพาน อ้างอิงมาจากแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงเป็นหลัก โดยเลือกทำการปรับเทียบลักษณะนี้เนื่องจากมีความสะดวกในการทำงานในขั้นตอนที่นำระบบหาน้ำหนักนี้ไปใช้งานจริง ตัวอย่างเช่น กรณีที่นำระบบหาน้ำหนักไปใช้งานกับสะพานอื่นๆ จะสามารถออกแบบระบบการทดสอบได้ โดยนำค่าคุณสมบัติต่างๆของสะพานที่ได้จากแบบมาตรฐานมาใช้ไว้ในระบบก่อน จากนั้นในขั้นตอนของการปรับเทียบแบบจำลองหน้างานจะทำการออกแบบระบบการเก็บสัญญาณ ซึ่งในที่นี้คือ อุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานที่สามารถมีการปรับขยายหรือปรับลดสัญญาณได้ในขณะนั้น ซึ่งทำให้สะดวกในการทำงานมากและให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

จากที่ได้ทำการปรับเทียบค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการวัดสะพานจริงกับค่าความเครียดจากแบบจำลองคาน (จุดรองรับแบบธรรมดา) ที่คำนวณมาจากเส้นอินฟลูเอนซ์ไลน์ของโมเมนต์ดัด โดยได้เลือกใช้น้ำหนักบรรทุกทุกประมาณ 25 ตัน ที่วิ่งด้วยความเร็วต่างๆ (ไม่เกิน 35 กิโลเมตร/ชั่วโมง) บนสะพาน ซึ่งสาเหตุที่ปรับแก้ค่าความเครียดจากการวัด เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าความเครียดเฉลี่ยที่ได้จากสะพานจริงแล้วจะมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดที่ได้จากแบบจำลองของคานค่อนข้างมาก ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลของลักษณะการกระจายแรงตามแนวขวางของสะพานจริงที่มีความแตกต่างกับแบบจำลองที่ใช้ อีกทั้งยังมีผลของความไม่สม่ำเสมอของหน้าตัดสะพานจริงกับแบบมาตรฐานที่ไม่ตรงกันเช่น ความหนาของพื้นจริงของสะพานไม่ตรงตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง และลักษณะของคานรูปตัวไอ หรือคานรูปตัวซีที่มีกำลังแตกต่างจากแบบ ซึ่งในพื้นที่จริงเป็นพื้นโครงสร้างที่ทำมาจากคอนกรีต ชั้นของคอนกรีตเททับ (topping) และชั้นของแอสฟัลท์ (asphalt) ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันซึ่งยากในการหาระยะความลึกของแนวแกนสะพานของหน้าตัดสะพาน โดยการทดสอบในครั้งนี้จะใช้ค่าระยะความลึกของแนวแกนสะพานของหน้าตัดสะพานตามที่ได้คำนวณได้จากแบบก่อสร้างของสะพาน

หลังจากการปรับเทียบผลของความไม่เท่ากันต่างๆระหว่างสะพานที่ทำการทดสอบจริงกับแบบจำลองคานแล้ว ซึ่งผลของความไม่เท่ากันนี้จะถูกปรับเทียบด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่งคือ ค่าพารามิเตอร์

เปรียบเทียบของสะพานช่วงเดียว ดังนั้นจึงจะต้องมีการเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนทำการหาน้ำหนักเพื่อชดเชยผลของความไม่แน่นอนดังกล่าวและเพื่อความถูกต้อง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทายน้ำหนักมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

โดยวิธีที่นำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์  $\beta$  [18] นั้นได้เลือกใช้วิธีการหาค่ายกกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) โดยทำการหาค่าผลต่างยกกำลังสองระหว่างค่าเก็บวัดที่ทำการคูณด้วยพารามิเตอร์  $\beta$  ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งค่าพารามิเตอร์  $\beta$  ที่ทำให้ได้ค่าผลต่างยกกำลังสองนี้มีค่าน้อยที่สุดก็จะเป็นค่า  $\beta$  ที่เราจะนำไปใช้งาน โดยค่า  $\beta$  นี้จะสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชันในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชัน “fmins” ของโปรแกรม MATLAB โดยฟังก์ชันนี้จะใช้ระเบียบวิธีเนลเดอร์-มีดซิมเพลกซ์ (Nelder-Mead simplex) ซึ่งเป็นวิธีค้นหาคำตอบโดยตรง (Direct Search) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (optimization parameter) จากสมการที่ (4.1) นี้จะเห็นว่าค่ามีเครื่องหมาย  $\Sigma$  เนื่องจากได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อหาค่า  $\beta$  จากค่าผลต่างยกกำลังสองของค่าเก็บวัดในแต่ละตำแหน่งที่รถได้เคลื่อนที่บนสะพานรวมกัน

$$E(\beta) = \sum^w \left[ \sum_{i=1}^n (d_{model}^i - \beta d_{measured}^i)^2 \right] \quad (4.1)$$

โดยที่

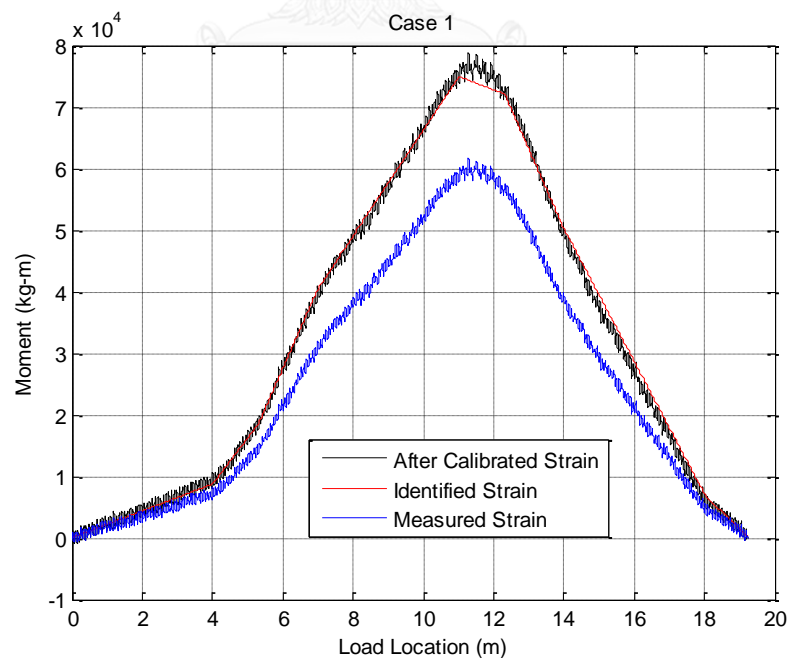
- $E(\beta)$  คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) ของการหาค่าพารามิเตอร์  $\beta$
- $w$  คือ รูปแบบการทดสอบการวิ่งรถบรรทุกด้วยความเร็วช้ามาก
- $d_{model}^i$  คือ โมเมนต์ดัดที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองรถที่เคลื่อนที่บนสะพาน ณ ตำแหน่งที่  $i$
- $d_{measured}^i$  คือ โมเมนต์ดัดที่เก็บวัดได้โดยตรงจากการสะพาน เมื่อรถเคลื่อนที่บนสะพาน ณ ตำแหน่งที่  $i$
- $n$  คือ จำนวนของหน้าตัดที่พิจารณา



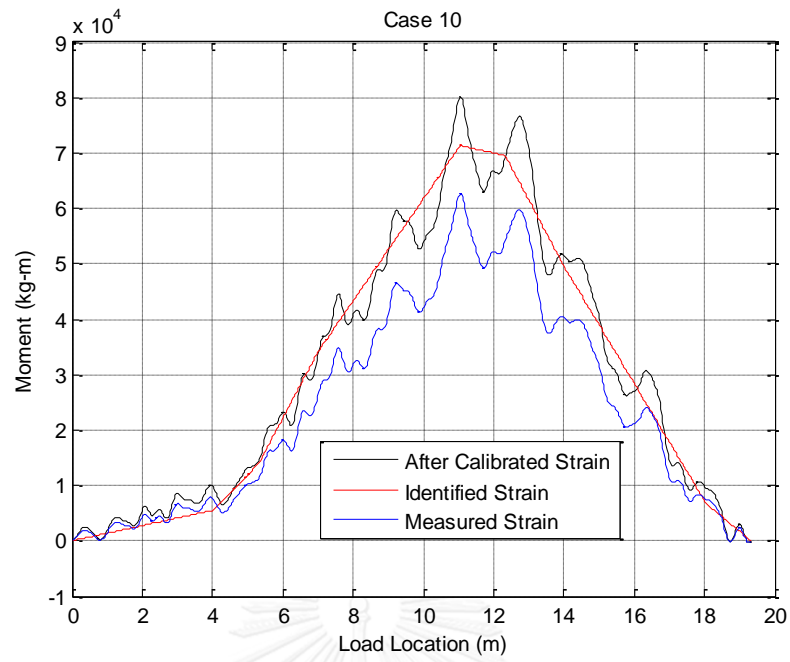
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียด,  $\beta$

IL Method	ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียด, $\beta$	
	Left Lane	Right Lane
Direct Measurements	1.25	1.32
Theory Static	1.25	1.32
Theory Dynamic	1.36	1.44

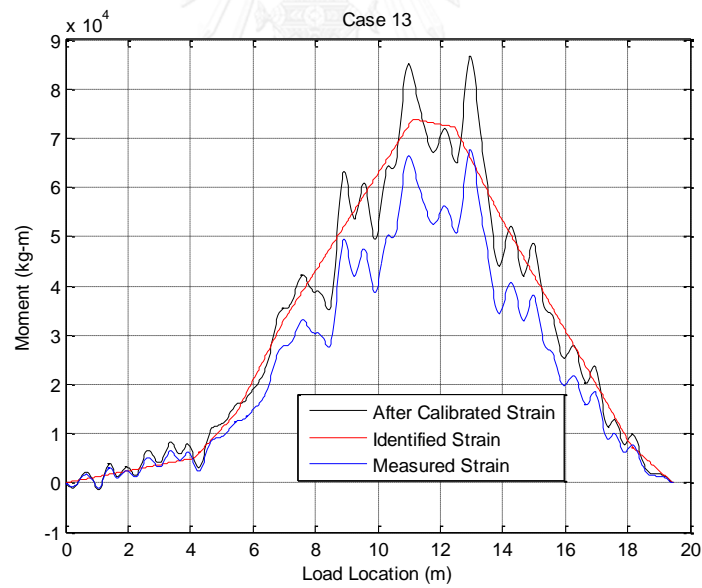
ในกรณีนี้เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบของสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา และยังสามารถหาค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบ  $\beta$  สำหรับเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิตได้มีค่าเท่ากับ 1.25 กรณีวิ่งช่องจราจรซ้ายและ  $\beta$  ได้มีค่าเท่ากับ 1.32 กรณีวิ่งช่องจราจรขวา ซึ่งเมื่อนำค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักที่เก็บวัดได้มาทำการปรับเทียบแล้ว จะได้ลักษณะของค่าความเครียดเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักหลังจากปรับเทียบแล้วในแต่ละหน้าตัดสะพานกรณีวิ่งช่องจราจรกลางดังแสดงในรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่งกึ่งของสะพานกรณีวิ่งที่ 1



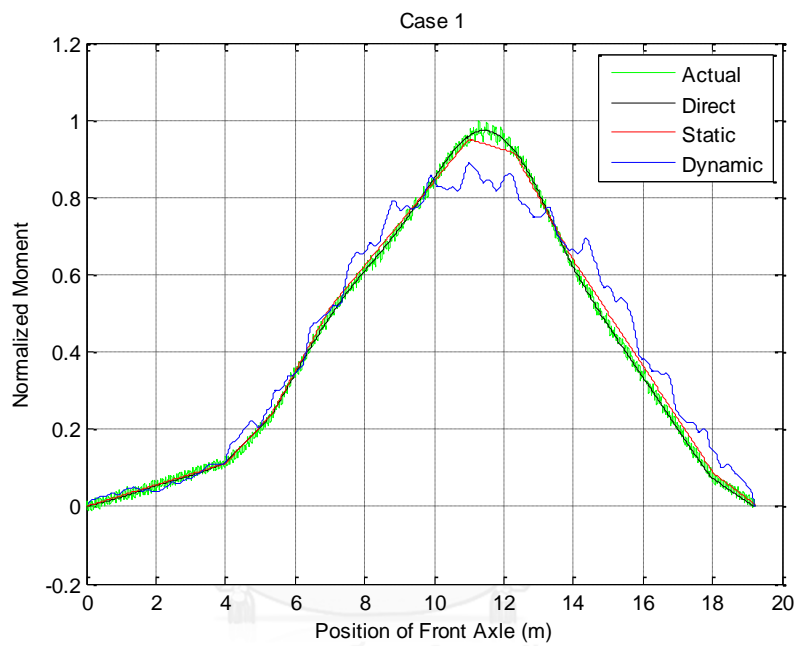
รูปที่ 4.13 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่งกึ่งของสะพานกรณีที่ 10



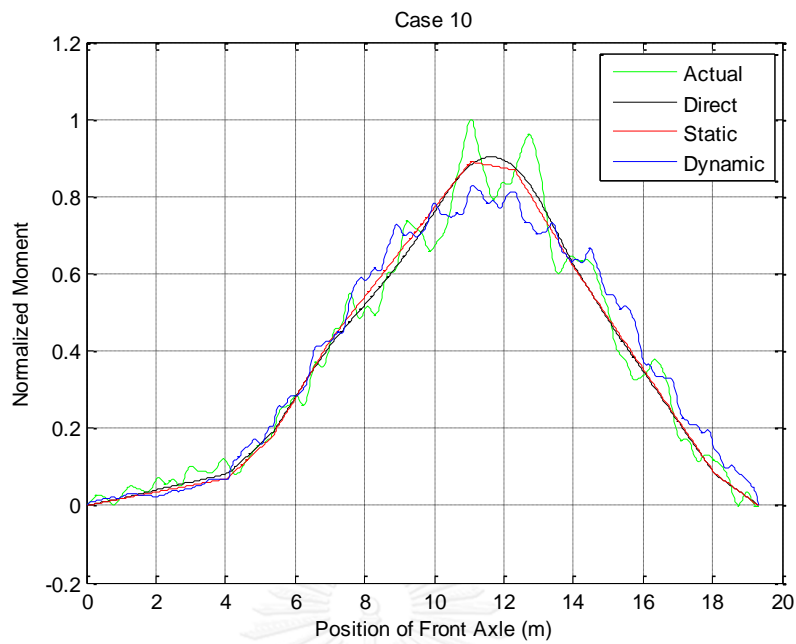
รูปที่ 4.14 ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้ที่ตำแหน่งกึ่งของสะพานกรณีที่ 13

#### 4.5 ผลการหาหน้าหนักรถบรรทุก

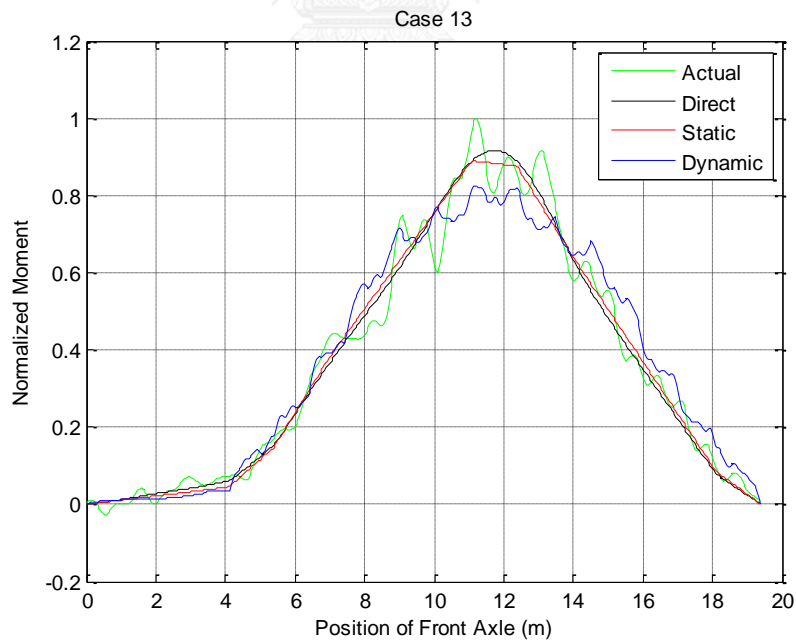
รูปที่ 4.15 ถึงรูปที่4.17 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลตอบสนองของสะพานในรูปของโมเมนต์ตัดที่หน้าตัดกึ่งกลางสะพาน ระหว่างค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงของสะพานกับค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองสะพานด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบ สำหรับกรณีวิ่งด้วยความเร็ว ช้ามาก ช้า และปานกลาง



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดจากผลการตรวจวัดจริงกับค่าประมาณจากแบบจำลอง (กรณีความเร็วช้ามาก)



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดจากผลการตรวจวัดจริงกับค่าประมาณจากแบบจำลอง (กรณีความเร็วช้า)



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดจากผลการตรวจวัดจริงกับค่าประมาณจากแบบจำลอง (กรณีความเร็วปานกลาง)

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ประมาณจากแบบจำลองสะพานด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบมีรูปแบบที่สอดคล้องและค่าที่ใกล้เคียงกับค่าโมเมนต์ดัดจริงของสะพานมาก เมื่อนำค่าน้ำหนักบรรทุกที่ประมาณได้จากการใช้เส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบ ไปเทียบกับค่าน้ำหนักแท้จริงของรถบรรทุกทดสอบ (25.39 ตัน) ได้ผลความถูกต้องแม่นยำของแต่ละวิธีดังแสดงในตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2สรุปผลการประมาณน้ำหนักรถบรรทุก (กรณีความเร็วช้ามาก)

Case	Speed	Lane	Actual	Weight Estimation (t)		
			Weight (t)	Static	Dynamic	Direct
1	Very Slow	Left	25.39	25.34	25.00	25.15
			% Error	(-0.20)	(-1.54)	(-0.93)
2			25.39	25.09	24.76	24.86
			% Error	(-1.20)	(-2.49)	(-2.08)
3		25.39	24.75	24.35	24.49	
		% Error	(-2.53)	(-4.09)	(-3.53)	
4	Right	25.39	25.17	24.81	24.93	
		% Error	(-0.88)	(-2.30)	(-1.83)	
5		25.39	25.60	25.28	25.36	
		% Error	0.83	(-0.45)	(-0.11)	
6	25.39	25.33	24.99	25.16		
	% Error	(-0.24)	(-1.57)	(-0.89)		

ตารางที่ 4.3สรุปผลการประมาณน้ำหนักรถบรรทุก (กรณีความเร็วช้า)

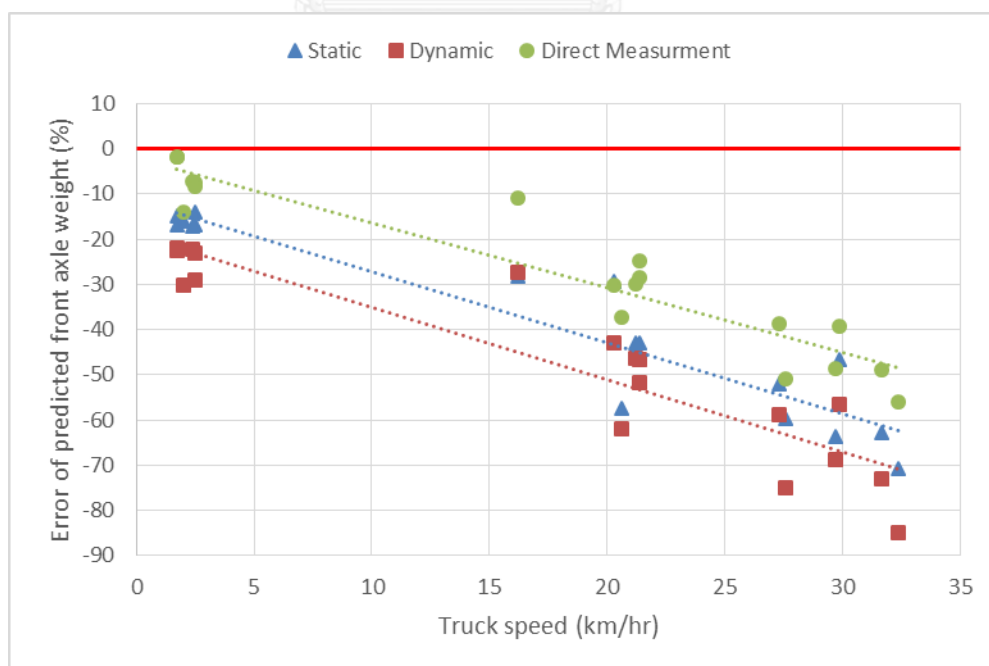
Case	Speed	Lane	Actual	Weight Estimation (t)		
			Weight (t)	Static	Dynamic	Direct
7	Slow	Left	25.39	25.17	25.22	25.25
			% Error	(-0.87)	(-0.67)	(-0.56)
8			25.39	24.44	24.13	24.06
			% Error	(-3.76)	(-4.98)	(-5.23)
9			25.39	24.31	24.13	24.18
			% Error	(-4.26)	(-4.97)	(-4.77)
10		Right	25.39	24.62	24.39	24.63
			% Error	(-3.02)	(-3.94)	(-3.00)
11			25.39	24.29	24.00	24.26
			% Error	(-4.32)	(-5.46)	(-4.46)
12			25.39	23.78	23.55	23.93
			% Error	(-6.33)	(-7.24)	(-5.75)

ตารางที่ 4.4สรุปผลการประมาณน้ำหนักรถบรรทุก(กรณีความเร็วปานกลาง)

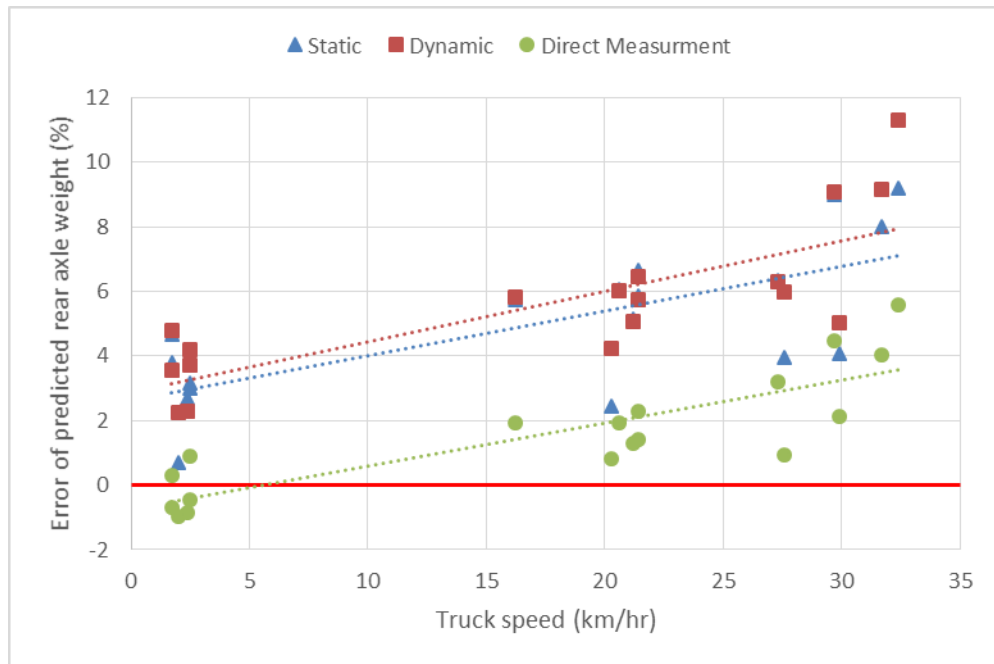
Case	Speed	Lane	Actual	Weight Estimation (t)		
			Weight (t)	Static	Dynamic	Direct
13	Moderate	Left	25.39	24.11	23.75	24.12
			% Error	(-5.03)	(-6.45)	(-4.99)
14			25.39	24.08	23.84	23.89
			% Error	(-5.18)	(-6.12)	(-5.89)
15			25.39	23.91	23.61	23.88
			% Error	(-5.81)	(-7.00)	(-5.96)
16		Right	25.39	23.24	22.90	23.06
			% Error	(-8.47)	(-9.80)	(-9.17)
17			25.39	23.76	23.48	23.75
			% Error	(-6.42)	(-7.52)	(-6.45)
18	25.39		23.92	23.64	23.80	
	% Error		(-5.81)	(-6.91)	(-6.27)	

จากผลการหาน้ำหนักของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวทั้งหมด พบว่าในส่วนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักจะมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนของน้ำหนักเพลาลังและน้ำหนักรวม โดยสาเหตุน่าจะมาจากการลักษณะทางกายภาพของสะพานเนื่องจากสะพานที่ทำการทดสอบคอสพานซึ่งมีการทรุดของตัวคอสพานทำให้เพลาน้ำหนักของรถบรรทุกมีการกระโดดเล็กน้อย สังเกตได้จากกรณีที่รถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วระดับหนึ่งจะเกิดการแปรปรวนของค่าความเครียดในช่วงต้น นั่นคือลักษณะของแรงที่หายได้จะมีผลของแรงทางพลศาสตร์รวมอยู่ด้วยในอัตราส่วนที่ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักทางสถิตที่ทำได้ ประกอบกับค่าสัญญาณความเครียดค่อนข้างน้อยในช่วงของเพลารากซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการนำเส้นอิทธิพลในวิธีต่างๆ มาคูณกับน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่ทราบค่าจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองจริงมีค่าน้อยกว่าอยู่อย่างชัดเจนในทุกกรณี ทำให้การเฉลี่ยแรงพลศาสตร์ของเพลารากหรือน้ำหนักรวมทำได้ไม่ถูกต้องนักส่งผลให้ร่องผลทางพลศาสตร์จากแรงที่หายได้โดยการเฉลี่ยไม่ตีพอ

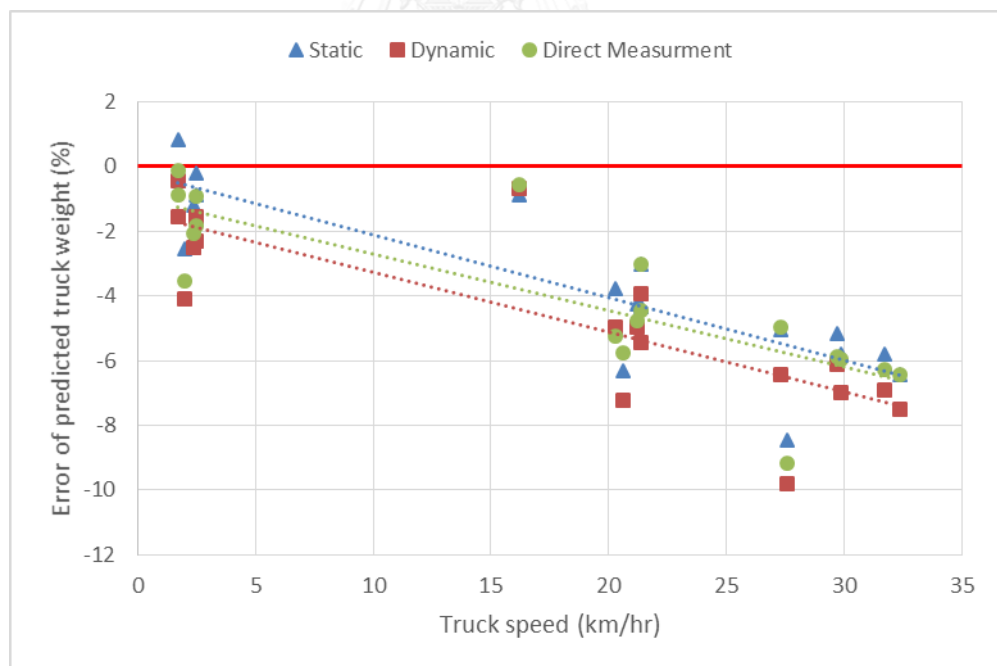
โดยค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักโดยส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกิน  $\pm 85\%$  แต่จากการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาลังและน้ำหนักรวมพบว่าผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ดีพอสมควร โดยผลการหาน้ำหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 12\%$  สำหรับน้ำหนักเพลาลังและไม่เกิน  $\pm 10\%$  สำหรับน้ำหนักรวม จากจำนวนการทดสอบในกรณีนี้ทั้งหมด 18 การทดสอบ



รูปที่ 4.18 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วของรถบรรทุก



รูปที่ 4.19 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาล้อหลังที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วของรถบรรทุก



รูปที่ 4.20 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกรวมที่คำนวณได้เทียบกับความเร็วของรถบรรทุก



จากรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 เป็นการนำความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักที่หาได้ในเพลาน้ำ เพลาล้าง และน้ำหนักบรรทุกรวมในทุกกรณีของทั้ง 3 วิธี มาสร้างกราฟเทียบกับความเร็วของรถบรรทุกซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วเพิ่มขึ้นความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักบรรทุกในเพลาน้ำ เพลาล้าง และน้ำหนักบรรทุกรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ในส่วนของวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงยังมีแนวโน้มที่ในการหาน้ำหนักเพลาน้ำและเพลาล้างได้ถูกต้องกว่าวิธีอื่น



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักของอัลกอริทึมต่างๆ แต่ยังคงการศึกษาเปรียบเทียบในแต่ละวิธีว่ามีข้อดี ข้อเสีย ความสะดวก รวมถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานต่างกันอย่างไร การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึมการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพล 3 แบบได้แก่ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิติ เส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต และเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง โดยทำการทดสอบภาคสนามด้วยรถบรรทุกที่ทราบน้ำหนักจากนั้นนำข้อมูลผลตอบสนองของสะพานที่ได้ไปหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 แบบแล้วจึงนำผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกมาทำการเปรียบเทียบความถูกต้อง

การทดสอบการหาน้ำหนักรถบรรทุกในครั้งนี้เป็นการทดสอบกับสะพานจริงซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ได้เลือกสะพานทางแยกต่างระดับหนองขาม-ท่าเรือแหลมฉบัง สะพานข้ามทางรถไฟ กม. 4+547.5 ทางหลวงหมายเลข 7 สำหรับทำการทดสอบซึ่งรูปแบบโครงสร้างเป็นสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ โดยจากการตรวจสอบพบว่าขนาดสัญญาณค่าความเครียดที่ทำการตรวจวัดได้มีค่ามากเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาน้ำหนักจากค่าความเครียดหรือค่าโมเมนต์โดยผลจากการศึกษาได้ข้อสรุปแยกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 ผลของการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพล

จากผลการทดสอบทั้งหมดจำนวน 18 การทดสอบ พบว่าความคลาดเคลื่อนจะสูงขึ้นหากรถบรรทุกแล่นข้ามสะพานด้วยความเร็วที่มากขึ้นและด้วยสภาพผิวจราจรในช่วงคอสะพานขาขึ้น สะพานมีความขรุขระมากทำให้รถบรรทุกมีการกระโดดเล็กน้อยขณะขึ้นสะพานส่งผลให้เกิดค่าทางพลศาสตร์ขึ้นมากทำให้ประสิทธิภาพการหาน้ำหนักลดลง แม้แต่วิธีเส้นอิทธิพลแบบพลวัตก็ไม่สามารถชัดเจนในส่วนนี้ได้เนื่องจากค่าพลศาสตร์ดังกล่าวไม่ได้เป็นไปตามขอบเขตของทฤษฎีที่ใช้ในการหาน้ำหนักซึ่งผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกพบความคลาดเคลื่อนในเพลาน้ำหนัก เพลาล้าง และน้ำหนักบรรทุกรวมของแต่ละวิธีมีค่าเท่ากับ  $\pm 71\%$ ,  $\pm 10\%$  และ  $\pm 9\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบ

สถิติ  $\pm 85\%$ ,  $\pm 12\%$  และ  $\pm 10\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต  $\pm 57\%$ ,  $\pm 6\%$  และ  $\pm 10\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง

จากการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกของทั้ง 3 วิธีให้ความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจทั้งนี้ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกรวมในทุกกรณีที่ทดสอบมีค่าไม่เกิน  $\pm 10\%$

### 5.1.2 เปรียบเทียบการหาน้ำหนักบรรทุกด้วยเส้นอิทธิพลทั้ง 3 วิธี

หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนของผลการหาน้ำหนักบรรทุกในเพลาน้ำหนักและเพลาลงด้วยวิธีเส้นอิทธิพลต่างๆ จะพบว่าผลการหาน้ำหนักบรรทุกในเพลาน้ำหนักและเพลาลงด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงนั้น มีแนวโน้มที่ถูกต้องกว่าอีกสองวิธี โดยในส่วนของเพลาน้ำหนักวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 40\%$  มีเพียง 4 กรณีที่มีความคลาดเคลื่อนเกินแต่ก็อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน  $\pm 60\%$  แต่อีก 2 วิธีนั้นพบความคลาดเคลื่อนถึง  $\pm 85\%$  และ  $\pm 70\%$  สำหรับวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิติและแบบพลวัตตามลำดับ เช่นเดียวกันกับการหาน้ำหนักบรรทุกในเพลาลงที่วิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง ให้ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 6\%$  แต่อีก 2 วิธีพบมีความคลาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 10\%$

แม้ผลการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี จะไม่เห็นค่าความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญนัก แต่การประยุกต์ใช้วิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงก็มีแนวโน้มให้ค่าความถูกต้องของน้ำหนักเพลาน้ำหนักที่ดีกว่าอีก 2 วิธี ยิ่งไปกว่านั้นอัลกอริทึมที่ใช้วิธีเส้นอิทธิพลผลตอบสนองจากทฤษฎีแบบสถิติและแบบพลวัต มีข้อจำกัดที่ต้องสมมติให้ฐานรองรับของสะพานเป็นแบบง่าย จึงไม่เหมาะสมกับสะพานที่มีฐานรองรับแบบอื่นและอาจส่งผลให้ความถูกต้องในการหาน้ำหนักลดลง

ดังนั้นการประยุกต์อัลกอริทึมที่ใช้เส้นอิทธิพลผลตอบสนองจากการตรวจวัดโดยตรงในการหาน้ำหนักบรรทุก สามารถสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของสะพานในทุกรูปแบบได้ถูกต้องกว่า ประกอบกับจากการศึกษาเปรียบเทียบด้วยการทดสอบสะพานจริงในภาคสนามพบว่าสามารถให้ค่าน้ำหนักรวมของขบวนที่มีความถูกต้องไม่ด้อยกว่าวิธีอื่น ทั้งยังสามารถให้ค่าน้ำหนักเพลารถที่แม่นยำกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้ดีกว่าวิธีเส้นอิทธิพลผลตอบสนองจากทฤษฎีแบบสถิติและแบบพลวัต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบจะพบว่าผลของความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักแต่ละวิธีนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถแสดงการเปรียบเทียบการหาน้ำหนักบรรทุกของแต่ละวิธีได้

อย่างชัดเจน ทั้งนี้หากต้องการให้การเปรียบเทียบมีความชัดเจนและสมบูรณ์มากขึ้นควรที่จะพิจารณากับรถบรรทุกในหลายประเภทที่ระดับความเร็วต่าง ๆ ให้มากขึ้น และเนื่องด้วยการทดสอบครั้งนี้แม้ได้มีการเก็บข้อมูลจากการจราจรจริงในภายหลังแต่ไม่ทราบข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานทดสอบทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ตรวจสอบความถูกต้องเพิ่มเติมได้ รวมถึงข้อจำกัดทางด้านความเร็วที่ยังทำความเร็วขณะทดสอบได้ไม่สูงมากนัก ดังนั้นควรมีการศึกษาและทดสอบในกรณีต่างๆ เพิ่มมากขึ้น โดยมีข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติมดังนี้

1. ควรมีการทดสอบกับสะพานที่ตั้งอยู่ใกล้กับด่านชั่งน้ำหนักเพื่อสามารถนำข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกที่ได้จากด่านชั่งซึ่งเป็นข้อมูลของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานที่ทดสอบมาใช้ในการพิจารณาเพิ่มเติมนอกจากรถบรรทุกที่ใช้ทดสอบ
2. ควรมีการศึกษาและทดสอบกับสะพานลักษณะอื่นๆ เช่น สะพานที่มีระบบโครงสร้างที่มีฐานรองรับแบบอื่น และสะพานโครงถัก เป็นต้น



## รายการอ้างอิง

1. Moses, F., *Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges*. Transportation Engineering Journal, 1979. **105**: p. 233-249.
2. Xu, M.G.a.Q., *Estimating Bridge Dynamics Using the Weigh-In-Motion Algorithm*. 1989, Transportation Research Records.
3. Laman, J.A.a.A.S.N., *Fatigue-Load Models for Girder Bridges*. Journal of structural Engineering, 1996. **122**(7): p. 726-733.
4. G Thater, P.C., D R Schelling, C C Fu, *Estimation of bridge static response and vehicle weights by frequency response analysis*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1998. **25**(4): p. 631-639.
5. Chan T.H.T., L.S.S., Yung T.H. and Yuan X.R. , *An Interpretive Method for Moving Force Identification*. Journal of Sound and Vibration 1999: p. 503-524.
6. Zhu X.Q., L.S.S., *Moving Forces Identification on a Multi-Span Continuous Bridge*. Journal of Sound and Vibration 1999: p. 377-396.
7. Law S.S., C.T.H.T., and Zeng Q.H., *Moving Force Identification a Frequency and Time Domains Analysis*. Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, 1999: p. 394-401.
8. Chan T.H.T., L.S.S.a.Y.T.H., *Moving Force Identification Using an Existing Prestressed Concrete Bridge*. Engineering Structures, 1999: p. 503-524.
9. Zhu X.Q., L.S.S., *Identification of Vehicle Axle Loads From Bridge Dynamic Responses*. Journal of Sound and Vibration 2000: p. 705-724.
10. Law S.S., C.T.H.T., and Zeng Q.H., *Regularization in Moving Force Identification*. Journal of Engineering Mechanics, 2001: p. 136-148.
11. Law S.S., a.F.Y.L., *Moving Force Identification: Optimal State Estimation Approach*. Journal of Sound and Vibration 2001: p. 233-254.
12. Commission, E., *Weighing-In-Motion of axles and vehicles for Europe (WAVE)*, in *Report of Work Package 1.2 Bridge WIM systems (B-WIM)*. 2001, University College Dublin.

13. Zhu X.Q., L.S.S., *Moving Loads Identification through Regularization*. Journal of Engineering Mechanics, 2002: p. 989-1000.
14. Zhu X.Q., L.S.S., *Dynamic axle and wheel loads identification: laboratory studies*. Journal of Sound and Vibration, 2003: p. 855-879.
15. พนาปวุฒิกุล, พ., การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2003, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
16. อัครวิทยาภูมิ, ธ., การเพิ่มความถูกต้องของการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2003, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
17. อาสนจินดา, พ., การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองย่อส่วน, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2004, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
18. ฟุ้งสุข, ภ., การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2005, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. Pinkaew, T., *Identification of vehicle axle loads from bridge responses using updated static component technique*. Engineering Structures, 2006. **28**(11): p. 1599-1608.
20. Zhao, H., and Uddin, N. , *Algorithm to identify axle weights for an innovative BWIM system- Part I*, in *IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II*. 2010. p. 527-536.
21. Zhao, H., and Uddin, N. , *Algorithm to identify axle weights for an innovative BWIM system- Part II*, in *IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II*. 2010. p. 537-546.
22. จิวโพธิ์เจริญ, ก., การศึกษาการรับน้ำหนักบรรทุกทุกพลอดภัยและอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานแบบแผ่นพื้น, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2009, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
23. ชันแก้ว, เ., ตัวประกอบการกระทบตามตำแหน่งต่างๆ บนพื้นสะพานจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2011, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

24. Frýba, L., *Vibration of solids and structures under moving loads*. 1999, Prague, Czech Republic: Thomas Telford Ltd.
25. แสงชูวงศ์, ป., การหาน้ำหนักรถจากโมเมนต์ตัดของสะพานโดยปราศจากการตรวจจับเพลลา, in สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2007, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ผ. 1 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต (ใช้ทุกกรณีในการทดสอบมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.36	10.78	25.92	-12.01	5.52	2.10
2	4.20	10.73	25.66	-15.32	5.06	1.08
3	4.27	10.52	25.32	-13.91	3.03	-0.28
4	4.00	10.22	24.44	-19.31	0.02	-3.76
5	4.09	10.38	24.86	-17.45	1.63	-2.09
6	4.00	10.30	24.59	-19.33	0.80	-3.14
7	3.65	11.05	25.75	-26.47	8.18	1.41
8	3.59	10.71	25.00	-27.64	4.80	-1.54
9	2.89	10.99	24.87	-41.67	7.56	-2.05
10	2.75	10.58	23.91	-44.51	3.56	-5.83
11	2.59	10.50	23.59	-47.80	2.78	-7.10
12	2.05	10.52	23.09	-58.67	3.00	-9.05
13	2.44	11.11	24.67	-50.77	8.79	-2.84
14	1.85	11.39	24.63	-62.69	11.50	-2.99
15	2.71	10.88	24.46	-45.34	6.48	-3.65
16	1.94	10.31	22.56	-60.91	0.96	-11.13
17	1.41	10.83	23.07	-71.61	6.04	-9.13
18	1.80	10.71	23.22	-63.78	4.87	-8.54

ตารางที่ ผ. 2 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิติกรณีช่องจราจรซ้าย (ใช้ทุกกรณีของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.25	10.49	25.22	-14.39	2.67	-0.66
2	4.09	10.44	24.97	-17.61	2.22	-1.66
3	4.15	10.24	24.63	-16.24	0.24	-2.98
4	3.55	10.75	25.05	-28.46	5.26	-1.33
5	3.49	10.42	24.32	-29.60	1.96	-4.20
6	2.82	10.69	24.20	-43.25	4.66	-4.70
7	2.38	10.81	24.00	-52.10	5.85	-5.47
8	1.80	11.08	23.96	-63.70	8.48	-5.62
9	2.64	10.58	23.80	-46.82	3.60	-6.25

ตารางที่ ผ. 3 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิติกรณีช่องจราจรซ้าย (ใช้กรณีความเร็วช้าของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.27	10.54	25.34	-13.99	3.15	-0.20
2	4.11	10.49	25.09	-17.22	2.69	-1.20
3	4.17	10.29	24.75	-15.85	0.71	-2.53
4	3.57	10.80	25.17	-28.12	5.75	-0.87
5	3.51	10.46	24.44	-29.27	2.44	-3.76
6	2.83	10.74	24.31	-42.98	5.14	-4.26
7	2.39	10.86	24.11	-51.88	6.34	-5.03
8	1.81	11.13	24.08	-63.53	8.99	-5.18
9	2.65	10.63	23.91	-46.57	4.08	-5.81

ตารางที่ ผ. 4 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิติกรณีช่อง  
จรรยาซ้าย (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจรรยาซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
IL Fast	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.15	10.25	24.65	-16.34	0.33	-2.93
2	3.99	10.20	24.40	-19.49	-0.12	-3.90
3	4.06	10.01	24.07	-18.15	-2.05	-5.19
4	3.47	10.51	24.48	-30.09	2.85	-3.58
5	3.41	10.18	23.77	-31.20	-0.36	-6.39
6	2.75	10.45	23.64	-44.54	2.27	-6.88
7	2.32	10.57	23.45	-53.20	3.44	-7.63
8	1.76	10.83	23.42	-64.53	6.01	-7.77
9	2.58	10.34	23.26	-48.04	1.23	-8.39

ตารางที่ ผ. 5 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิติกรณีช่อง  
จรรยาขวา (ใช้ทุกกรณีของช่องจรรยาขวามาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
IL ALL	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.11	10.48	25.07	-17.23	2.61	-1.27
2	4.20	10.65	25.50	-15.31	4.26	0.44
3	4.10	10.56	25.23	-17.25	3.40	-0.63
4	2.82	10.85	24.53	-43.08	6.24	-3.40
5	2.66	10.77	24.20	-46.45	5.44	-4.69
6	2.10	10.79	23.69	-57.60	5.67	-6.69
7	1.99	10.58	23.15	-59.90	3.57	-8.83
8	1.44	11.11	23.67	-70.87	8.78	-6.78
9	1.84	10.99	23.82	-62.84	7.59	-6.17

ตารางที่ ผ. 6 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิตกรณี่ช่อง  
จรรยาขวา (ใช้กรณีความเร็วช้าของช่องจรรยาขวาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	IL Slow	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr
1	4.12	10.52	25.17	-16.90	3.00	-0.88
2	4.22	10.69	25.60	-14.98	4.67	0.83
3	4.12	10.60	25.33	-16.93	3.81	-0.24
4	2.83	10.89	24.62	-42.85	6.65	-3.02
5	2.67	10.81	24.29	-46.24	5.85	-4.32
6	2.11	10.84	23.78	-57.43	6.08	-6.33
7	2.00	10.62	23.24	-59.75	3.97	-8.47
8	1.45	11.16	23.76	-70.76	9.20	-6.42
9	1.85	11.03	23.92	-62.70	8.01	-5.81

ตารางที่ ผ. 7 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิตกรณี่ช่อง  
จรรยาขวา (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจรรยาขวาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	IL Fast	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr
1	4.00	10.22	24.45	-19.28	0.06	-3.72
2	4.10	10.39	24.87	-17.41	1.67	-2.05
3	4.00	10.30	24.60	-19.30	0.84	-3.10
4	2.75	10.58	23.92	-44.49	3.60	-5.80
5	2.59	10.50	23.60	-47.78	2.82	-7.06
6	2.05	10.53	23.10	-58.65	3.04	-9.01
7	1.94	10.32	22.57	-60.90	1.00	-11.09
8	1.41	10.84	23.08	-71.59	6.08	-9.10
9	1.80	10.72	23.23	-63.76	4.92	-8.50

ตารางที่ ผ. 8 สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบสถิต

Case	Lane	Theory Static			
		All*	All	Slow	Fast
1	Left	2.10	-0.66	-0.20	-2.93
2		1.08	-1.66	-1.20	-3.90
3		-0.28	-2.98	-2.53	-5.19
7		1.41	-1.33	-0.87	-3.58
8		-1.54	-4.20	-3.76	-6.39
9		-2.05	-4.70	-4.26	-6.88
13		-2.84	-5.47	-5.03	-7.63
14		-2.99	-5.62	-5.18	-7.77
15		-3.65	-6.25	-5.81	-8.39
4		Right	-3.76	-1.27	-0.88
5	-2.09		0.44	0.83	-2.05
6	-3.14		-0.63	-0.24	-3.10
10	-5.83		-3.40	-3.02	-5.80
11	-7.10		-4.69	-4.32	-7.06
12	-9.05		-6.69	-6.33	-9.01
16	-11.13		-8.83	-8.47	-11.09
17	-9.13		-6.78	-6.42	-9.10
18	-8.54		-6.17	-5.81	-8.50

\* ไม่พิจารณาช่องจราจร

ตารางที่ ผ. 9 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต (ใช้ทุกกรณีในการทดสอบมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.90	10.84	25.58	-21.38	6.10	0.73
2	3.95	10.69	25.33	-20.37	4.65	-0.24
3	3.54	10.69	24.91	-28.62	4.61	-1.88
4	3.42	10.33	24.08	-31.14	1.14	-5.17
5	3.76	10.39	24.53	-24.29	1.70	-3.37
6	3.73	10.27	24.26	-24.88	0.50	-4.46
7	3.68	11.06	25.80	-25.79	8.28	1.62
8	2.90	10.89	24.68	-41.56	6.62	-2.79
9	2.72	10.98	24.68	-45.13	7.50	-2.78
10	2.56	10.55	23.67	-48.30	3.32	-6.76
11	2.33	10.49	23.30	-53.09	2.65	-8.24
12	1.84	10.51	22.86	-62.99	2.91	-9.96
13	2.09	11.11	24.30	-57.95	8.73	-4.30
14	1.59	11.40	24.39	-67.98	11.59	-3.95
15	2.20	10.98	24.16	-55.55	7.45	-4.86
16	1.21	10.51	22.23	-75.58	2.88	-12.45
17	0.72	11.03	22.79	-85.43	8.02	-10.24
18	1.30	10.82	22.94	-73.84	5.94	-9.64

ตารางที่ ผ. 10 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต กรณีช่องจราจรซ้าย (ใช้ทุกกรณีของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.40	10.68	24.76	-31.40	4.54	-2.48
2	3.45	10.53	24.51	-30.46	3.09	-3.47
3	3.02	10.53	24.08	-39.14	3.10	-5.15
4	3.14	10.92	24.98	-36.61	6.86	-1.63
5	2.34	10.76	23.86	-52.77	5.35	-6.01
6	2.13	10.86	23.85	-57.15	6.36	-6.05
7	1.73	10.91	23.56	-65.19	6.85	-7.23
8	1.16	11.24	23.63	-76.57	10.00	-6.91
9	1.84	10.79	23.42	-62.90	5.61	-7.77

ตารางที่ ผ. 11 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต กรณีช่องจราจรซ้าย (ใช้กรณีความเร็วช้าของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.81	10.59	25.00	-23.15	3.71	-1.54
2	3.86	10.45	24.76	-22.16	2.29	-2.49
3	3.46	10.45	24.35	-30.23	2.26	-4.09
4	3.60	10.81	25.22	-27.46	5.84	-0.67
5	2.83	10.65	24.13	-42.87	4.22	-4.98
6	2.66	10.73	24.13	-46.37	5.08	-4.97
7	2.04	10.86	23.75	-58.90	6.28	-6.45
8	1.55	11.14	23.84	-68.70	9.08	-6.12
9	2.16	10.73	23.61	-56.55	5.03	-7.00

ตารางที่ ผ. 12 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต กรณีช่องจราจรซ้าย (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.32	10.43	24.18	-33.02	2.08	-4.78
2	3.37	10.28	23.93	-32.10	0.66	-5.74
3	2.95	10.28	23.52	-40.57	0.68	-7.38
4	3.07	10.66	24.39	-38.10	4.35	-3.94
5	2.29	10.51	23.30	-53.88	2.87	-8.22
6	2.08	10.61	23.29	-58.16	3.85	-8.26
7	1.69	10.66	23.00	-66.01	4.33	-9.41
8	1.13	10.97	23.08	-77.12	7.41	-9.10
9	1.80	10.53	22.87	-63.77	3.13	-9.94

ตารางที่ ผ. 13 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต กรณีช่องจราจรขวา (ใช้ทุกกรณีของช่องจราจรขวามาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.12	10.73	24.58	-37.12	5.05	-3.18
2	3.49	10.79	25.06	-29.72	5.62	-1.28
3	3.45	10.66	24.77	-30.54	4.36	-2.46
4	2.24	10.97	24.19	-54.81	7.41	-4.74
5	1.98	10.90	23.79	-60.13	6.74	-6.32
6	1.43	10.95	23.32	-71.20	7.17	-8.14
7	0.95	10.90	22.74	-80.90	6.67	-10.43
8	0.55	11.40	23.34	-88.98	11.59	-8.06
9	1.03	11.22	23.47	-79.14	9.84	-7.54



ตารางที่ ผ. 14 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต กรณีช่องจราจรขวา (ใช้กรณีความเร็วช้าของช่องจราจรขวามาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
IL Slow	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.52	10.64	24.81	-29.06	4.20	-2.30
2	3.87	10.70	25.28	-21.99	4.78	-0.45
3	3.84	10.58	24.99	-22.61	3.54	-1.57
4	2.64	10.87	24.39	-46.74	6.45	-3.94
5	2.40	10.80	24.00	-51.67	5.76	-5.46
6	1.89	10.83	23.55	-61.87	6.02	-7.24
7	1.25	10.83	22.90	-74.84	5.99	-9.80
8	0.74	11.37	23.48	-84.99	11.29	-7.52
9	1.34	11.15	23.64	-73.05	9.15	-6.91

ตารางที่ ผ. 15 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต กรณีช่องจราจรขวา (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจราจรขวามาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
IL Fast	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	3.04	10.46	23.96	-38.71	2.40	-5.63
2	3.40	10.52	24.43	-31.50	2.95	-3.78
3	3.36	10.39	24.14	-32.30	1.72	-4.93
4	2.18	10.69	23.57	-55.95	4.69	-7.15
5	1.93	10.63	23.18	-61.14	4.04	-8.69
6	1.39	10.67	22.73	-71.93	4.46	-10.46
7	0.92	10.62	22.17	-81.38	3.97	-12.70
8	0.53	11.11	22.75	-89.26	8.76	-10.39
9	1.01	10.94	22.88	-79.67	7.06	-9.88

ตารางที่ ผ. 16 สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากทฤษฎีแบบพลวัต

Case	Lane	Theory Dynamic			
		All*	All	Slow	Fast
1	Left	0.73	-2.48	-1.54	-4.78
2		-0.24	-3.47	-2.49	-5.74
3		-1.88	-5.15	-4.09	-7.38
7		1.62	-1.63	-0.67	-3.94
8		-2.79	-6.01	-4.98	-8.22
9		-2.78	-6.05	-4.97	-8.26
13		-4.30	-7.23	-6.45	-9.41
14		-3.95	-6.91	-6.12	-9.10
15		-4.86	-7.77	-7.00	-9.94
4		Right	-5.17	-3.18	-2.30
5	-3.37		-1.28	-0.45	-3.78
6	-4.46		-2.46	-1.57	-4.93
10	-6.76		-4.74	-3.94	-7.15
11	-8.24		-6.32	-5.46	-8.69
12	-9.96		-8.14	-7.24	-10.46
16	-12.45		-10.43	-9.80	-12.70
17	-10.24		-8.06	-7.52	-10.39
18	-9.64		-7.54	-6.91	-9.88

\* ไม่พิจารณาช่องจราจร

ตารางที่ ผ. 17 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง (ใช้ทุกกรณีในการทดสอบมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	5.29	9.90	25.10	6.72	-3.07	-1.15
2	5.35	9.82	24.99	7.90	-3.86	-1.57
3	5.06	9.85	24.76	2.00	-3.56	-2.48
4	4.26	8.71	21.68	-14.12	-14.72	-14.61
5	4.44	8.87	22.18	-10.43	-13.18	-12.64
6	4.43	8.76	21.95	-10.70	-14.22	-13.53
7	5.10	10.07	25.24	2.74	-1.40	-0.59
8	4.03	9.94	23.92	-18.72	-2.66	-5.80
9	4.14	10.06	24.27	-16.55	-1.47	-4.41
10	3.50	9.06	21.63	-29.36	-11.26	-14.80
11	3.47	9.02	21.51	-30.03	-11.68	-15.27
12	3.10	9.07	21.23	-37.58	-11.24	-16.39
13	3.58	10.21	24.01	-27.72	0.00	-5.42
14	3.35	10.40	24.15	-32.54	1.83	-4.88
15	3.53	10.23	23.98	-28.76	0.10	-5.54
16	2.23	9.00	20.22	-54.99	-11.93	-20.34
17	2.19	9.52	21.23	-55.94	-6.79	-16.39
18	2.29	9.31	20.92	-53.78	-8.85	-17.62

ตารางที่ ผ. 18 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจราจรซ้าย (ใช้เส้นอิทธิพลในแต่ละกรณีมาหาน้ำหนักบรรทุกทุกของกรณีนี้ๆเอง)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
IL Itself	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.89	10.23	25.34	-1.46	0.13	-0.18
2	5.11	10.04	25.18	2.98	-1.76	-0.83
3	5.94	10.36	26.65	19.72	1.38	4.96
4	5.12	10.59	26.30	3.15	3.68	3.58
5	5.21	10.26	25.74	5.01	0.47	1.36
6	4.88	9.94	24.76	-1.55	-2.69	-2.47
7	5.32	10.24	25.79	7.20	0.22	1.59
8	5.34	10.33	26.00	7.64	1.13	2.40
9	5.19	10.26	25.70	4.71	0.40	1.24

ตารางที่ ผ. 19 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจราจรซ้าย (ใช้ทุกกรณีของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
IL ALL	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.92	9.62	24.17	-0.87	-5.78	-4.82
2	4.98	9.45	23.88	0.37	-7.48	-5.95
3	4.63	9.45	23.52	-6.72	-7.52	-7.36
4	4.76	9.75	24.27	-4.06	-4.52	-4.43
5	3.84	9.66	23.15	-22.66	-5.44	-8.81
6	3.87	9.70	23.27	-21.96	-5.05	-8.36
7	3.42	9.89	23.20	-31.12	-3.15	-8.61
8	2.93	10.04	23.01	-40.93	-1.73	-9.39
9	3.38	9.80	22.98	-31.77	-4.10	-9.51

ตารางที่ ผ. 20 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจราจรซ้าย (ใช้กรณีความเร็วช้าของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
IL Slow	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	4.54	10.31	25.15	-8.38	0.88	-0.93
2	4.60	10.13	24.86	-7.17	-0.84	-2.08
3	4.27	10.11	24.49	-13.99	-0.99	-3.53
4	4.42	10.41	25.25	-10.87	1.95	-0.56
5	3.47	10.30	24.06	-30.10	0.81	-5.23
6	3.48	10.35	24.18	-29.84	1.31	-4.77
7	3.04	10.54	24.12	-38.72	3.20	-4.99
8	2.55	10.67	23.89	-48.51	4.46	-5.89
9	3.01	10.43	23.88	-39.24	2.12	-5.96

ตารางที่ ผ. 21 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจราจรซ้าย (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจราจรซ้ายมาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Left	Weight (T)			ERROR (%)		
IL Fast	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	5.14	9.26	23.65	3.64	-9.38	-6.84
2	5.20	9.08	23.37	4.88	-11.07	-7.95
3	4.84	9.09	23.02	-2.33	-11.04	-9.34
4	4.96	9.40	23.75	0.02	-8.01	-6.44
5	4.06	9.31	22.68	-18.21	-8.86	-10.69
6	4.10	9.34	22.79	-17.31	-8.52	-10.24
7	3.65	9.54	22.73	-26.35	-6.61	-10.47
8	3.17	9.69	22.55	-36.10	-5.14	-11.19
9	3.62	9.45	22.51	-27.10	-7.51	-11.34

ตารางที่ ผ. 22 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจราจรขวา (ใช้เส้นอิทธิพลในแต่ละกรณีมาหน้ำหนักบรรทุกของกรณีนั้นๆเอง)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	5.33	10.20	25.73	7.51	-0.18	1.32
2	5.00	10.24	25.48	0.88	0.24	0.36
3	5.29	10.15	25.59	6.66	-0.63	0.79
4	5.20	10.18	25.57	4.79	-0.30	0.69
5	5.11	10.19	25.49	3.11	-0.24	0.41
6	5.13	10.19	25.51	3.41	-0.23	0.48
7	5.01	10.32	25.66	1.10	1.03	1.05
8	4.93	10.34	25.62	-0.53	1.24	0.89
9	5.16	10.28	25.71	4.03	0.60	1.27

ตารางที่ ผ. 23 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจราจรขวา (ใช้ทุกกรณีของช่องจราจรขวามาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr	Nt
1	5.37	9.45	24.27	8.23	-7.46	-4.39
2	5.66	9.51	24.69	14.09	-6.86	-2.76
3	5.66	9.41	24.49	14.21	-7.83	-3.53
4	4.52	9.76	24.03	-8.90	-4.50	-5.36
5	4.35	9.66	23.67	-12.26	-5.44	-6.77
6	3.94	9.72	23.37	-20.52	-4.89	-7.94
7	3.21	9.66	22.54	-35.24	-5.39	-11.22
8	2.98	10.13	23.23	-39.89	-0.86	-8.49
9	3.32	9.97	23.26	-33.02	-2.42	-8.40

ตารางที่ ผ. 24 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจรรยาจรรยา (ใช้กรณีความเร็วเข้าของช่องจรรยาจรรยาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	IL Slow	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr
1	4.59	10.17	24.93	-7.49	-0.46	-1.83
2	4.87	10.25	25.36	-1.89	0.32	-0.11
3	4.87	10.15	25.16	-1.76	-0.68	-0.89
4	3.73	10.45	24.63	-24.75	2.27	-3.00
5	3.54	10.36	24.26	-28.58	1.40	-4.46
6	3.11	10.41	23.93	-37.34	1.91	-5.75
7	2.44	10.31	23.06	-50.89	0.96	-9.17
8	2.18	10.79	23.75	-56.02	5.58	-6.45
9	2.54	10.63	23.80	-48.76	4.05	-6.27

ตารางที่ ผ. 25 ผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรงกรณี  
ช่องจรรยาจรรยา (ใช้กรณีความเร็วปกติของช่องจรรยาจรรยาเป็นตัวแทนในการหาเส้นอิทธิพล)

Case Right	Weight (T)			ERROR (%)		
	IL Fast	Nf	Nr	Nt	Nf	Nm = Nr
1	5.73	9.10	23.93	15.55	-10.94	-5.77
2	6.02	9.15	24.33	21.44	-10.40	-4.18
3	6.03	9.05	24.14	21.64	-11.39	-4.94
4	4.89	9.41	23.70	-1.42	-7.92	-6.65
5	4.73	9.31	23.35	-4.59	-8.86	-8.03
6	4.34	9.37	23.07	-12.59	-8.31	-9.15
7	3.58	9.33	22.25	-27.75	-8.62	-12.36
8	3.37	9.79	22.95	-32.14	-4.15	-9.62
9	3.70	9.63	22.96	-25.47	-5.71	-9.57

ตารางที่ ผ. 26 สรุปผลการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีเส้นอิทธิพลจากการตรวจวัดโดยตรง

Case	Lane	Direct Measurement			
		All*	All	Slow	Fast
1	Left	-1.15	-4.82	-0.93	-6.84
2		-1.57	-5.95	-2.08	-7.95
3		-2.48	-7.36	-3.53	-9.34
7		-0.59	-4.43	-0.56	-6.44
8		-5.80	-8.81	-5.23	-10.69
9		-4.41	-8.36	-4.77	-10.24
13		-5.42	-8.61	-4.99	-10.47
14		-4.88	-9.39	-5.89	-11.19
15		-5.54	-9.51	-5.96	-11.34
4	Right	-14.61	-4.39	-1.83	-5.77
5		-12.64	-2.76	-0.11	-4.18
6		-13.53	-3.53	-0.89	-4.94
10		-14.80	-5.36	-3.00	-6.65
11		-15.27	-6.77	-4.46	-8.03
12		-16.39	-7.94	-5.75	-9.15
16		-20.34	-11.22	-9.17	-12.36
17		-16.39	-8.49	-6.45	-9.62
18		-17.62	-8.40	-6.27	-9.57

\* ไม่พิจารณาช่องจราจร



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศธร อร่ามวัต เกิดเมื่อวันที่ 6 มิถุนายน พ.ศ. 2531 มีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี บิดามีอาชีพเป็นข้าราชการ มารดาประกอบอาชีพธุรกิจส่วนตัว มีพี่น้องจำนวน 3 คน โดยเป็นลูกชายคนกลาง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ กาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อปี พ.ศ. 2554

และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 ภาคการศึกษาที่ 1

