

ตัวคุณเพิ่มน้ำหนักบรรพทศกรสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ

นายเอกชาติ เพ็ชรอัฒขาว



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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.

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIVE LOAD FACTOR FOR BRIDGE EVALUATION IN MOTORWAY NETWORK

Mr. Egachat Pecharckhao



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	ตัวคุณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการประเมินสะพานใน
	โครงข่ายทางหลวงพิเศษ
โดย	นายเอกชาติ เพ็ชรอัครชาว
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ธีระชัย ดีสมสุข)

เอกชาติ เพ็ชรอัคราช : ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ (LIVE LOAD FACTOR FOR BRIDGE EVALUATION IN MOTORWAY NETWORK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว, 147 หน้า.

งานวิจัยนี้เสนอการพัฒนาตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแบบเฉพาะเจาะจงสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ หมายเลข 9 เพื่อให้ผลการประเมินสะพานสะท้อนค่าระดับความปลอดภัยที่แท้จริง ตามลักษณะการบรรทุกน้ำหนักของยานยนต์จริงในสายทาง ด้วยหลักเกณฑ์และเงื่อนไขด้านความปลอดภัยตามมาตรฐาน AASHTO LRFR โดยอาศัยข้อมูลการตรวจชั่งน้ำหนักบรรทุกระยะยาวจากสะพานชั่งน้ำหนักแห่งหนึ่งโครงข่ายทางหลวง ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา และกล้อง แล้วทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ข้อมูลรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้กว่า 4,000 คันได้ถูกนำไปหาค่าน้ำหนักและระยะห่างเพลลา จากนั้นนำผลน้ำหนักบรรทุกจริงของยานยนต์ที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่เหมาะสม สำหรับรถบรรทุกไทยด้วยทฤษฎีความเชื่อมั่นโครงสร้างตามมาตรฐาน AASHTO LRFR จากการตรวจชั่ง พบรถบรรทุกหนักฝ่าฝืนบรรทุกเกินพิกัดกฎหมายในโครงข่ายทางหลวงพิเศษอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้การประเมินความปลอดภัยสะพานต้องคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกไทยตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวง ด้วยค่าประมาณ 1.70 เพื่อให้ผลประเมินความปลอดภัยสะพานเป็นไปเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐานสากลและสะท้อนการบรรทุกน้ำหนักตามความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินระดับความปลอดภัยการใช้งานสะพาน พบว่าสะพานในโครงข่ายยังมีระดับความปลอดภัยไม่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570570721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: LIVE LOAD FACTOR/ BRIDGE WIM/ MOTORWAY/ LRFR

EGACHAT PECHARDKHAO: LIVE LOAD FACTOR FOR BRIDGE EVALUATION IN MOTORWAY NETWORK. ADVISOR: ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, Ph.D., 147 pp.

The research presents the development of site – specific load factors for bridge evaluation in Motorway network no.9 in order to reflect the actual truck weight and to guarantee the safety as required by the current American Association of State Highway Officials, Load and Resistance Factor Rating manual (AASHTO, LRFR). A long term truck weight monitoring from one bridge weight – in – motion in the network is adopted to record the actual truck weights and their configurations for about 1 month. About 4,000 trucks were recorded during the test and significant overloaded trucks were observed. Based on the obtained truck data, the appropriate live load factor on legal trucks for Motorway network is developed based on reliability theory and criterions as given in AASHTO LRFR. The live load factor of about 1.70 is found to be appropriate for bridge evaluation with legal trucks in order to reflect the actual loads and to comply with safety requirement according to the AASHTO standard. However, based on this standard, the obtained ratings of the bridges in the network indicate their safety levels are above the minimum limit.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และครูอาจารย์ที่ช่วยอบรม สั่งสอนวิชาความรู้ และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าได้มีการศึกษา หน้าที่การงานจนเติบโตใหญ่ถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์นี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้วิชาอันสำคัญในการประกอบงานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว ที่ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย ได้ให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการศึกษา รวมถึงแนวทางการแก้ไขปัญหา และ ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ฉิมไชย ที่ให้ความกรุณาปรับเป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง อาจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล และ ดร.ธีระชัย ตีสมสุข ที่ให้ความกรุณาปรับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและหน่วยงานบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา คุณวรรณกร สวัสดิ์ ธุรการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ช่วยเหลืออนุเคราะห์ข้อมูลอันสำคัญระหว่างการศึกษาในมหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณทีมงานการทดสอบสะพานและหน่วยงานของกรมทางหลวงที่อำนวยความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบสะพาน ตลอดจนข้อมูลแบบก่อสร้างซึ่งเป็นข้อมูลอันสำคัญต่อการประกอบงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆตลอดการทำงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าหวังว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการต่อยอดทางความคิด เพื่อเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นอันเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไป

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	1
1.2.1 งานวิจัยที่ศึกษาการปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร.....	1
1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน .....	6
1.2.3 งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่ทั้งแบบใช้อุปกรณ์ ตรวจจับเพลลาและแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา .....	7
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	9
1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย .....	10
บทที่ 2 .....	11
2.1 การหาน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน.....	11
2.1.1 เส้นอิทธิพลที่ได้จากการปรับเทียบสะพานตาช้าง .....	11
2.1.2 การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัด.....	12
2.2 ทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบล (Gumbel's Extreme value type I distribution) .....	17
2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง.....	20
2.3.1 ความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ (Probability of failure) .....	20
2.3.2 ดัชนีความเชื่อมั่น และการเลือกค่าเป้าหมาย .....	23

2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับดัชนีความเชื่อมั่น (Time period & Reliability index)	26
2.4 กำลังต้านทานของคานคอนกรีตอัดแรง.....	27
2.4.1 การออกแบบความต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะสุดขีด (Extreme event limit states).....	27
2.4.2 การออกแบบความต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง.....	29
2.5 อัตราส่วนความปลอดภัยในการประเมินโครงสร้างสะพาน.....	32
บทที่ 3.....	34
3.1 การสำรวจเบื้องต้นตลอดทั้งสายทาง (Visual Inspection).....	35
3.1.1 การประเมินสภาพการใช้งานสะพาน (Condition rating).....	35
3.1.2 ระบบของโครงสร้างสะพานส่วนบน (Structural system of super structure).....	41
3.2 การคัดเลือกสะพานสำหรับการตรวจวัด (Bridge site).....	42
3.3 การเตรียมการทดสอบสะพาน.....	44
3.3.1 ระบบการบันทึกข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	44
3.3.1.1 มาตรวัดความเครียด (Strain Gauge).....	45
3.3.1.2 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (Axle Detector).....	45
3.3.1.3 กล้อง (Camera).....	46
3.3.1.4 กล้องบริจคอมพลีทชั่น (Bridge completion).....	46
3.3.1.5 สายแลน (Cable unshielded twist pair).....	47
3.3.1.6 กล้องเก็บข้อมูล (Data logger).....	48
3.3.1.7 คอมพิวเตอร์ (Computer).....	48
3.3.2 การติดตั้งและตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัด.....	49
3.4 การทดสอบสะพาน.....	51
3.5 การคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกจากผลการทดสอบภาคสนาม.....	55



3.6 การตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกระยะยาว .....	57
3.7 น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัด .....	58
3.8 ผลจากการตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกระยะยาว .....	62
บทที่ 4 .....	67
4.1 ลักษณะทางกายภาพของสะพานในสายทาง .....	67
4.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพาน (Dead load).....	73
4.1.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน.....	75
4.2 แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจร (Live load model).....	79
4.2.1 ข้อกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ภายในประเทศไทย .....	79
4.2.2 มาตรฐานน้ำหนักบรรทุกจร HL – 93 .....	81
4.2.3 ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก (Distribution factor) .....	83
4.2.4 ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (ADTT).....	84
4.2.5 ความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกันหลายคัน (Multiple presence).....	86
4.2.6 ตัวประกอบการกระแทกทางพลศาสตร์ (Impact factor).....	90
4.3 การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร.....	93
4.4 ผลของน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง .....	95
บทที่ 5 .....	112
5.1 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่น.....	112
5.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่น .....	113
5.2.1 ค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่ได้จากเส้นความชันสูงสุดจากกรณีที่ 1 .....	114
5.2.2 ค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่ได้จากข้อมูลถัดจากความชันสูงสุดจากกรณีที่ 2.....	123
5.3 ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง .....	131

5.4 การประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating).....	132
บทที่ 6 .....	134
รายการอ้างอิง .....	137
ภาคผนวก ก.....	141
ภาคผนวก ข.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	147



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  และ  $P_f$  ..... 24

ตารางที่ 3.1 ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFR (6A.4.2.3-1 – Condition Factor)..... 36

ตารางที่ 3.2 ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพานในโครงข่ายสายทาง ..... 36

ตารางที่ 3.3 ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพาน..... 37

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของกลุ่มสภาพของโครงสร้างส่วนบน..... 40

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวคูณสำหรับระบบโครงสร้างสะพาน..... 42

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ในการทดสอบ..... 52

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้งานในประเทศไทย..... 59

ตารางที่ 3.8 มาตรฐานรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5เพลลาที่ใช้งานในประเทศไทย..... 59

ตารางที่ 3.9 มาตรฐานรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6เพลลาที่ใช้งานในประเทศไทย..... 60

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานรถบรรทุกพ่วง 5เพลลาที่ใช้งานในประเทศไทย..... 60

ตารางที่ 3.11 มาตรฐานรถบรรทุกพ่วง 6เพลลาที่ใช้งานในประเทศไทย..... 61

ตารางที่ 3.12 สรุปข้อมูลรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้จากโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ถนนกาญจนาภิเษก วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครฝั่งใต้..... 62

ตารางที่ 3.13 สรุปข้อมูลรถบรรทุกสิบล้อทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว ..... 63

ตารางที่ 3.14 สรุปข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว..... 64

ตารางที่ 3.15 สรุปข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว..... 64

ตารางที่ 3.16สรุปข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 5เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว..... 65

ตารางที่ 3.17 สรุปข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 6เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว..... 66

ตารางที่ 3.18 สรุปข้อมูลทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว..... 66

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดมาตรฐานและข้อกำหนดสำหรับการก่อสร้างสะพานในสายทาง ..... 67

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ทางสถิติของน้ำหนักบรรทุกคงที่ .....	74
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากการตรวจวัดสะพานคอนกรีตอัดแรงระบบคานหลักรูปตัวไอ.....	77
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับความต้านทานของสะพานที่เลือกใช้ในงานวิจัย.....	78
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลปริมาณจราจรเฉลี่ย คัน / วัน บนทางหลวงสาย 9 ตอนควบคุมที่ 100 สาย ทาง:พระประแดง, แขวงการทาง: สำนักบำรุงทางธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร .....	85
ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างมาตรฐานการแบ่งสัดส่วนของโอกาสความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกวิ่งพร้อมกัน หลายคันแปรผันตามปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน .....	87
ตารางที่ 4.7 ตัวประกอบการกระจายแกกสำหรับการออกแบบของ AASHTO LRFD.....	91
ตารางที่ 4.8 ผลจากการจำลองข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัดในสายทางเพื่อหาผลของ โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด .....	94
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้อ้างอิงสำหรับความต้านทานของหน้าตัด.....	112
ตารางที่ 5.2 ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการประเมินจากมาตรฐาน AASHTO LRFR.....	113
ตารางที่ 5.3 อัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating) ด้านโมเมนต์ดัดที่ระดับ Operating level ของสะพาน.....	133
ตารางที่ 5.4 อัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating) ด้านแรงเฉือนที่ระดับ Operating level ของสะพาน.....	133
ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ .....	141
ตารางที่ ก.2 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการต้านทานสะพานสำหรับโครงสร้างส่วนบนแบบ I - Girder.....	141
ตารางที่ ก.3 ตัวประกอบการกระจายแกกทางพลศาสตร์ ( $\overline{IM}$ ).....	141
ตารางที่ ก.4 ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (ADTT).....	141
ตารางที่ ก.5 ความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกวิ่งบนสะพานพร้อมกันหลายคัน ( $P_{s \times s}$ ).....	142
ตารางที่ ข.1 วิธีการปรับเทียบค่า $\beta$ (LRFD 5.8.3.4.2-1).....	145

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การปรับเทียบสะพานตาช้างด้วยรถบรรทุก .....	12
รูปที่ 2.2 การคำนวณค่าโมเมนต์ดัดของสะพานที่ได้จากน้ำหนักรถจำลอง ความเร็ว และ ระยะห่างเพลลา.....	13
รูปที่ 2.3 เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางสะพานที่ได้จากการ ตรวจวัดจริง.....	14
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการหาน้ำหนักรถบรรทุกสิบล้อ .....	16
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างลักษณะการแจกแจงโมเมนต์จากรถบรรทุกที่ตรวจวัดจริงหารด้วยโมเมนต์จาก รถมาตรฐาน HL - 93 เปรียบเทียบกับการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ.....	18
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างค่าการกระจายสะสมสูงสุดของที่ระยะเวลา 5ปี และ10ปี โมเมนต์จาก รถบรรทุกที่ตรวจวัดจริงหารด้วยโมเมนต์จากรถมาตรฐาน HL - 93.....	18
รูปที่ 2.7 หลักการพื้นฐานของความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ ( $P_f$ ).....	20
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของค่ามาตรฐาน ( $Z$ ) กับความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ ( $P_f$ ) .....	22
รูปที่ 2.9 การเลื่อนของเส้นโค้ง Load effect และ Resistance เมื่อสะพานถูกใช้งานตามเวลาที่ เพิ่มขึ้น .....	26
รูปที่ 2.10 ตาราง $\beta$ สำหรับการปรับเทียบค่าระหว่าง $\epsilon_x$ และ $\frac{v}{f_c}$ .....	31
รูปที่ 3.1 เส้นทางที่ทำการพิจารณาในโครงข่ายสายทาง .....	35
รูปที่ 3.2 สัดส่วนของระบบโครงสร้างส่วนล่าง.....	39
รูปที่ 3.3 สัดส่วนของช่วงพาดสะพานในสายทางที่พิจารณา .....	40
รูปที่ 3.4 สัดส่วนกลุ่มสภาพของโครงสร้างส่วนบน .....	41
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการเสื่อมสภาพของโครงสร้างส่วนบนพอใช้ระดับ 3 .....	41
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่ตั้งการตรวจวัดข้อมูลรถบรรทุกระยะยาว .....	43
รูปที่ 3.7 ลักษณะของภูมิประเทศที่ทำการตรวจวัดข้อมูลระยะยาว .....	44

รูปที่ 3.8	มาตรวัดความเครียดที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักยกยานตีในสายทาง .....	45
รูปที่ 3.9	ระบบการตรวจจับเพลาดัดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางของขอบทางทั้งสองข้าง.....	46
รูปที่ 3.10	การติดตั้งกล่องวงจรปิดบนขอบทางสะพาน .....	46
รูปที่ 3.11	ตำแหน่งการติดตั้งกล่องปริจคอมพลีชัน.....	47
รูปที่ 3.12	การวางตำแหน่งสายแลนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การตรวจวัด.....	47
รูปที่ 3.13	กล่องเก็บข้อมูลที่มีช่องแปรสัญญาณจำนวน 8 ช่อง.....	48
รูปที่ 3.14	คอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด .....	49
รูปที่ 3.15	การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสะพาน .....	50
รูปที่ 3.16	การติดตั้งมาตรวัดความเครียดและสายแลนสำหรับการตรวจวัดสะพาน.....	50
รูปที่ 3.17	แสดงแผนผังตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสะพาน .....	51
รูปที่ 3.18	แสดงแผนการดำเนินงานของการตรวจวัดสะพาน .....	51
รูปที่ 3.19	การทดสอบเปรียบเทียบสะพานตาข่ายด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ .....	52
รูปที่ 3.20	การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 (20 ตัน) ที่ความเร็วต่ำในช่องจราจรที่ 2 .....	53
รูปที่ 3.21	การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 (25 ตัน) ที่ความเร็วต่ำในช่องจราจรที่ 2 .....	53
รูปที่ 3.22	การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 (20 ตัน) ที่ความเร็วปานกลางในช่องจราจร ที่ 2.....	54
รูปที่ 3.23	การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 (25 ตัน) ที่ความเร็วปานกลางในช่อง จราจรที่ 2 .....	54
รูปที่ 3.24	การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 (20 ตัน) ที่ความเร็วสูงในช่องจราจรที่ 2 .....	54
รูปที่ 3.25	การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 (25 ตัน) ที่ความเร็วสูงในช่องจราจรที่ 2 .....	55
รูปที่ 3.26	เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดจริง และโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ $L/3$ .....	56
รูปที่ 3.27	เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดจริง และโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ $L/2$ .....	56
รูปที่ 3.28	เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดจริง และโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ $2L/3$ .....	57
รูปที่ 3.29	ระบบการตรวจวัดของ Sensor manager ในขณะที่ทำการเก็บบันทึกข้อมูลรถบรรทุก .	58

รูปที่ 3.30 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุก 10 ล้อ.....	59
รูปที่ 3.31 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา.....	59
รูปที่ 3.32 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา.....	60
รูปที่ 3.33 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา.....	60
รูปที่ 3.34 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา.....	61
รูปที่ 3.35 แสดงสัดส่วนของรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้ตลอดระยะเวลา 41 วัน.....	62
รูปที่ 3.36 ข้อมูลรถบรรทุก 10 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด .....	63
รูปที่ 3.37 แสดงข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา 18 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด .....	63
รูปที่ 3.38 แสดงข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด .....	64
รูปที่ 3.39 แสดงข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 5 เพลา 18 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด.....	65
รูปที่ 3.40 แสดงข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด.....	65
รูปที่ 3.41 แสดงข้อมูลรถบรรทุกทุกประเภทที่ได้จากการตรวจวัด .....	66
รูปที่ 4.1 รูปแบบหน้าตัดของสะพานตามแบบก่อสร้างสะพานทั้งโครงข่าย.....	68
รูปที่ 4.2 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 15 เมตร.....	69
รูปที่ 4.3 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวซีที่ช่วงพาดสะพาน 15 เมตร .....	70
รูปที่ 4.4 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 20 เมตร.....	71
รูปที่ 4.5 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวซีที่ช่วงพาดสะพาน 20 เมตร .....	71
รูปที่ 4.6 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 22 เมตร.....	72
รูปที่ 4.7 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวซีที่ช่วงพาดสะพาน 22 เมตร .....	73
รูปที่ 4.8 เล่ม 122 ตอนพิเศษ 150 ง ราชกิจจานุเบกษา 28 ธันวาคม 2548 .....	80
รูปที่ 4.9 เล่ม 126 ตอนพิเศษ 92 ง ราชกิจจานุเบกษา 30 มิถุนายน 2552.....	81
รูปที่ 4.10 น้ำหนักรถบรรทุกมาตรฐาน HS20 – 44.....	82
รูปที่ 4.11 น้ำหนักทางรถ.....	82
รูปที่ 4.12 น้ำหนักรถบรรทุกช่วงเพลาล้อ.....	83

รูปที่ 4.13 ข้อมูลสัดส่วนรถบรรทุกบนทางหลวงสาย 9.....	85
รูปที่ 4.14 รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรที่ติดกันแบบชิดกัน.....	87
รูปที่ 4.15 รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรที่ติดกันแบบไม่ชิดกัน.....	88
รูปที่ 4.16 รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรเดียวกัน.....	88
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (เอกวิทย์ ชันแก้ว" 2012).....	92
รูปที่ 4.18 ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งต่างๆจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก 10 ตันขึ้นไป 4,975 คัน (เอกวิทย์ ชันแก้ว" 2012).....	92
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการจำลองน้ำหนักบรรทุกจากรถบรรทุกจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถบรรทุก.....	93
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณี 1 ผลของโมเมนต์ดัดที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยโมเมนต์ดัดที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93.....	97
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณี 1 ผลของแรงเฉือนที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยแรงเฉือนที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93.....	97
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15เมตร.....	98
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15เมตร.....	98
รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15เมตร.....	99
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15เมตร.....	99
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20เมตร.....	100
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20เมตร.....	100



รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 20เมตร .....	101
รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 20เมตร .....	101
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 22เมตร .....	102
รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 22เมตร .....	102
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 22เมตร .....	103
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 22เมตร .....	103
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณีที่ 2 ผลของโมเมนต์ตัด ที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยโมเมนต์ตัดที่ได้จาก มาตรฐาน AASHTO HL - 93.....	104
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณีที่ 2 ผลของแรงเฉือนที่ ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยแรงเฉือนที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93 .....	104
รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 15เมตร .....	105
รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 15เมตร .....	106
รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 15เมตร .....	106
รูปที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 15เมตร .....	107







รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรง เฉือนที่สองช่องจราจร (AASHTO HL – 93).....	130
รูปที่ ข.1 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 22เมตร.....	143



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางเศรษฐกิจส่งผลต่อการขยายความเจริญของประเทศ ทำให้เกิดการพัฒนาระบบขนส่งมวลชน โดยถนนและสะพานถูกออกแบบให้มีความสามารถรองรับการใช้งานของยานพาหนะประเภทต่างๆ เช่น รถยนต์ส่วนบุคคล, รถสิบล้อ, รถกึ่งพ่วง และรถพ่วง ให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงภายในประเทศ แต่ด้วยระยะเวลาการใช้งานอันยาวนานอีกทั้งมียานพาหนะจำนวนมากที่ฝ่าฝืนกฎหมายข้อบังคับน้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบโครงข่ายสายทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างสะพานซึ่งทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลงกว่าที่ได้ออกแบบไว้ ส่งผลต่องบประมาณการบำรุงรักษาและซ่อมแซมสะพาน

โครงข่ายทางหลวงพิเศษถือเป็นสายทางหลักที่มีการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกหนักจำนวนมากกว่าทางหลวงสายอื่นๆ ทำให้เกิดความเป็นห่วงถึงระดับความปลอดภัยและอายุใช้งานของโครงสร้างสะพานในโครงข่าย ด้วยปัญหาด้านการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดกฎหมาย ประกอบกับทางหลวงพิเศษได้เรียกเก็บค่าผ่านทาง จึงมีความจำเป็นต้องวางแผนป้องกันการเกิดความเสียหายที่อาจมีต่อโครงสร้างสะพาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงถึงการให้บริการต่อผู้ใช้ทางหากต้องปิดซ่อมแซมสะพานในโครงข่าย

ด้วยเหตุและผลดังกล่าว จึงทำการศึกษาตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อการประเมินความมั่นคงแข็งแรงของสะพานด้วยวิธี Load and resistance factor rating (LRFR) ตามมาตรฐาน (American Association of State Highway and Transportation Officials" 2011) ในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ โดยใช้หลักการพื้นฐานวิเคราะห์ดัชนีความเชื่อมั่นของโครงสร้างด้วยวิธีการสถิติ (Reliability index), (Ang 2007) และการปรับเทียบค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรจากข้อมูลน้ำหนักบรรทุกของยานยนต์ในโครงข่ายที่สุ่มตรวจซึ่งจริง ด้วยระบบตรวจซึ่งน้ำหนักของยานชนิดติดตั้งได้สะพาน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะทำให้สามารถประเมินระดับความมั่นคงแข็งแรงของสะพานได้อย่างถูกต้องใกล้เคียงจริงตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล

### 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

#### 1.2.1 งานวิจัยที่ศึกษาการปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร

(Nowak 1999), ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสะพานในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งข้อมูลก็นำมาใช้ประกอบไปด้วยสะพานจำนวน 200 แห่งในหลายๆรัฐซึ่งในแต่ละแห่งจะมีลักษณะทาง

กายภาพที่แตกต่างกันเช่น วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง, ประเภทของสะพาน, ความยาวช่วง และข้อมูลทางสถิติของน้ำหนักบรรทุกจร (มาตรฐาน HS - 20) ที่เก็บวัดผ่านเครื่องมือ Weight - in - motion เพื่อใช้ในแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจร โดยนำข้อมูลที่เก็บได้จากหน้าสนาม มาประยุกต์ใช้ผ่านทฤษฎี Reliability analysis ซึ่งกำหนดค่าการออกแบบการใช้งานสูงสุดที่ 75 ปี (Inventory rating) ด้วยดัชนีความเชื่อมั่นเท่ากับ 3.5 (ความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติเท่ากับ  $1/4300$ ) โดยการศึกษาประกอบไปด้วยวิธีการปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักด้วยวิธีการวิเคราะห์ความเชื่อมั่น การจำลองแรงที่กระทำต่อโครงสร้างซึ่งได้แก่น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ และน้ำหนักบรรทุกจรซึ่งได้สมมติให้มีการกระจายแบบ Normal distribution ในขณะที่การจำลองค่ากำลังต้านทานของโครงสร้างสมมติการกระจายแบบ Lognormal distribution ส่วนการพัฒนาค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักจะมีการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและข้อมูลประสิทธิภาพการใช้งานของสะพานในอดีตเป็นข้อมูลสำหรับการอ้างอิงเพื่อพัฒนาค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักและกำหนดค่าเป้าหมายซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนในการพิจารณาดังนี้คือ (1) น้ำหนักคงที่ของโครงสร้าง (2) น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำต่อโครงสร้างโดยข้อมูลดังกล่าวจะอ้างอิงจากค่าเฉลี่ยเชิงสถิติของน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการเก็บวัดข้อมูลหน้าสนามและ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดที่กระทำต่อโครงสร้าง สำหรับหนึ่งช่องทางจราจร และสองช่องทางจราจร และ (3) น้ำหนักพลศาสตร์ที่เป็นวิธีการจำลองผ่านพื้นฐานการทดลอง โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาจากช่วงความยาวของโครงสร้างและผิวของการจราจร

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานในอดีต และค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณโดยมีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับเป้าหมายค่าดัชนีความเชื่อมั่นซึ่งค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักที่เหมาะสมคือ  $\gamma_L = 1.25$  สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และ  $\gamma_L = 1.50$  สำหรับผิวยางมะตอย,  $\gamma_L = 1.70$  สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร ส่วนของค่าตัวคูณกำลังหน้าตัดที่เหมาะสมคือ  $\gamma_L = 1.00$  สำหรับกำลังต้านแรงดัดและแรงเฉือนในคานเหล็ก,  $\gamma_L = 1.00$  สำหรับกำลังต้านแรงดัดในคานคอนกรีตอัดแรง และ  $\gamma_L = 0.90$  สำหรับกำลังต้านแรงดัดและแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

(Moses 2001), ศึกษาการหาค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Load factor) สำหรับการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานที่ใช้งานในปัจจุบันซึ่งวิธีการพัฒนาหาค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจะอ้างอิงจากมาตรฐาน (American Association of State Highway and Transportation Officials" 1999) โดยมีรายละเอียดประกอบไปด้วย (1) พื้นฐานและวิธีการคำนวณด้วยวิธี Structural reliability index calculation spreadsheet (2) ค่าการกระจายน้ำหนักบรรทุก (3) การประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกโดยมีส่วนประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรเช่น

Nominal live load models, Multiple presence, Extreme load events, Traffic model, Distribution factors, Dynamic allowance, Structural system capacity and Member condition และ Safety index expression (4) การเปรียบเทียบการประเมินค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักโดยพิจารณาถึง Live load factor สำหรับการจัดอันดับซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยคือ Design load check, Legal load rating, One – lane bridge (5) Permit vehicles และ(6) การทดสอบสะพาน

ผลลัพธ์จากการศึกษาจากการนำเสนอค่า Load factor จะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักที่เหมาะสมกับความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานโดยพิจารณาที่ความสามารถของการใช้งานสะพานผ่านน้ำหนักบรรทุกสูงสุดซึ่งโครงสร้างสะพานสามารถต้านทานได้ (Operating rating) กำหนดค่าดัชนีความเชื่อมั่นที่ 2.5 และใช้วิธีการคำนวณด้วย Structural reliability modeling ซึ่งมีการสมมติให้ค่าน้ำหนักของบรรทุกและค่ากำลังต้านทานของโครงสร้างการกระจายผลแบบ Lognormal distribution อีกทั้งรวบรวมข้อมูลทางกายภาพของสะพานที่ทำการวิเคราะห์รวมถึงค่า Design load rating, Legal load rating, Posting และ Permit vehicle analysis ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ได้ จะถูกนำมาปรับใช้จากมาตรฐาน (American Association of State Highway and Transportation Officials" 1999) โดยมีฐานข้อมูลน้ำหนักบรรทุกของ (Nowak 1999) สำหรับตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจะเลือกตามความเหมาะสมของข้อมูลที่ถูกนำมาพิจารณาโดยถ้าน้ำหนักบรรทุกมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคตก็จะต้องทำการพิจารณาตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกใหม่อีกครั้ง

(Gongkang Fu 2006), ศึกษาข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่วิ่งบนสะพานโดยมีน้ำหนักและขนาดของบรรทุกที่เกิดขึ้นกว่ากฎหมายที่กำหนดไว้ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลระดับการใช้งานของสะพานโดยในที่นี้การประเมินสะพานจะขึ้นกับนโยบายการอนุญาตใช้รถบรรทุกภายใต้กฎหมายที่กำหนด และข้อมูลดังกล่าวจะช่วยให้เข้าใจในความไม่สม่ำเสมอของการปฏิบัติงาน

การประเมินสะพานสำหรับ Permit review นั้นมีความใกล้เคียงกับ Bridge load rating ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้จะทำให้เข้าใจถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานที่ถูกออกแบบมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ Bridge load rating (ในที่นี้จะไม่นับถึงผลของการทดสอบทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับวัสดุหรือระบบโครงสร้างของสะพาน) จะทำการประมาณกำลังของวัสดุและผลของการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนส่วนประกอบของระบบโครงสร้างการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะสะท้อนแนวคิดระหว่างการออกแบบและขั้นตอนการจัดอันดับ (Rating) สำหรับโครงสร้างสะพานโดยอ้างอิงวิธี Load rating factor (LRF) จะเป็นผลลัพธ์สำหรับการจัดอันดับสะพานที่ส่วนประกอบของสะพานเป็นส่วนเกี่ยวข้องกับโหมดของการวิบัติ การวิบัติจะประกอบไปด้วยผลของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน ค่า Load rating factor (LRF) =  $(R - A_1DL)/(A_2LL)$



โดยที่  $R$  = กำลังต้านทานของวัสดุ DL และ LL = ผลของน้ำหนักคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่มีผลต่อโครงสร้างสะพาน  $A_1$  และ  $A_2$  เป็นผลของตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร สูตรดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับหน้าตัดวิกฤตในโครงสร้างสะพานซึ่งหากค่า LRF มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.00 จะสามารถกล่าวได้ว่าโครงสร้างสะพานมีความปลอดภัย

(Mark Mlynarski 2011), ศึกษาและวิเคราะห์สะพานจำนวน 1,500 สะพานที่มีความแตกต่างกันด้านวัสดุและองค์ประกอบของสะพานโดยใช้ AASHTOWare™ Virtis® เพื่อเปรียบเทียบกับวิธี Load factor rating (LFR) และ Load and resistance factor rating (LRFR) สำหรับค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ออกแบบด้วยวิธี AASHTO Legal loads ส่วนการใช้โปรแกรม BRASS Girder (LRFD) version 2.0.3 และ BRASS Girder (LFD) version 6.0.0 เพื่อเปรียบเทียบกับวิธี Reliability index โดยมีรายละเอียดในรายงานประกอบไปด้วย (1) Summary of bridge rating analysis – เป็นการหา Bridge rating โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ (2) Reliability index calculation spreadsheet (3) การเปรียบเทียบค่า Rating factor ที่คำนวณผ่าน Spreadsheet (4) ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ต่อวัน (5) ผลกระทบของ LRFR rating ที่ระดับ Inventory rating (6) การเปรียบเทียบค่า Reliability ถึงค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร (Live load factor)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาเป็นรูปแบบของการปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรซึ่งเป็นการจัด Rating ของข้อมูลโดยจำแนกเป็นประเภทของโครงสร้าง, ประเภทบรรทุกของแต่ละประเภทและแต่ละข้อกำหนดของรัฐในประเทศสหรัฐอเมริกา ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรทั่วไปและรถพ่วง  $\gamma_L = 1.45$  สำหรับ ADTT 5000,  $\gamma_L = 1.30$  สำหรับ ADTT = 1000

(Michel Ghosn 2011), ศึกษาการปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักสำหรับสะพานที่ใช้อยู่ในรัฐนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกาให้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงของสะพานในปัจจุบันรวมถึงข้อกำหนดบรรทุกที่ใช้อยู่ในรัฐ ซึ่งในการประเมินนี้จะรวมผลของน้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่ากฎหมายที่กำหนด เพื่อให้ผลของตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการประเมินสะพานต่อไป ผลของการศึกษาจะเป็นการสรุปผลของการปรับค่าดัชนีความเชื่อมั่นของโครงสร้างที่มีประเภทและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน การปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานจะอ้างอิงวิธีการปรับแก้ค่าผ่านมาตรฐาน AASHTO LRFR ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Load rating และ Load posting ทั้งในระดับการออกแบบการใช้งาน (Inventory rating) และระดับการใช้งานสะพานที่รองรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Operating rating)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาผ่านข้อมูลน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากเครื่องมือ WIM ที่ติดตั้งบนโครงข่ายเส้นทางของรัฐนิวยอร์กพบว่าค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรมีดังนี้ (1) กรณีที่พิจารณาหลายช่องจราจรได้ค่า  $\gamma_L = 1.95$  สำหรับ ADTT 5000,  $\gamma_L = 1.85$  สำหรับ ADTT 1000 และ  $\gamma_L = 1.5$  สำหรับ ADTT 100 (2) กรณีที่พิจารณาหนึ่งช่องจราจร  $\gamma_L = 2.65$  สำหรับ ADTT 5000,  $\gamma_L = 2.50$  สำหรับ ADTT 1000 และ  $\gamma_L = 2.20$  สำหรับ ADTT 100 ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรมีค่ามากกว่ามาตรฐาน AASHTO LRFR ซึ่งมีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงในรัฐนิวยอร์ก

(สมาวิชาชีพ พฤษจินดา" 2014), ทำการศึกษาแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจร (Live load model) ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสะพานในประเทศไทยและศึกษาโอกาสความเป็นไปได้ที่สะพานช่วงต่างๆจะเกิดการวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยใช้ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกจรที่ตรวจวัดได้จากระบบ Bridge Weight in Motion (B – WIM) ในประเทศไทยและพิจารณาผ่านโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบและก่อสร้างตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง มีความยาวช่วงที่พิจารณาในช่วง 5 – 80 เมตร และพฤติกรรมแบบอิลาสติกเชิงเส้น

ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบที่ 1.75 ตามมาตรฐาน AASHTO จะทำให้สะพานที่ออกแบบมีระดับความปลอดภัยต่ำกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐานค่อนข้างมาก และนำเสนอค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการออกแบบที่ 2.20 สำหรับสะพานที่ออกแบบการใช้งานในประเทศไทยเพื่อให้ได้ระดับความปลอดภัยและอายุการใช้งานสะพานให้มีความสอดคล้องกับเป้าหมายในการออกแบบซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานสากล

#### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(Neal Lake 2014), ทำการศึกษาและปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบสะพานในประเทศไทย ออสเตรเลียโดยเฉพาะเนื้อหาในส่วนของ การจัดอันดับสะพานซึ่งมีการปรับแก้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของสะพานให้สอดคล้องกับการใช้งานในปัจจุบันโดยมีการเก็บตัวอย่างของวัสดุสะพานที่ใช้ในปัจจุบัน รวมถึงการวัดปริมาณการใช้งานของยานพาหนะซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าวจะมีผลให้ทราบถึงโอกาสที่สะพานมีโอกาสเกิดการวิบัติในกรณีต่างๆ การออกแบบสะพานในออสเตรเลียมีมาตรฐานสำหรับการออกแบบขีดจำกัดที่สภาวะการใช้งานที่ 20 ปี และการออกแบบขีดจำกัดที่สภาวะประลัยที่ 2,000 ปี การจัดอันดับของสะพานจะพิจารณาที่ (1) ที่ระดับขีดจำกัดสภาวะการใช้งาน (2) ที่ระดับขีดจำกัดการใช้งานสูงสุด และ (3) ที่ระดับขีดจำกัดความล้าของวัสดุ และในส่วนของค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่นำมาพิจารณาประกอบไปด้วย (1) ระดับความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของโครงสร้างจะมีโอกาสเพิ่มขึ้น 3% จากการทดสอบขนาดของวัสดุที่ใช้ในปัจจุบัน (2) การตอบสนองของโครงสร้างจะสามารถทราบถึงแรงที่กระทำต่อโครงสร้างโดยผ่านการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบโครงสร้าง รวมถึงค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ซึ่งเป็นสัดส่วนของผลที่ได้รับจากการ

วิเคราะห์ (3) การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุใช้วิธีทางสถิติในการประเมินผล และ(4) ค่าพลศาสตร์การเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นหรือค่า Impact factor จะถูกใช้บนพื้นฐานของผลลัพธ์ที่วัดได้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาจะแบ่งค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรเป็น 2 กรณีคือ (1) การจราจรทั่วไปซึ่งมีรายละเอียดของค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรดังนี้  $\gamma_L = 1.80$  สำหรับ SM1600 น้ำหนักการจราจรบนท้องถนน เส้นทางคนเดินเท้า รวมถึงน้ำหนักบรรทุกเจาะจงสำหรับการเข้าถึงทั่วไป,  $\gamma_L = 2.00$  สำหรับถนนและเส้นทางคนเดินอื่นๆ และ (2) การจราจรที่ได้รับอนุญาตซึ่งมีรายละเอียดของค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรดังนี้  $\gamma_L = 1.80$  สำหรับ SM1600 น้ำหนักการจราจรบนท้องถนน เส้นทางคนเดินเท้า รวมถึงน้ำหนักบรรทุกเจาะจงสำหรับการเข้าถึงทั่วไป,  $\gamma_L = 2.00$  สำหรับถนนและเส้นทางคนเดินอื่นๆ,  $\gamma_L = 1.50$  สำหรับการจราจรบนท้องถนนที่เป็นน้ำหนักเฉพาะเจาะจง

### 1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาความปลอดภัยในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน

(ธีระชัย ตีสมสุข" 2008), ทำการประเมินระดับความปลอดภัยในการใช้งานสะพานภายใต้สภาพการบรรทุกน้ำหนักจริง โดยได้ทำการเก็บข้อมูลสภาพการบรรทุกจริงของรถบรรทุก 10 ล้อ ด้วยระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพาน (B-WIM) และทำการประเมินความปลอดภัยด้วยวิธี Bridge load rating factor ตามมาตรฐาน AASHTO พบว่า ปริมาณรถบรรทุกกว่าร้อยละ 75 ของจำนวนทดสอบ (1000 คัน) แม้จะไม่ส่งผลเสียหายโดยตรงต่อสะพาน แต่มีผลทำให้อายุการใช้งานของสะพานสั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบข้อมูลที่น่าวิตกคือ ปริมาณรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้ประมาณ ร้อยละ 2 จากจำนวนทั้งหมด อาจจะทำให้เกิดความเสียหายโดยตรงต่อสะพานได้ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมากกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานตามทฤษฎี และยังพบว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด สูงถึง 42.90 ตัน จากน้ำหนักที่กำหนดต้องไม่เกิน 21 ตันตามกฎหมายที่บังคับใช้ในช่วงเวลาศึกษา

(กิตติ จิวโพธิ์เจริญ" 2009), ทำการศึกษาการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยและอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานแบบแผ่นพื้นโดยโครงสร้างสะพานอ้างอิงตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง สะพานมีความยาวช่วงระหว่าง 5-10 เมตรซึ่งการหาน้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อที่กระทำต่อสะพานโดยวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานในภาคสนามโดยใช้วิธีการหาน้ำหนักรถโดยปราศจากอุปกรณ์การตรวจจับเพลลา ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าน้ำหนักรถบรรทุก โดยได้ทำเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบรวม 2 วิธี คือการทดสอบจากรถบรรทุกทดสอบและทดสอบหาน้ำหนักเปรียบเทียบกับด้านชั่งน้ำหนัก และทำการพิจารณาถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานเนื่องจาก

ความล้า ซึ่งเกิดน้ำหนักของรถที่กระทำซ้ำๆ ต่อสะพาน ซึ่งผลการประเมินจากน้ำหนักบรรทุกทุกที่ทำการบันทึกพบว่าสะพานจะมีอายุการใช้งานได้มากกว่าอายุตามมาตรฐานการออกแบบของสะพาน (75ปี) และอีกประการหนึ่งของการพิจารณาการเสื่อมสภาพของสะพานได้คำนึงถึงผลจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยพิจารณาจาก 2 ปัจจัยคือผลจากคลอไรด์ และ ผลจากคาร์บอนขึ้น โดยผลของการประเมินพบว่า สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใกล้แนวชายฝั่งทะเลอาจได้รับความเสียหายจนกระทั่งต้องหยุดใช้งานเพื่อซ่อมแซมหากไม่มีการบำรุงรักษาภายใน 30 ปี ส่วนผลของการเสื่อมสภาพจากคาร์บอนขึ้นพบว่าสะพานสามารถมีอายุการใช้งานได้มากกว่าอายุตามมาตรฐานการออกแบบสะพาน ซึ่งจากผลการวิจัยทั้งหมดนี้เชื่อว่าอาจเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบ บำรุงรักษาตลอดจนการซ่อมแซม โครงสร้างสะพานให้มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพการใช้งานอย่างสูงสุด

(ราชวัลลภ กัมพูพงศ์" 2013), ทำการศึกษาผลกระทบอันเนื่องจากการจราจรของรถบรรทุกและแรงแผ่นดินไหวต่อสะพานกรมทางหลวงเพื่อคำนวณค่าต่างๆที่ใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างสะพานส่วนบน โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดสะพานประเภทต่างๆในประเทศไทย ภายใต้สภาพการจราจรปกติ และจากข้อมูลการทดสอบวัสดุเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบ รวมถึงการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงกระทำจากแผ่นดินไหวของตอม่อสะพานของกรมทางหลวงในช่วงสั้น ทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังโดยอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลจากการศึกษาทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของแรงกระทำต่อสะพานอันเนื่องมาจากการจราจรของรถบรรทุกในประเทศไทย รวมถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานประเภทต่างๆซึ่งจะช่วยให้การออกแบบโครงสร้างสะพานส่วนบนของกรมทางหลวง มีความปลอดภัยและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง

### 1.2.3 งานวิจัยที่ศึกษาระบบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่ทั้งแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาและแบบปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา

(ธวัช อัครวิทยาภูมิ" 2003), ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิกโปรแกรมมิ่ง ทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration technique) โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิกโปรแกรมมิ่งอีกครั้ง เพื่อให้ค่าน้ำหนักรถลู่เข้าหาค่าที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรก

(พัชรพงษ์ อาสนจินดา" 2004), ได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน โดยพิจารณาถึง ปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำนายน้ำหนักของรถบรรทุก อันได้แก่ ผลของความขรุขระ ผลของ จำนวนเพลลาที่เพิ่มขึ้นจากเพลลาหลังที่เป็นเพลลาเดี่ยวเป็นเพลลาคู่ และผลของสภาพของจตุรรองรับ (Support condition) หรือรูปแบบสะพานแบบหลายช่วง จากการทดสอบทั้งหมด 540 การทดสอบ พบว่า กรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลลา เคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิวไม่มีความขรุขระนั้นให้ผล การทำนายน้ำหนักรวมที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ส่วนผลการทดสอบกรณีรูปแบบสะพาน เป็นแบบต่อเนื่องและกรณีที่รถบรรทุกมีจำนวนเพลลาเพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนัก รวมสูงสุด  $\pm 20\%$

(ภาณุ พุ่งสุข" 2005), ได้ทำการทดสอบภาคสนาม โดยการทดสอบได้มีการติดตามวัด ความเครียดสำหรับวัดผลตอบสนองของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเช่นกันโดยจะทำการ ติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ได้สะพาน ผลการทดสอบทั้ง 51 การทดสอบ โดยในกรณีเคลื่อนที่ โดยใช้ช่องจราจรกลางค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับน้ำหนักรวมไม่เกิน  $\pm 6\%$  เมื่อพิจารณาผลของการ กระแทกของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งข้ามสะพานคือ ผลของการกระแทกก่อนเข้าสะพาน และผลของการกระแทกช่วงกลางสะพานพบว่าผลการทำนายน้ำหนักรวมโดยส่วนใหญ่มีค่าความ คลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$

(पालพิพัฒน์ แสงชูวงศ์" 2007), ทำการศึกษาเพื่อลดข้อจำกัดของวิธี B-WIM ที่ต้องมีการใช้ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งรถ เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลระยะห่างเพลลา จำนวนเพลลา และความเร็วรถ ซึ่งทำให้มีความไม่สะดวกในการนำไปใช้งานกับสภาพจริง จึงได้ทำการศึกษากำหนดน้ำหนักบรรทุกของรถ จากโมเมนต์ดัดของสะพานโดยปราศจากการตรวจจับเพลลา โดยได้ใช้หลักการของการหาน้ำหนักรถ โดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งมีฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) คือ ผลต่างกำลังสองระหว่างค่าโมเมนต์ดัดจากการวัด และค่าโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้โดย ทำการหาค่าที่น้อยที่สุดในฟังก์ชันจุดประสงค์นี้ โดยได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานกับ 3 สถานะการคือ (1) ทดสอบกับแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ โดยมีความสัมฤทธิ์ผลในการหาน้ำหนักรถ คิดเป็น 98% โดยที่การหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุก มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15% (2) ทดสอบ ประสิทธิภาพการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก กรณีศึกษาจากผลการทดสอบภาคสนาม โดยนำข้อมูล การทดสอบภาคสนามของ (ภาณุ พุ่งสุข" 2005) โดยสามารถหาน้ำหนักได้ทุกกรณี (47 กรณี) และ น้ำหนักรวมที่ทำได้มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ 15% (3) ทดสอบประสิทธิภาพกับการประยุกต์ใช้ งานในภาคสนาม โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ (ธีระชัย ตีสมนสุข" 2008) ซึ่งได้ทำการทดลองหา น้ำหนักรถบรรทุกขณะใช้งานจริง โดยสรุปได้ว่าวิธีการหาน้ำหนักที่ได้มีความสัมฤทธิ์ผลเพียงพอที่จะ

นำมาหาน้ำหนักบรรทุกทุกจริงได้ แต่เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าน้ำหนักจริงของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานแต่ละคันได้ จึงยังมีข้อจำกัดในการวัดประสิทธิภาพที่สภาวะแท้จริงในการใช้งานสะพานอยู่

จากผลงานวิจัยในอดีตพบว่าการพัฒนาค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Load factor) อ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO LRFD (American Association of State Highway and Transportation Officials" 2007) สำหรับการออกแบบสะพานใหม่ และถูกพัฒนามาเป็นมาตรฐาน AASHTO LRFR (American Association of State Highway and Transportation Officials" 2011) สำหรับการประเมินสะพานที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งมาตรฐานทั้งสองนี้เป็นการพัฒนาภายใต้ขอบเขตของประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น การวิเคราะห์และออกแบบจึงอ้างอิงจากสภาพการใช้งานภายในประเทศเป็นหลัก ทั้งนี้ในประเทศไทยได้มีการนำมาตรฐานดังกล่าวมาออกแบบใช้งานภายในประเทศซึ่งขอบเขตของการใช้งานจริงจึงมีความแตกต่างกัน

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร ของโครงสร้างสะพานในเส้นทางหลวงพิเศษ
2. เพื่อตรวจชั่งน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะในเส้นทางหลวงพิเศษ
3. เพื่อประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพานในเส้นทางหลวงพิเศษ

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้มาตรฐาน AASHTO LRFR เป็นมาตรฐานหลักในการศึกษา
2. พิจารณาสะพานเฉพาะในโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ถนน กาญจนภิเษก วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครฝั่งใต้
3. ใช้ระยะเวลาสุ่มตรวจชั่งน้ำหนักยวดยานประมาณ 1 เดือน

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ
2. ผลการประเมินความมั่นคงแข็งแรงของสะพานด้วยวิธี Load and resistance factor rating (LRFR) ที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของสะพานในทางหลวงพิเศษ

3. สภาพการบรรทุกน้ำหนักของยวดยานในทางหลวงพิเศษ

#### 1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจร ( Live load model ) ด้วยวิธีการ Load and resistance factor rating (LRFR) โดยผ่านการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างด้วยวิธีทางสถิติ (Reliability index)
2. เก็บรายละเอียดข้อมูลของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ
3. พิจารณาดำเนินการสะพานที่เหมาะสมต่อการเก็บข้อมูลภาคสนาม
4. เตรียมสถานที่และอุปกรณ์สำหรับติดตั้งเครื่องมือภาคสนาม
5. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ได้สะพานตัวอย่างและทำการสอบเทียบระบบตรวจซั่ง
6. ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักบรรทุกทุก ระยะห่างเพลลา ประเภทรถ และจำนวนรถเป็นเวลา 1 เดือน
7. นำผลของน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน
8. คำนวณหาค่าผลจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นในอนาคตในช่วงอายุการใช้งาน 5 ปี และ 10 ปี ด้วยการสร้างกราฟ Cumulative distribution function และใช้ Extreme value Gumbel distribution ทำนายผลในอนาคตจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก
9. วิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้างและเปรียบเทียบตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในเส้นทางศึกษา
10. สรุปผลงานวิจัย
11. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การหาน้ำหนักถ่วงบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพาน

ข้อมูลสำคัญในการออกแบบหรือประเมินสะพานที่จะทำการพิจารณา คือ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากสภาพการใช้งานจริง เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้ จะเป็นค่าที่ชี้วัดถึงความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานที่ด้านทานการใช้งาน รวมถึงสภาพความคงทนของการใช้งานอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำซ้ำๆ ตลอดระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งการได้มาของข้อมูลยวดยานพาหนะเหล่านี้ จำเป็นต้องมีเครื่องมือตรวจวัดเช่น ด้านซึ่งน้ำหนักบรรทุกถาวร ของกรมทางหลวง แต่เพื่อให้ได้ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกของยวดยานจริงในสายทางที่พิจารณาโดยที่ไม่มีอคติ (Unbiased data) จำเป็นต้องใช้วิธีสุ่มตรวจซึ่งน้ำหนักบรรทุกโดยไม่ให้ยวดยานทราบถึงการถูกสุ่มซึ่งในงานวิจัยนี้ จึงประยุกต์ใช้เทคนิคการซึ่งน้ำหนักแบบไม่จอตลอดชนิดติดตั้งใต้สะพาน (Bridge weight in motion) การใช้ระบบหาน้ำหนักจริงขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานที่พิจารณาด้วยระบบ Weight-in-motion ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ และเป็นวิธีการที่สามารถตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกให้มีความใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกจริงได้

##### 2.1.1 เส้นอิทธิพลที่ได้จากการปรับเทียบสะพานตาชั่ง

ก่อนการใช้งานของสะพานตาชั่ง จะต้องทำการปรับเทียบสะพานด้วยเครื่องมือวัดความเครียด และทำการปรับเทียบสะพานผ่านรถบรรทุกที่ทราบค่าน้ำหนักบรรทุก ระยะห่างเพลผ่านทฤษฎีเส้นอิทธิพล (Influence line method) ผลที่ได้จากการปรับเทียบสะพานตาชั่งจะอยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิบคือ ค่าความเครียดของสะพานหรือค่าโมเมนต์ดัด โดยในทุกๆ ช่วงของการเคลื่อนที่จะมีความสอดคล้องกับสมการที่ (2.1) หรือ (2.2) ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาเส้นอิทธิพลสำหรับสะพานที่พิจารณา

$$IL(x) = [P]^{-1} \times \{\varepsilon\} \quad (2.1)$$

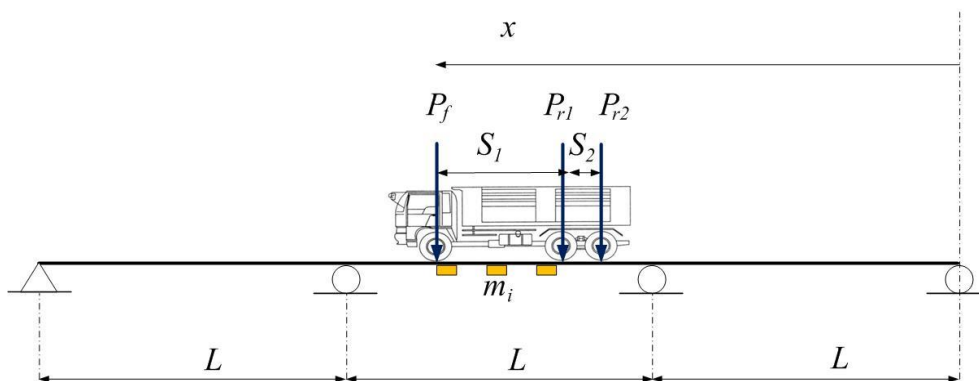
$$\text{หรือ} \quad IL(x) = [P]^{-1} \times \{m\} \quad (2.2)$$

โดยที่

$IL(x)$	=	เส้นอิทธิพลของสะพาน ณ ตำแหน่งใดๆ
$P$	=	เมทริกซ์ของน้ำหนักบรรทุกสำหรับปรับเทียบสะพานตาชั่ง
$\varepsilon$	=	ค่าความเครียดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่จุดตรวจวัด



$m$  = ค่าโมเมนต์ตัดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่จุดตรวจวัด



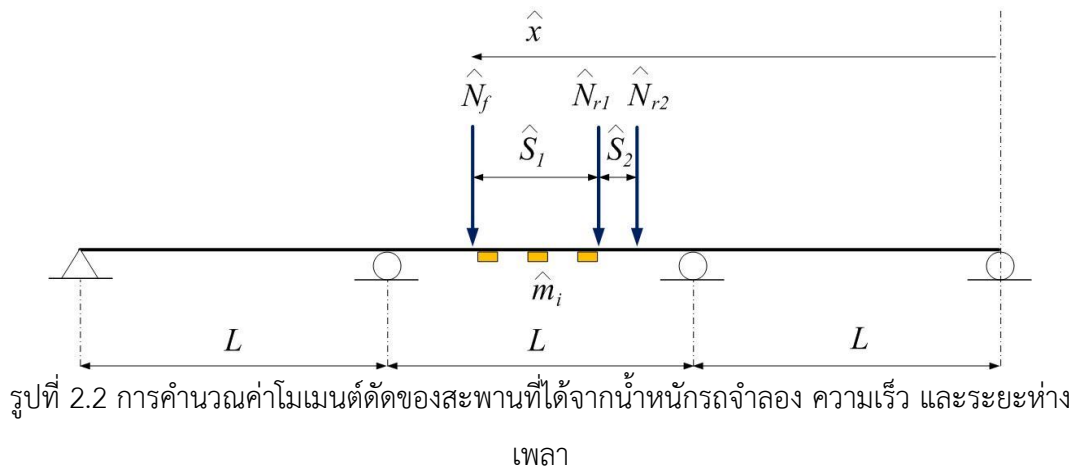
รูปที่ 2.1 การปรับเทียบสะพานตาช้างด้วยรถบรรทุก

ในส่วนของการเก็บข้อมูลระยะยาวจากการตรวจวัดรถบรรทุกในโครงข่าย ข้อมูลของรถบรรทุกที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิบที่ประกอบไปด้วย ค่าความเครียดจากอุปกรณ์มาตรวัดความเครียด, ตำแหน่งของเพลารถจากอุปกรณ์ Axle detector ที่ติดตั้งระหว่างความยาวพาดสะพาน ตั้งแต่ขาเข้าและขาออกจากช่วงสะพานที่พิจารณา ผลจากข้อมูลดิบที่ตรวจวัดได้ จะนำมาคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกและระยะห่างระหว่างเพลลา ซึ่งจะนำไปคำนวณหาตำแหน่งเพลารถบนสะพาน ( $x$ ) ต่อไป

การคำนวณหาความเร็วรถบรรทุกและตำแหน่งของเพลลา มีหลักเกณฑ์จากการกำหนดช่วงพาดสะพานซึ่งเป็นตัวแปรที่คงที่ รวมถึงอุปกรณ์ Axle detector ที่ตำแหน่งช่วงริมของขาเข้าและขาออก และมีเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านตำแหน่งของ Axle detector สัญญาณของตำแหน่งเพลลาจะถูกจัดเก็บลงในข้อมูลดิบ พร้อมกับเวลาที่ทำการตรวจวัด ซึ่งในช่วงเวลาเดียวกันนี้ ค่าสัญญาณอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา จะสอดคล้องกับสัญญาณที่ได้จากมาตรวัดความเครียด ดังนั้นการคำนวณหาความเร็วรถบรรทุก จึงเป็นการระบุตำแหน่งของเพลารถบรรทุกทั้งขาเข้าและขาออกเทียบกับเวลาที่มีการสมมติให้ความเร็วของรถบรรทุกเป็นความเร็วคงที่ ผลจากการคำนวณ จะทำให้ทราบถึงความเร็วรถบรรทุก, ระยะห่างระหว่างเพลลา และสามารถระบุประเภทของรถบรรทุกตามจำนวนเพลลาที่ตรวจวัดได้

### 2.1.2 การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัด

การคำนวณเพื่อหาน้ำหนักรถบรรทุกมีหลักเกณฑ์การคำนวณด้วยวิธีการเส้นอิทธิพล ซึ่งมีวิธีการคำนวณค่าโมเมนต์ตัดที่เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก โดยที่ทุกๆการเคลื่อนที่จะมีผลทำให้ค่าโมเมนต์ตัดเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ละตำแหน่งที่มีน้ำหนักกระทำ และใช้วิธีการหาน้ำหนักทางสถิติของรถบรรทุก ( $\hat{N}_f, \hat{N}_{r1}, \hat{N}_{r2}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



ด้วยการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าโมเมนต์ที่วัดได้ และค่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณของน้ำหนักเพลลา ตำแหน่งและระยะห่างเพลลาเป็นฟังก์ชันของความเร็วและเวลา โดยมีเวกเตอร์ของโมเมนต์ดัด  $Z$  ที่ตำแหน่งตรวจวัด  $k$  ของสะพานคือ

$$Z = \begin{Bmatrix} m_1(x) \\ m_1(x) \\ \vdots \\ m_k(x) \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

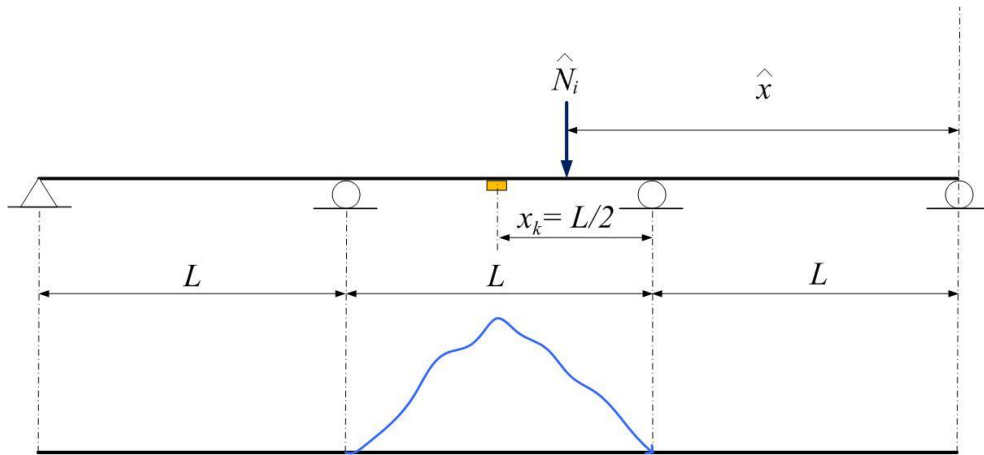
โดยที่  $m_k(x)$  คือโมเมนต์ดัดที่ตรวจวัดได้จากสะพานที่ทำการพิจารณาตำแหน่งที่  $x_k$  ในขณะที่เวกเตอร์โมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณจากตัวแปรที่ต้องการคือ  $\hat{Z}$  เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) ที่มีค่ากำลังสองของผลต่างระหว่างค่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้ และค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณ

$$\hat{Z} = \begin{Bmatrix} \hat{m}_1(x) \\ \hat{m}_2(x) \\ \vdots \\ \hat{m}_k(x) \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

$$E = \sum_{i=1}^N [(Z_i - \hat{Z}_i)^T B (Z_i - \hat{Z}_i)] \quad (2.5)$$

โดยที่เวกเตอร์  $Z = \begin{Bmatrix} m_1(x) \\ m_2(x) \\ \vdots \\ m_k(x) \end{Bmatrix}$  และ  $\hat{Z} = \begin{Bmatrix} \hat{m}_1(x) \\ \hat{m}_2(x) \\ \vdots \\ \hat{m}_k(x) \end{Bmatrix}$  อยู่ในรูปของพจน์ที่ไม่ต่อเนื่อง

(Discrete form) และมีเมทริกซ์  $B$  เป็นเมทริกซ์น้ำหนัก (Weighting matrix) ที่มีคุณสมบัติเป็นบวก (Positive definite) และ  $N$  คือ ข้อมูลน้ำหนักของรถบรรทุก 10 ล้อ 3 เพลา ที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ช่วงเดียว มีข้อมูลที่ตรวจวัดได้คือ ค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน โดยที่ค่าเหล่านี้สามารถ คำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ที่กระทำต่อสะพานได้ ดังนั้นฟังก์ชันเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัด ที่ตำแหน่งตรวจวัดจึงจะถูกนำมาพิจารณา



รูปที่ 2.3 เส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางสะพานที่ได้จากการตรวจวัด

จริง

เส้นอิทธิพล  $IL_k(x)$  นี้ได้มาจากการทดสอบสะพานด้วยน้ำหนักรถบรรทุกที่ทราบค่า (Calibration) วิ่งบนสะพานที่ความเร็ว 3 ระดับ แบ่งเป็น ความเร็วช้า, ความเร็วปานกลางและ ความเร็วสูง ในช่องจราจรต่างๆและนำมาหาเส้นอิทธิพลโดยใช้สมการที่ (2.2) ซึ่งใช้ผลการเฉลี่ยจาก เส้นอิทธิพลจากการทดสอบทุกกรณี ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัดเมื่อมีน้ำหนักสถิตมากระทำ  $\hat{N}$  จึงมีค่า เท่ากับ

$$\hat{m}_k(x) = \hat{N} \cdot IL_k(\hat{x}) \quad (2.6)$$

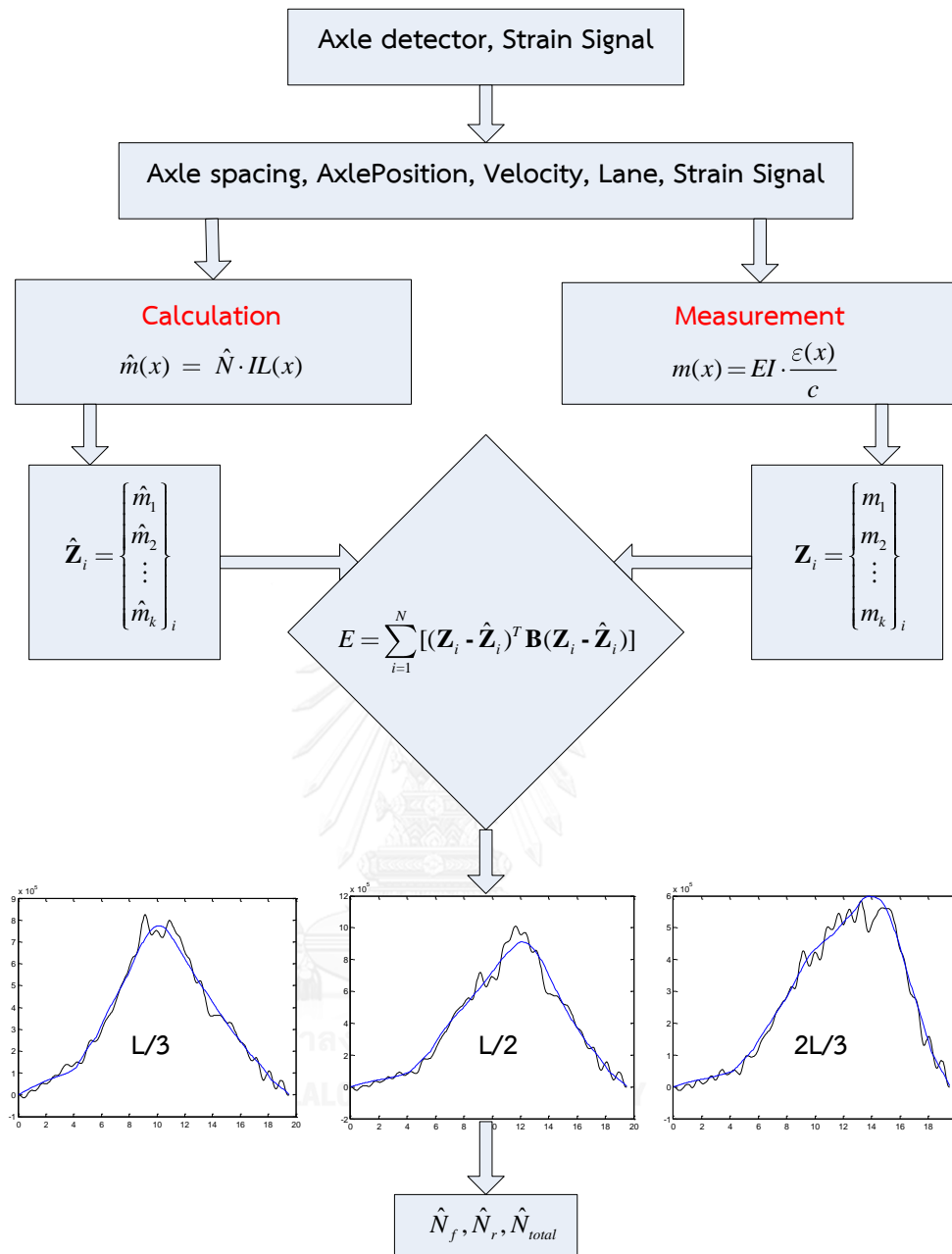
ดังนั้น ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ  $\hat{m}_k(x)$  สำหรับกรณีรถบรรทุก 10 ล้อ ที่พิจารณา 3 เพลา จะสามารถให้หลักการรวมผล (Super position method) ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดรวมที่เกิดขึ้นในสะพานได้ดังนี้

$$\begin{cases} \hat{m}_1(x) \\ \hat{m}_2(x) \\ \vdots \\ \hat{m}_k(x) \end{cases} = \begin{cases} \hat{N}_f \cdot IL_1(\hat{x}_f) + \hat{N}_{r1} \cdot IL_1(\hat{x}_{r1}) + \hat{N}_{r2} \cdot IL_1(\hat{x}_{r2}) \\ \hat{N}_f \cdot IL_2(\hat{x}_f) + \hat{N}_{r1} \cdot IL_2(\hat{x}_{r1}) + \hat{N}_{r2} \cdot IL_2(\hat{x}_{r2}) \\ \vdots \\ \hat{N}_f \cdot IL_k(\hat{x}_f) + \hat{N}_{r1} \cdot IL_k(\hat{x}_{r1}) + \hat{N}_{r2} \cdot IL_k(\hat{x}_{r2}) \end{cases} \quad (2.7)$$

ซึ่งเวกเตอร์ทางซ้ายของสมการที่ (2.7) คือเวกเตอร์โมเมนต์ตัดในสมการที่ (2.4) นี้จะเห็นว่าค่าโมเมนต์ตัดเป็นฟังก์ชันของน้ำหนักสถิต เมื่อพิจารณาบรรทัดทุก 3 บรรทัด เล่นข้ามสะพานดังกล่าว จะมีตัวแปรในฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) 3 ตัวแปร คือ น้ำหนักเพลาหน้า, น้ำหนักเพลากลาง และ น้ำหนักเพลาหลัง ดังนั้นจึงสามารถอธิบายผ่านสมการที่ (2.8) คือ

$$E = \sum_{i=1}^N [(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i(\hat{N}_f, \hat{N}_{r1}, \hat{N}_{r2}))^T \mathbf{B}(\mathbf{Z}_i - \hat{\mathbf{Z}}_i(\hat{N}_f, \hat{N}_{r1}, \hat{N}_{r2}))] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) จะสามารถหาค่าฟังก์ชันจุดประสงค์  $E$  ที่ต่ำที่สุดที่จะให้ตัวแปรที่ต้องการออกมาได้ด้วยวิธี Least square method โดยใช้ฟังก์ชัน fminunc ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งขั้นตอนของการประมวลผลจากการวัดข้อมูลต่อเนื่อง จะแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการหาน้ำหนักรถบรรทุกทุกสปีด

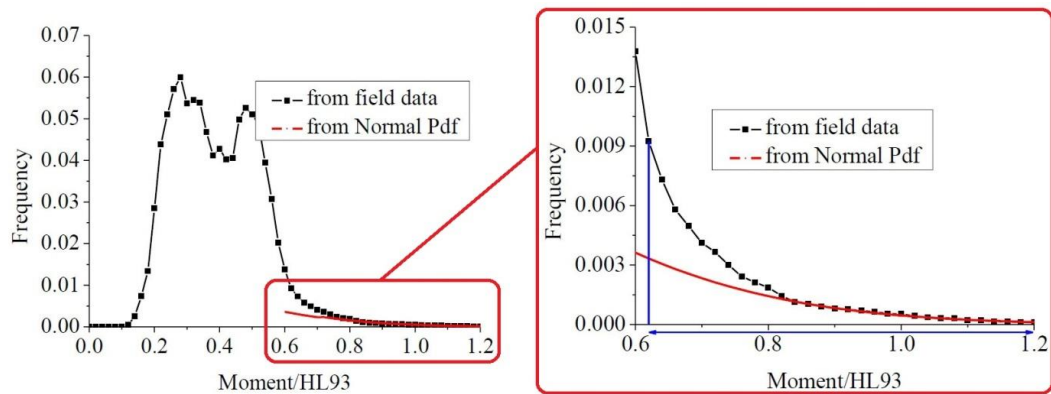
สำหรับการหาน้ำหนักรถบรรทุกทั้งพวงและรถพวงจะใช้วิธีการเดียวกับการหาน้ำหนักรถบรรทุกสปีดที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น โดยมีตัวแปรที่เพิ่มขึ้นคือ น้ำหนักเพลาและระยะห่างระหว่างเพลา ตามจำนวนเพลาที่เพิ่มขึ้นของรถแต่ละประเภท

## 2.2 ทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบล (Gumbel's Extreme value type I distribution)

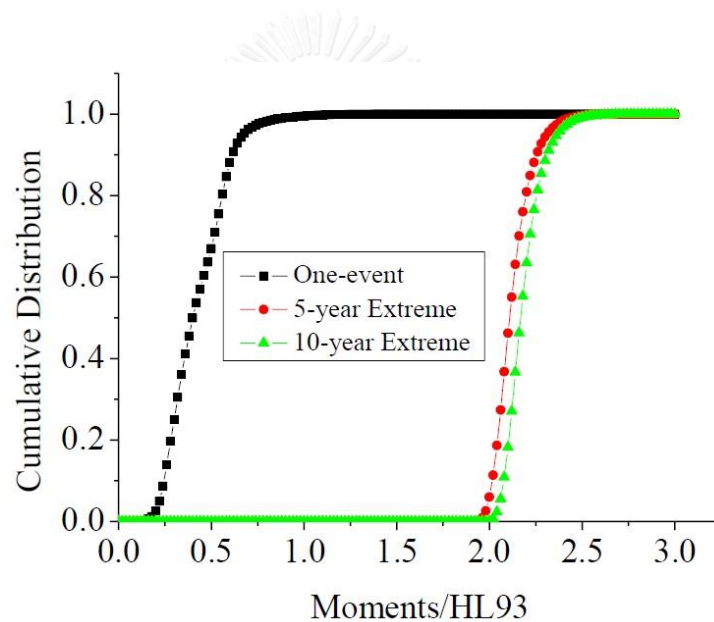
การวิเคราะห์ความปลอดภัยของสะพานนั้นต้องคำนึงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการใช้งานที่ 75 ปี สำหรับการออกแบบใช้งาน และที่ 5 ปี สำหรับการประเมินสถานะการใช้งาน ซึ่งค่าตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วย ปริมาณการจราจรของสายทางที่พิจารณา น้ำหนักของรถบรรทุกและ ระยะห่างเพลลา โดยหากต้องการข้อมูลที่สะท้อนการใช้งานตามปกติ จะต้องเก็บข้อมูลของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานที่ทำการพิจารณาตลอดระยะเวลาที่ 75 ปี หรือ 5 ปี แต่หากใช้วิธีการดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน จึงเป็นที่มาของการใช้ทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบลในการประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกจรในอนาคตจากลักษณะการแจกแจงน้ำหนักบรรทุกที่ตรวจวัดได้ในปัจจุบัน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โมเมนต์ตัดสูงสุดและ แรงเฉือนสูงสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นในช่วงการใช้งานสะพานที่ 5 ปี (สำหรับการประเมิน) ซึ่งทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบล (Gumbel's Extreme value type I distribution) จะสามารถอธิบายการทำนายค่าที่สูงที่สุดในช่วงระยะเวลาหนึ่งของตัวแปรสุ่มใดๆ สำหรับการวิเคราะห์ที่ขอบเขตของทฤษฎีที่ใช้โดยมีลักษณะการแจกแจงค่าโมเมนต์ตัดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดบริเวณปลายที่มีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability distribution function) เพื่อที่จะไปทำนายค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดในอนาคตได้ ดังแสดงด้วยเส้นสีแดงจากรูปที่ 2.5 เพื่อนำไปสร้างกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) โดยมีแกน  $y$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviate) เป็นส่วนกลับของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติ (Inverse standard normal distribution function) และแกน  $x$  คือ น้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากการตรวจวัดข้อมูลที่สถานี WIM น้ำหนักบรรทุกที่ตรวจวัดได้จะนำมาเทียบกับน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของประเทศไทย และมาตรฐานของ AASHTO HL - 93

การเลือกใช้ข้อมูล จะพิจารณาที่ข้อมูลส่วนปลายสูงสุดที่ 5% (Linear fit for upper 5%) โดยมีลักษณะใกล้เคียงเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ ดังนั้นจึงใช้เส้นตรงแนวโน้ม (เส้นสีแดง) เพื่อใช้จุดตัดแกน  $y$  และความชันของเส้นตรง ไปแทนค่าในสมการของกัมเบลเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่สถานะการใช้งานสะพานที่ 5 ปี



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างลักษณะการแจกแจงโมเมนต์จากรถบรรทุกที่ตรวจวัดจริงหารด้วยโมเมนต์จากรถมาตรฐาน HL - 93 เปรียบเทียบกับการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างค่าการกระจายสะสมสูงสุดของที่ระยะเวลา 5ปี และ 10ปี โมเมนต์จากรถบรรทุกที่ตรวจวัดจริงหารด้วยโมเมนต์จากรถมาตรฐาน HL - 93

โดยสามารถพิจารณาคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดที่อายุการใช้งานสะพาน (Mean maximum live load effect,  $\bar{L}_{max}$ ) และสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (Coefficient of variation,  $V_{Lmax}$ )

$$\mu_{event} = -\frac{n}{m} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{event} = \frac{1}{m} \quad (2.10)$$

$$u_N = \mu_{event} + \sigma_{event} \left( \sqrt{2 \ln(N)} - \frac{\ln(\ln(N)) + \ln(4\pi)}{2\sqrt{2 \ln(N)}} \right) \quad (2.11)$$

$$\alpha_N = \sqrt{\frac{2 \ln(N)}{\sigma_{event}}} \quad (2.12)$$

$$\bar{L}_{max} = \mu_{max} = u_N + \frac{0.577216}{\alpha_N} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{Lmax} = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha_N} \quad (2.14)$$

$$V_{Lmax} = \frac{\sigma_{Lmax}}{L_{max}} \quad (2.15)$$

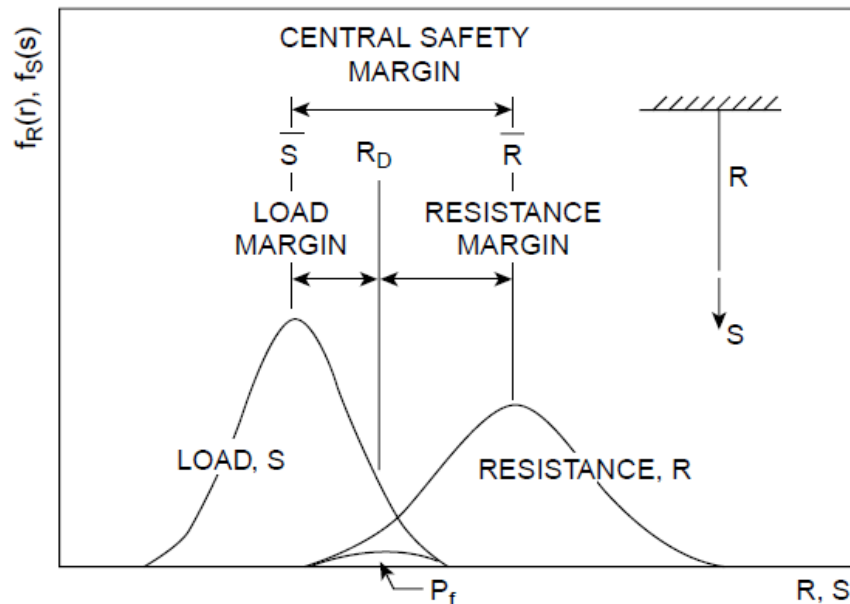
โดยที่

- $n$  = จุดตัดแกน y ของเส้นตรง
- $m$  = ความชันของเส้นสีแดง
- $N$  = จำนวนรถบรรทุกตลอดอายุการใช้งานสะพาน = ADTT × 365 × Return Period
- $\mu_{event}$  = ค่าเฉลี่ยผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่ตรวจซ้งได้
- $\sigma_{event}$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรจากที่ตรวจซ้งได้
- $\alpha_N$  = ค่าส่วนกลับการกระจายตัวของ Gumbel (Inverse measure of dispersion)
- $u_N$  = ค่าเฉลี่ยผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่ช่วงอายุใช้งานสะพาน
- $\bar{L}_{max}$  = ค่าเฉลี่ยผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรสูงสุดที่ช่วงอายุใช้งานสะพาน (Mean of the maximum load effect from Gumbel extreme distribution value)
- $\sigma_{Lmax}$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $\bar{L}_{max}$  (Standard deviation)
- $V_{Lmax}$  = สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน ของ  $\bar{L}_{max}$  (Coefficient of variance)



## 2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง

### 2.3.1 ความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ (Probability of failure)



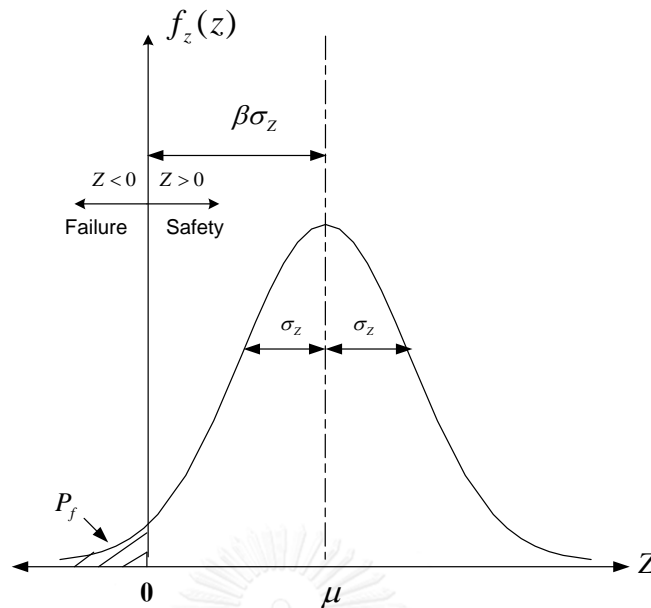
รูปที่ 2.7 หลักการพื้นฐานของความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ ( $P_f$ )

โดยทั่วไปของการใช้งานสะพาน สิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึงการใช้งานคือ ความปลอดภัย ซึ่งความปลอดภัยของการใช้งานมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องในหลายด้าน โดยแรกเริ่ม การสร้างสะพานเพื่อรองรับการใช้งาน จะต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งานและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งในลำดับแรกของการออกแบบก่อนการก่อสร้างสะพาน จะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อให้สะพานสามารถรองรับน้ำหนักการใช้งานอันเนื่องมาจากน้ำหนักของรถบรรทุกโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งประเทศไทยอ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO ในระยะการใช้งานที่ 75 ปี ทั้งนี้เมื่อสะพานมีการใช้งานด้วยระยะเวลาหนึ่ง จะต้องทำการสำรวจติดตามสภาพของโครงสร้างการใช้งาน เช่น มีการสำรวจสภาพโครงสร้างสะพานในระดับเบื้องต้นทั้งโครงสร้างส่วนบนและโครงสร้างส่วนล่าง เป็นเวลาทุกๆ ช่วง 2 - 5 ปี ซึ่งหากพบว่าโครงสร้างสะพานมีการเสื่อมสภาพจะทำให้อายุการใช้งานสะพานสั้นลงจากที่ออกแบบไว้และมีโอกาสเกิดการวิบัติมากขึ้น การตรวจสอบสภาพของสะพานจึงต้องทำการสำรวจอย่างละเอียด เพื่อประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานรวมถึงแนวทางการบำรุงรักษาสะพาน อันเนื่องมาจาก สะพานเกิดการเสื่อมสภาพจากตามอายุการใช้งาน และอาจมีสาเหตุมาจากการใช้งานจริงของสะพาน เช่น น้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่าเกณฑ์การออกแบบสะพาน ทำให้ความน่าจะเป็นที่อายุการใช้งานสั้นลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานในสายทางหลวงพิเศษที่มีการ

ใช้น้ำหนักบรรทุกทุกเกินกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาถึงการประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานที่อ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO LRFR ในระยะการใช้งานที่ 5 ปี ที่ระดับ Operating เพื่อลดโอกาสความน่าจะเป็นของการวิบัติของสะพาน ด้วยวิธีการประเมินผ่านทฤษฎีความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ

ด้วยเหตุที่ค่าน้ำหนักบรรทุกและความต้านทานของสะพานที่ใช้ออกแบบ มีความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนค่าการณไม่ได้เสมอ โดยอาจจะมีลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal distribution) หรือแบบลอการิทึม (Logarithmic distribution) ดังนั้นเมื่อทำการแจกแจงฟังก์ชันความน่าจะเป็นโดยมีเส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็น จากผลของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างสะพาน (Load effect) และเส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นของความต้านทานในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน (Resistance) หากค่าความน่าจะเป็นที่ความต้านทานในการรับน้ำหนักน้อยกว่า ผลของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างสะพาน นั้นหมายถึงมีโอกาสที่สะพานจะเกิดการวิบัติ มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งทั้งสองที่ซ้อนกัน ส่งผลต่อความปลอดภัยในการใช้งานสะพาน ดังแสดงตามรูปที่ 2.7 ซึ่งแกนนอนคือ ค่าความต้านทานของสะพาน (Resistance) และน้ำหนักบรรทุก (Load effect) แกนตั้งคือค่าของฟังก์ชันความถี่

การหาความปลอดภัยในการประเมินสะพานที่สามารถยอมรับได้จะแสดงผลผ่านค่าดัชนีความเชื่อมั่น เมื่อดัชนีความเชื่อมั่นสูงแสดงว่าพื้นที่ที่ซ้อนกันของเส้นโค้งทั้งสองต่ำ โอกาสที่สะพานจะวิบัติมีต่ำ แต่หากดัชนีความเชื่อมั่นต่ำแสดงว่าพื้นที่ที่ซ้อนกันของเส้นโค้งทั้งสองสูงโอกาสที่สะพานจะวิบัติมีสูง สุดท้ายค่าความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ (Probability of failure) หรือดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index) ที่เหมาะสมได้จะถูกเลือกโดยพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างสะพานที่เพิ่มขึ้นที่ยอมรับได้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของค่ามาตรฐาน ( $Z$ ) กับความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ ( $P_f$ )

จากรูปที่ 2.8 ตำแหน่งที่ค่า  $Z < 0$  หมายถึงโอกาสที่สะพานจะเกิดการวิบัติ (Failure side) ส่วนตำแหน่งที่  $Z > 0$  หมายถึง ช่วงของสะพานที่มีความปลอดภัย (Safety side) โดยแกนตั้งคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นและ แกนนอนคือ ค่าความปลอดภัย (Margin of safety,  $Z$ ) ซึ่งอธิบายได้ด้วยหลักการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม (Probability distribution function) โดยที่องค์ประกอบสำคัญของค่าตัวแปรคือ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่ามาตรฐาน  $Z$  กับความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติโดยที่

$$Z = R - S \quad (2.16)$$

$$P_f = P_r[R \leq S] \quad (2.17)$$

$$P_f = \Phi\left(\frac{0 - \bar{Z}}{\sigma_z}\right) = \Phi\left(-\frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (2.18)$$

โดยที่

- $Z$  = ค่าความปลอดภัย (Margin of safety)  
 $R$  = ความต้านทานของโครงสร้าง (Resistance capacity)

$S$	=	ผลกระทบจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (Total load effect)
$P_f$	=	ความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ (Probability of failure)
$P_r$	=	สัญลักษณ์ในเทอมของความน่าจะเป็น
$\Phi$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ
$\bar{R}$	=	ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานของโครงสร้าง
$\bar{S}$	=	ค่าเฉลี่ยผลจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด
$\sigma_R$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังต้านทานของโครงสร้าง
$\sigma_S$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานผลจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

### 2.3.2 ดัชนีความเชื่อมั่น และการเลือกค่าเป้าหมาย

ค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index) โดยมีตัวแปร  $\beta$  สำหรับการประเมินความปลอดภัยในการออกแบบสะพานใหม่หรือประเมินสะพานที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $P_f$  (Probability of failure) จากพื้นที่ใต้โค้งปกติสะสมของค่ามาตรฐาน  $Z = -\infty$  จนถึง  $-\beta$  เท่ากับความน่าจะเป็นที่สะพานวิบัติ ทำให้  $\beta$  เท่ากับค่ามาตรฐานของฟังก์ชันของการแจกแจงแบบปกติ (Gaussian distribution) ซึ่งสามารถเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งมาตรฐานทั่วไปได้

ค่า  $\beta$  จะแตกต่างกันตามโมเมนต์หรือแรงเฉือนของแต่ละชิ้นส่วนตามแต่ละช่วงความยาวสะพาน ระยะห่างระหว่างคานและประเภทของโครงสร้างสะพาน ค่า  $\beta$  ที่น้อยที่สุดจะเป็นค่าควบคุมความปลอดภัยของสะพานนั้นๆ

$$P_f = \Phi(-\infty < Z \leq \beta) \quad (2.19)$$

โดยที่

$P_f$	=	ความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติ (Probability of failure)
$\Phi$	=	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ
$Z$	=	ค่าความปลอดภัย (Margin of safety)
$\beta$	=	ค่าดัชนีความเชื่อมั่น (Reliability index)

เช่นที่  $\beta = 3.5$  โอกาสที่สะพานจะพัง  $P_f = 2.326 \times 10^{-4}$  หรือ 1/4300 หรือที่ความน่าจะเป็นที่สะพานเกิดการวิบัติค่าหนึ่งที่กำหนดขึ้นจะให้ค่า  $\beta$  1ค่าซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบ 1ต่อ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  และ  $P_f$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1.28	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20

การหาค่าดัชนีความเชื่อมั่นสามารถวิเคราะห์ด้วย 3 วิธีคือ

1. การแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) การแจกแจงวิธีนี้จะสามารถใช้ได้เมื่อความต้านทานของสะพาน ( $\bar{R}$ ) และ น้ำหนักบรรทุกเป็นลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติเหมือนกันทั้งคู่

$$\beta = \frac{\bar{R} - \overline{DL} - \overline{LL}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{DL}^2 + \sigma_{LL}^2}} \quad (2.20)$$

2. การแจกแจงแบบลอการิทึม (Lognormal distribution) การแจกแจงวิธีนี้จะสามารถใช้ได้เมื่อความต้านทานของสะพาน ( $\bar{R}$ ) และ น้ำหนักบรรทุกรวม ( $\bar{S}$ ) เป็นลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบลอการิทึมทั้งคู่

$$\bar{S} = \overline{DL} + \overline{LL} \quad (2.21)$$

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\bar{R}\sqrt{1+V_S^2}}{\bar{S}\sqrt{1+V_R^2}}\right)}{\sqrt{\ln[(1+V_R^2)(1+V_S^2)]}} \quad (2.22)$$

3. การแจกแจงดัชนีความเชื่อมั่นด้วยวิธีอื่น ๆ สำหรับการแจกแจงที่ไม่เป็นการแจกแจงปกติต้องทำการพิจารณาจากวิธีอัลกอริธึมจากการคำนวณหรือจากวิธีการสร้างแบบจำลองตัวแปรสุ่ม
  - 3.1 FORM (First Order Reliability Methods) Algorithm ซึ่งเสนอโดย Rackwitz and Fiessler (1978) เป็นวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อประมาณความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติด้วยเส้น Tangent
  - 3.2 Monte Carlo Simulations แบบจำลองมอนติคาร์โล เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการแจกแจงแบบใดๆของตัวแปรสุ่ม โดยการสร้างแบบจำลองการทดสอบขึ้นมาจำนวนมหาศาลจากการสุ่มค่าความต้านทานและผลกระทบจากน้ำหนักบรรทุกทุกเพื่อให้เกิดค่าสูงสุด การหาค่า

ความน่าจะเป็นที่สะพานจะวิบัติด้วยวิธีการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของแบบจำลองการทดสอบสุ่มค่าที่ทำให้สะพานวิบัติกับจำนวนแบบจำลองทั้งหมดที่สร้างขึ้น ทำให้ได้ค่าดัชนีความเชื่อมั่นในที่สุด

อย่างไรก็ดีผลการศึกษาพบว่าวิธีการหาค่าดัชนีความเชื่อมั่น  $\beta$  ล้วนให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดย (Nowak 1999) และ Kulicki et al (2007) ตรวจสอบด้วย AASHTO LRFD (1999) ประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจนั้น การแจกแจงค่าเฉลี่ยความต้านทานของโครงสร้าง ( $\bar{R}$ ) และค่าเฉลี่ยผลกระทบจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดนั้น ( $\bar{S}$ ) มักใกล้เคียงการแจกแจงแบบปกติ ในงานวิจัยนี้จะสมมติให้การแจกแจงความน่าจะเป็นของน้ำหนักบรรทุกและความต้านทานเป็นแบบปกติ (Normal distribution) เพื่อความสะดวกในการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อมั่น ดังนั้นดัชนีความเชื่อมั่น  $\beta$  จึงสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.23) ดังนี้

$$\beta = \frac{\bar{R} - \overline{DL} - \overline{LL}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{DL}^2 + \sigma_{LL}^2}} \quad (2.23)$$

และเมื่อพิจารณาให้ละเอียดยิ่งขึ้นจะได้

$$\beta = \frac{\lambda_R(\gamma_D DL + \gamma_L L_n) - \lambda_D \overline{DL} - \overline{LL}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{DL}^2 + \sigma_{LL}^2}} \quad (2.24)$$

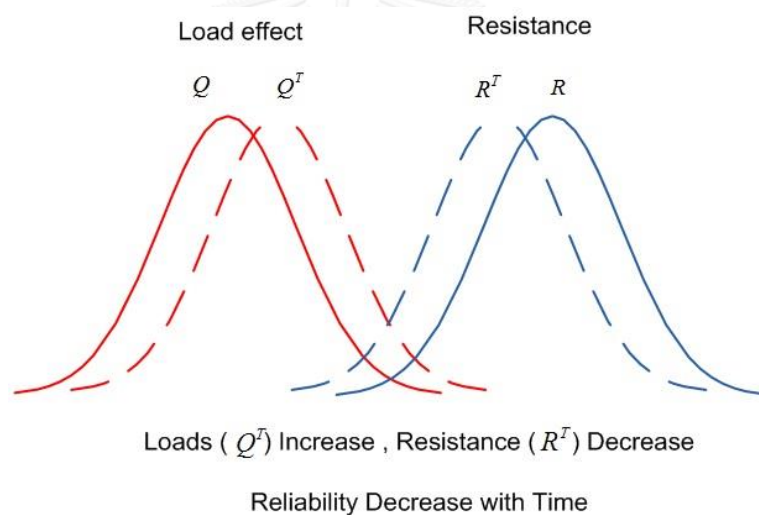
โดยที่

$V_R$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน
$\bar{R}$	=	ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานของโครงสร้าง
$\overline{DL}$	=	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกคงที่
$\overline{LL}$	=	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจร
$\sigma_R$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยกำลังต้านทาน
$\sigma_{DL}$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานของโครงสร้าง
$\sigma_{LL}$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจร
$L_n$	=	น้ำหนักบรรทุกจรรวมผลทางพลศาสตร์สำหรับการออกแบบ
$\lambda_R$	=	ตัวคูณความคลาดเคลื่อนความต้านทาน
$\lambda_D$	=	ตัวคูณความคลาดเคลื่อนน้ำหนักบรรทุกคงที่
$\gamma_D$	=	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่

$\gamma_L$  = ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร

ค่าดัชนีความเชื่อมั่น  $\beta$  แปรผกผันกับโอกาสที่สะพานเกิดการวิบัติ กล่าวคือหากค่า  $\beta$  ยิ่งมากสะพานก็จะมีความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งช่วงของค่า  $\beta$  ที่จะใช้ในการประเมินหรือออกแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของโครงการโดยจุดประสงค์การใช้งานโครงสร้างสะพานและความปลอดภัยที่แตกต่างกัน เช่น AASHTO LRFD ได้กำหนดไว้ให้ค่าดัชนีความเชื่อมั่นเป้าหมายเพื่อความปลอดภัยที่ยอมให้ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ  $\beta_{\text{target}} = 3.5$  สำหรับการออกแบบ (Inventory level) ระยะเวลาใช้งานสะพาน (Design period) 75 ปีในขณะที่กำหนดให้  $\beta_{\text{target}} = 2.5$  สำหรับการประเมินซ่อมแซมสะพาน (Operating level) ระยะเวลา 5 ปี (Operating period)

### 2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับดัชนีความเชื่อมั่น (Time period & Reliability index)



รูปที่ 2.9 การเลื่อนของเส้นโค้ง Load effect และ Resistance เมื่อสะพานถูกใช้งานตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 2.9 เมื่อสะพานถูกใช้งานตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ผลกระทบต่อสะพานจากน้ำหนักบรรทุก (Load effect) มักจะสูงขึ้นโดยทำให้เส้นสีแดง (Q) ในรูปจะเลื่อนไปทางขวาอันเนื่องมาจากมีน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นจากการเพิ่มของขดยานในอนาคต ในขณะที่ความต้านทานของสะพาน (Resistance capacity) เส้นฟ้า (R) ในรูปจะเลื่อนไปทางซ้ายเพราะโครงสร้างเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อถูกใช้งานตามเวลา จึงส่งผลให้โอกาสที่สะพานจะมีความปลอดภัยในการใช้งานลดลง และเกิดการวิบัติสูงขึ้น เพราะมีพื้นที่ใต้กราฟที่ซ้อนกันมาก ดังนั้นการออกแบบสะพานใหม่หรือการประเมินความปลอดภัยจะต้องศึกษาเพื่อการปรับค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Load factor) และตัวคูณลดกำลัง

ต้านทาน (Resistance factor) หรืออีกนัยหนึ่งคือการเลื่อนเส้นโค้งทั้งสองด้วยตัวคูณให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในปัจจุบันและแนวโน้มของการใช้งานในอนาคตให้มีความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งาน

## 2.4 กำลังต้านทานของคานคอนกรีตอัดแรง

เพื่อการตรวจสอบกำลังต้านทานของคานคอนกรีตอัดแรงในการใช้งาน เนื่องจากในงานประเมินโครงสร้างสะพาน มีเพียงแบบมาตรฐานหรือแบบก่อสร้างในสายทางซึ่งไม่อาจสามารถสืบค้นหรืออ้างอิงรายการคำนวณจากแบบการก่อสร้างได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการคำนวณหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง เพื่อให้สามารถระบุค่าความต้านทานของสะพานในโครงข่ายสายทางที่พิจารณาตลอดทั้งสาย

สำหรับสะพานในโครงข่ายสายทางนี้ อ้างอิงด้วยการออกแบบสะพานผ่านมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบสะพานทั่วไปของประเทศไทย

### 2.4.1 การออกแบบความต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะสุดขีด (Extreme event limit states)

สมมติฐานสำหรับการออกแบบต้านทานโมเมนต์แบ่งออกเป็น 3 ข้อดังนี้

1. การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายความว่าหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะพาน
2. คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึง
3. การหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดจะไม่เกิน 0.003

พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะสุดขีดมีสถานะคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งการวิเคราะห์กำลังอัดภายในจะใช้หลักการแรงคู่ควบภายในในช่วงสถานะการใช้งานก่อนที่คอนกรีตจะแตกร้า โดยที่คอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กตรงที่คอนกรีตอัดแรงจะมีแรงคู่ควบที่คงที่ แม้ว่าจะมีโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้น แต่แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่ามากขึ้นตามการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อคานรับน้ำหนักจนกระทั่งเลยช่วงสถานะการใช้งาน จึงเป็นผลให้การแตกร้าของคอนกรีตจะเกิดขึ้นเป็นผลให้แกนของโมเมนต์คู่ควบจะมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นอีก แรงคู่ควบจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่า หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัด



และการหดตัวของคอนกรีตจะเป็นพฤติกรรมไม่เชิงเส้น และคานคอนกรีตอัดแรงจะวิบัติก็ต่อเมื่อรับน้ำหนักจนถึงสภาวะขีดสุด

การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่ากับรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular stress distribution) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในคอนกรีตซึ่งสามารถกระจายให้มีความเทียบเท่ากับรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีค่า Compressive stress block เทียบเท่า  $0.85f'_c$  เหนือแกนสะเทินซึ่งมีค่าเท่ากับ  $a = \beta_1 c$

สำหรับระบบการยึดเหนี่ยวในลวดอัดแรงที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม การประมาณการกระจายแรงซึ่งตามมาตรฐาน AASHTO LRFD กำหนดให้ใช้ค่า  $f_{pe}$  ไม่น้อยกว่า  $0.5f_{pu}$  ดังนั้น

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - k \frac{c}{d_p} \right) \quad (2.25)$$

$$k = 2 \left( 1.04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (2.26)$$

$$c = \frac{A_{ps} f_{pu} + A_s f_y - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_1 b + k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (2.27)$$

และสำหรับระบบไร้การยึดเหนี่ยวในลวดอัดแรงที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$f_{ps} = f_{pe} + 6300 \left( \frac{d_p - c}{l_e} \right) \leq f_{py} \quad (2.28)$$

$$l_e = \left( \frac{2l_i}{2 + N_s} \right) \quad (2.29)$$

$$c = \frac{A_{ps} f_{pu} + A_s f_y - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_1 b} \quad (2.30)$$

ดังนั้นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงจึงมีค่าเท่ากับ

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_y \left( d'_s - \frac{a}{2} \right) + 0.85 f'_c (b - b_w) \beta_1 h_f \left( \frac{a}{2} - \frac{h_f}{2} \right) \quad (2.31)$$

โดยที่

- $a$  = หน่วยแรงอัดเทียบเท่ารูปสี่เหลี่ยม  
 $\beta_1$  = สัมประสิทธิ์ตัวคูณเทียบเท่าสำหรับ stress block  
 $c$  = ระยะความลึกของการกระจายแรงอัดเทียบเท่าจากแกนสะเทินถึงผิว

คอนกรีตรับแรงอัด

- $A_{ps}$  = หน้าตัดของลวดอัดแรง  
 $f_{pu}$  = กำลังรับแรงดึงในลวดอัดแรง  
 $f_{py}$  = กำลังรับแรงดึงในลวดอัดแรงที่จุดคราก  
 $f_{pe}$  = แรงเค้นประสิทธิผลหลังจากเกิดการสูญเสียในลวดอัดแรง  
 $A_s$  = หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง  
 $A'_s$  = หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด  
 $f_y$  = จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง  
 $f'_y$  = จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงอัด  
 $b$  = ความกว้างของปีกรับแรงอัด  
 $b_w$  = ความกว้างเอวของหน้าตัด  
 $d_p$  = ระยะที่ผิวนอกของการรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน  
 $l_e$  = ระยะประสิทธิผลของความยาวลวดอัดแรง  
 $l_i$  = ความยาวระหว่างลวดอัดแรงถึงสมอยึด  
 $N_s$  = จำนวนของจุดรอนรับที่พาดผ่านระหว่างลวดอัดแรงและสมอยึด  
 $M_n$  = กำลังต้านโมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตอัดแรง

#### 2.4.2 การออกแบบความต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง

การออกแบบหน้าตัดรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรงมีลักษณะใกล้เคียงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป โดยใช้เหล็กปลอกสำหรับช่วยเสริมกำลังรับแรงเฉือน โดยให้คานเกิดการวิบัติจากโมเมนต์ดัดแทน ซึ่งเป็นการวิบัติที่สามารถควบคุมความปลอดภัยก่อนที่โครงสร้างจะเกิดความเสียหาย ลักษณะของการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การแตกร้าวเนื่องจากผลรวมระหว่างแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด เป็นการแตกร้าวที่เริ่มจากที่ผิวล่างสุดของคานโดยมีรอยแตกร้าวอยู่ในแนวตั้งฉาก ซึ่งหากไม่ได้ออกแบบเหล็กเสริม

รับแรงเฉือนให้เพียงพอ รอยแตกร้าวนี้อาจขยายลึกเข้าไปในส่วนของคอนกรีตรับแรงอัด มีผลทำให้ความสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดบริเวณพื้นที่คอนกรีตรับแรงอัดลดลง ทำให้คานไม่สามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้อีกต่อไป

2. การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนในแนวแกน เป็นลักษณะการแตกร้าวที่เกิดจากแรงเฉือนที่สูงมากโดยมีค่าโมเมนต์ที่น้อย ซึ่งการแตกร้าวชนิดนี้มักจะพบที่บริเวณใกล้จุดรองรับ ผลของแรงเฉือนทำให้เกิดรอยแตกตามแนวทแยงของแกนคาน เป็นผลให้คานคอนกรีตอัดแรงจะเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด

สำหรับการออกแบบต้านทานแรงเฉือนตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (American Association of State Highway and Transportation Officials" 2007)

$$v = \frac{V_u}{\phi b_v d_v} \quad (2.32)$$

$$f_{po} = f_{pe} + \frac{f_{pc} E_p}{E_c} \quad (2.33)$$

$$\epsilon_x = \frac{\frac{M_u}{d_v} + 0.5V_u \cot \theta - A_{ps} f_{po}}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \quad (2.34)$$

Table 5.8.3.4.2-1 - Values of  $\theta$  and  $\beta$  for Sections with Transverse Reinforcement

$\frac{v}{f'_c}$	$\epsilon_x \times 1000$										
	-0.2	-0.15	-0.1	0	0.125	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2
$\leq 0.05$	27.0 6.78	27.0 6.17	27.0 5.63	27.0 4.88	27.0 3.99	28.5 3.49	29.0 2.51	33.0 2.37	36.0 2.23	41.0 1.95	43.0 1.72
0.075	27.0 6.78	27.0 6.17	27.0 5.63	27.0 4.88	27.0 3.65	27.5 3.01	30.0 2.47	33.5 2.33	36.0 2.16	40.0 1.90	42.0 1.65
0.1	23.5 6.50	23.5 5.87	23.5 5.31	23.5 3.26	24.0 2.61	26.5 2.54	30.5 2.41	34.0 2.28	36.0 2.09	38.0 1.72	39.0 1.45
0.125	20.0 2.71	21.0 2.71	22.0 2.71	23.5 2.60	26.0 2.57	28.0 2.50	31.5 2.37	34.0 2.18	36.0 2.01	37.0 1.60	38.0 1.35
0.15	22.0 2.66	22.5 2.61	23.5 2.61	25.0 2.55	27.0 2.50	29.0 2.45	32.0 2.28	34.0 2.06	36.0 1.93	36.5 1.50	37.0 1.24
0.175	23.5 2.59	24.0 2.58	25.0 2.54	26.5 2.50	28.0 2.41	30.0 2.39	32.5 2.20	34.0 1.95	35.0 1.74	35.5 1.35	36.0 1.11
0.2	25.0 2.55	25.5 2.49	26.5 2.48	27.5 2.45	29.0 2.37	31.0 2.33	33.0 2.10	34.0 1.82	34.5 1.58	35.0 1.21	36.0 1.00
0.225	26.5 2.45	27.0 2.44	27.5 2.43	29.0 2.37	30.5 2.33	32.0 2.27	33.0 1.92	34.0 1.67	34.5 1.43	36.5 1.18	39.0 1.14
0.25	28.0 2.36	28.5 2.36	29.0 2.32	30.0 2.30	31.0 2.28	32.0 2.01	33.0 1.64	34.0 1.52	35.5 1.40	38.5 1.30	41.5 1.25

รูปที่ 2.10 ตาราง  $\beta$  สำหรับการปรับเทียบค่าระหว่าง  $\epsilon_x$  และ  $\frac{v}{f'_c}$

$$V_c = 0.083\beta\sqrt{f'_c}b_vd_v \quad (2.35)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s} \quad (2.36)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.47)$$

โดยที่

- $v$  = ความเค้นเฉือน
- $V_u$  = แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง
- $M_u$  = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง
- $\phi$  = ตัวคูณลดกำลังหน้าตัด
- $b_v$  = ความกว้างประสิทธิภาพของคานคอนกรีตอัดแรง
- $d_v$  = ความลึกประสิทธิภาพของคานคอนกรีตอัดแรง

$f_{po}$	=	ค่าความเค้นในลวดอัดแรง
$f_{pe}$	=	ค่าความเค้นประสิทธิผลในลวดอัดแรงหลังจากเกิดความสูญเสีย
$f_{pc}$	=	ค่าความเค้นอัดในคานคอนกรีตอัดแรงหลังจากเกิดความสูญเสีย
$E_p$	=	โมดูลัสในช่วงอีลาสติกของลวดอัดแรง
$E_s$	=	โมดูลัสในช่วงอีลาสติกของเหล็กเสริม
$E_c$	=	โมดูลัสในช่วงอีลาสติกของคอนกรีต
$\beta$	=	ตัวคูณที่แปรผันความเครียดในแนวยาวตามกำลังหน้าตัดรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรง
$V_n$	=	ความสามารถในการรับแรงเฉือนของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรง

## 2.5 อัตราส่วนความปลอดภัยในการประเมินโครงสร้างสะพาน

การประเมินความปลอดภัยของสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ ด้วยวิธี Rating factor ตามมาตรฐาน Load and Resistance Factor Rating (LRFR) ของ AASHTO โดยจะประเมินความปลอดภัยจากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของยวดยานที่คาดว่าจะแล่นผ่านในช่วงระยะเวลาการประเมิน ซึ่งตามมาตรฐาน AASHTO LRFD จำแนกระดับของการประเมินความปลอดภัยไว้ 2 ระดับดังนี้

1. ระดับ Inventory เป็นการประเมินภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากยวดยาน ที่คาดการณ์ตลอดอายุการใช้งานของสะพาน ซึ่งปกติจะพิจารณาช่วงเวลาใช้งาน 75 ปี
2. ระดับ Operating เป็นการประเมินภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากยวดยาน ที่คาดการณ์ในช่วงระยะเวลาการใช้งาน 5 ปีของสะพาน

โดยสมการ Rating factor คือ

$$RF = \frac{(\phi_c \phi_s R_n) - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL + IM)} \quad (2.38)$$

โดยที่

$RF$	=	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของสะพาน
$\phi_c$	=	ตัวคูณลดกำลังสำหรับโครงสร้างสะพานเนื่องจากสภาพการใช้งานของสะพาน
$\phi_s$	=	ตัวคูณลดกำลังสำหรับโครงสร้างสะพานเนื่องจากระบบของโครงสร้างสะพาน

$R_n$	=	กำลังต้านทานของสะพาน
$\gamma_{DC}$	=	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างหล่อในที่
$DC$	=	น้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างหล่อในที่
$\gamma_{DW}$	=	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ของพื้นผิวสะพาน
$DW$	=	น้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนพื้นผิวสะพาน
$\gamma_L$	=	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร
$LL$	=	น้ำหนักบรรทุกจร
$IM$	=	ตัวคูณการกระทบ (Impact factor)

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ หมายเลข 9 ตามสมการที่ (2.41) เฉพาะการประเมินความปลอดภัยของสะพานที่ระดับ Operating level และเนื่องจากยวดยานของไทยมีความแตกต่างอย่างมากกับลักษณะยวดยานของสหรัฐฯ ค่าน้ำหนักบรรทุกจร  $LL$  จึงไม่ใช่ค่า HS20-44 หรือ HL-93 ตาม AASHTO แต่จะยึดตามลักษณะยวดยานและพิกัดน้ำหนักของไทยตาม(ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ 2014) ส่วนตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร  $\gamma_L$  ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการบรรทุกหนักของยวดยานจริงนั้นจะกำหนดจากผลการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง ตามเกณฑ์ระดับความเสี่ยงภัยของสะพานที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน AASHTO โดยอาศัยข้อมูลโครงสร้างสะพานตามแบบแปลนที่ได้ก่อสร้างจริงในสายทาง และข้อมูลการตรวจชั่งน้ำหนักบรรทุกของยวดยานจริงเป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือนจากสะพานชั่งน้ำหนักแห่งหนึ่งโครงข่ายทางหลวง

### บทที่ 3

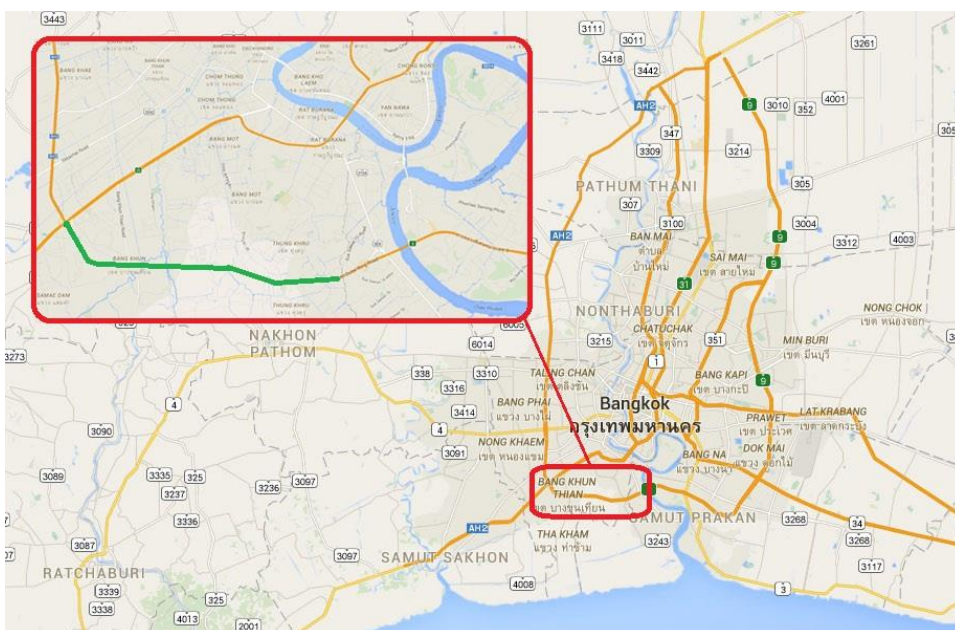
#### การตรวจวัดสะพานและการประเมินความถูกต้องของการหาน้ำหนัก

การประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ เป็นการประเมินโดยผ่านการเก็บข้อมูล ตัวอย่างเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่าหนึ่งเดือน ซึ่งสถานที่ตรวจวัดจะได้รับการพิจารณาว่าเป็นเส้นทาง สำคัญในการขนส่งของรถบรรทุกที่มีขนาดสिलบล้อขึ้นไป ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะเป็นข้อมูลตัวแทนในการ ชี้วัดค่าการใช้งานของสะพานที่แท้จริงสำหรับการประเมินสะพาน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกเส้นทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ช่วงพระประแดง – ต่าง ระดับบางขุนเทียน ซึ่งเส้นของทางการตรวจวัดจะอยู่ในช่วงขอบเขตหลักกิโลเมตรที่ 32+387 ถึง 45+018 เนื่องจากเป็นเส้นทางหลักในการขนส่งสินค้าจากทางทิศตะวันตกและ ทิศใต้ของประเทศ ไทย และคาดว่าจะมีรถบรรทุกที่ฝ่าฝืนนำรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก หรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ กฎหมายกำหนดไว้

สะพานในโครงข่ายที่จะทำการตรวจวัดจะทำการอ้างอิงจากข้อมูลพื้นฐานของระบบ โครงสร้างเดิม หรือแบบก่อสร้างสะพาน และการประเมินโครงสร้างสะพานที่ประกอบไปด้วยเงื่อนไข ของสภาพแวดล้อมของการใช้งานจริง ทั้งนี้สะพานในโครงข่ายที่พิจารณา ได้รับการใช้งานมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 (อ้างอิงข้อมูลจากแบบก่อสร้างของกรมทางหลวง) ซึ่งคาดว่าสะพานในโครงข่ายสายทางนี้ จะมีความเสียหายที่เกิดขึ้น อันเป็นผลให้อายุการใช้งานของสะพานในโครงข่ายสายทางมีระยะเวลา สั้นลงจากที่ออกแบบไว้

### 3.1 การสำรวจเบื้องต้นตลอดทั้งสายทาง (Visual Inspection)



รูปที่ 3.1 เส้นทางที่ทำการพิจารณาในโครงข่ายสายทาง

ก่อนการดำเนินการตรวจวัดสะพาน จะมีขั้นตอนแรกที่สำคัญเพื่อจำกัดขอบเขตของงานวิจัย คือ การสำรวจเบื้องต้นตลอดทั้งสายทาง (Visual inspection) ซึ่งเป็นขั้นตอนในการสำรวจภาพรวมของระบบโครงข่ายในสายทางที่ทำการพิจารณา เพื่อให้ทราบถึงปริมาณสะพานที่ทำการพิจารณา โดยจะศึกษาเส้นทางการตรวจวัดของเส้นทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ช่วงพระประแดง – ต่างระดับบางขุนเทียน ตั้งแต่หลักกิโลเมตรที่ 32+387 ถึง 45+018 รวมระยะทางประมาณ 12 กิโลเมตร

#### 3.1.1 การประเมินสภาพการใช้งานสะพาน (Condition rating)

โดยทั่วไปเมื่อสะพานมีการใช้งานเป็นระยะเวลานาน สะพานย่อมมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานซึ่งมีหลากหลายสาเหตุเช่น การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากธรรมชาติและสภาพแวดล้อมที่ตั้งของสะพาน หรือ การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุของผู้ใช้สายทาง โดยทุกๆสาเหตุจะมีผลทำให้กำลังการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานลดน้อยลง

ด้วยเหตุนี้ การประเมินการใช้งานสะพานจึงต้องมีการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างทั้งสายทาง โดยนำข้อมูลจากการสำรวจที่ได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวคูณลดกำลังของโครงสร้างสะพาน ทั้งนี้ งานวิจัยได้อ้างอิง และประยุกต์ใช้หลักเกณฑ์การประเมินตามมาตรฐานของ National Bridge Inventory (NBI) และมาตรฐาน AASHTO LRFR



เนื่องจากหลักเกณฑ์มาตรฐาน (Federal Highway Administration" 1988) มิได้กำหนดตัวแปรที่ใช้เป็นตัวคูณสำหรับการประเมิน (Condition factor) อีกทั้งมาตรฐาน AASHTO LRFR มิได้กำหนดถึงรายละเอียดสำหรับประเมินโครงสร้างสะพาน งานวิจัยนี้จึงนำข้อกำหนดของมาตรฐาน ทั้งสองมาประยุกต์ร่วมกับหลักเกณฑ์การประเมินสภาพโครงสร้างสะพาน (Condition rating) ของกรมทางหลวงซึ่งแบ่งระดับความเสียหายของโครงสร้างออกเป็น 6 ระดับ เพื่อใช้สำหรับประเมินโครงสร้างสะพานส่วนบน โครงสร้างสะพานส่วนล่างดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFR

(6A.4.2.3-1 – Condition Factor)

Structural Condition of Member	$\phi_c$
Good or Satisfactory	1.00
Fair	0.95
Poor	0.85

ตารางที่ 3.2 ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพานในโครงข่ายสายทาง

กลุ่มสภาพ	สภาพโครงสร้างสะพาน	Condition factor ( $\phi_c$ )
ดีระดับ 5	สภาพโครงสร้างดี หรือเหมือนใหม่	1.00
พอใช้ระดับ 4	สภาพพอใช้ในเกณฑ์ดี พิจารณารุงปกติ	1.00
พอใช้ระดับ 3	สภาพพอใช้ ชำรุดบ้างพิจารณารุงตามกำหนดเวลา	0.95
ชำรุดระดับ 2	สภาพชำรุดเสียหายต้องซ่อมแซม	0.85
ชำรุดระดับ 1	สภาพชำรุดเสียหายมากต้องซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน	0.85
ชำรุดมากระดับ 0	สภาพชำรุดมาก ต้องทำการทุบทิ้งและทำการก่อสร้างใหม่	0

จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า สะพานในสายทางเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด และมีระบบโครงสร้างส่วนบน (Super structure) เป็นแบบ I – Girder ทั้งหมด ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบกับแบบก่อสร้างสะพาน พบว่าแบบก่อสร้างกับโครงสร้างสะพานที่ตรวจวัด มีความสอดคล้องกัน โดยมีระยะความยาวของช่วงสะพานที่ 15.00เมตร, 20.00เมตร และ22.00เมตร โดยความยาวของช่วง

สะพานจะแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศ และโครงสร้างส่วนล่าง (Sub structure) เป็นแบบ Pile – bent และ Pier column ซึ่งแต่ละประเภทของโครงสร้างส่วนล่างจะถูกนำมาใช้ตามแต่สภาพภูมิประเทศ เพื่อให้รักษาระยะพาดความยาวสะพานของการติดตั้งคาน I – Girder ที่มีโอกาสแปรผันตามระยะทางตั้งแต่ 15.00 เมตร ถึง 22.00 เมตร และในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการประเมินสะพานในโครงข่ายสายทางจากโครงสร้างสะพานส่วนบนเท่านั้น ซึ่งจากการสำรวจโครงข่ายสายทางอย่างละเอียด พบว่ามีสะพานจำนวนทั้งสิ้นประมาณ 600 สะพาน และเพื่อให้เกิดความสะดวกในการประเมิน จึงได้ทำการพิจารณาการประเมินโครงสร้างสะพาน แบ่งออกเป็นช่วงๆ ซึ่งจะพิจารณาทีละ 10 ช่วงพาดความยาวสะพาน ดังนั้นสะพานที่จะทำการประเมินอันเนื่องมาจากผลสำรวจเบื้องต้นจะมีเพียง 60 สะพานเท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 3.2

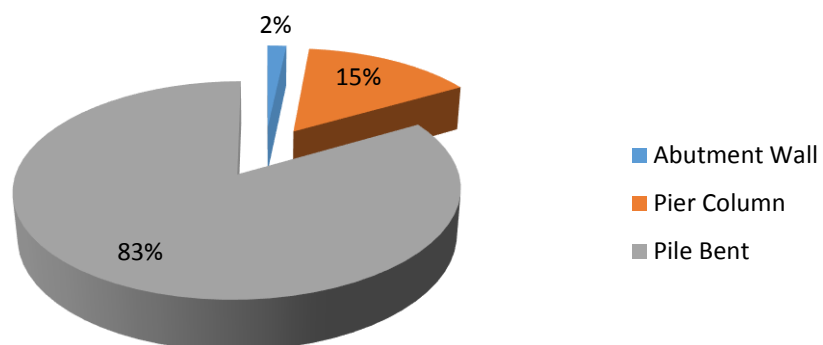
ตารางที่ 3.3 ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพาน

ลำดับ	ลำดับสะพาน	จุดที่ตั้ง (กม.)	โครงสร้างสะพานส่วนบน	โครงสร้างสะพานส่วนล่าง	ช่วงพาดสะพาน (เมตร)	ความยาวของคาน IG (เมตร)	สภาพโครงสร้างสะพานส่วนบน
1	1L	32+387.30	IG	Abutment Wall	24.00	22.00	3
2	11L	32+635.05	IG	Pier Column	29.30	22.00	4
3	21L	32+873.61	IG	Pier Column	22.94	22.00	4
4	31L	33+084.93	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4
5	41L	33+282.70	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4
6	51L	33+480.46	IG	Pile Bent	20.29	20.00	4
7	61L	33+683.30	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4
8	71L	33+881.06	IG	Pile Bent	20.29	20.00	4
9	81L	34+083.90	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4
10	91L	34+285.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
11	101L	34+485.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
12	111L	34+685.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
13	121L	34+908.00	IG	Pier Column	22.40	22.00	4
14	131L	35+148.446	IG	Pier Column	22.50	22.00	4
15	141L	35+353.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4

16	151L	35+553.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
17	161L	35+784.00	IG	Pier Column	20.00	20.00	4
18	171L	35+986.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
19	181L	36+186.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
20	191L	36+386.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
21	201L	36+587.00	IG	Pier Column	25.00	22.00	3
22	211L	36+830.75	IG	Pile Bent	20.25	20.00	4
23	221L	37+032.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
24	231L	37+232.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
25	241L	37+432.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
26	251L	37+632.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
27	261L	37+832.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
28	271L	38+032.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
29	281L	38+233.00	IG	Pile Bent	25.00	22.00	4
30	291L	38+466.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
31	301L	38+594.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	2
32	311L	38+889.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
33	321L	39+120.93	IG	Pier Column	25.98	22.00	2
34	331L	39+356.74	IG	Pile Bent	20.21	20.00	4
35	341L	39+558.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
36	351L	39+758.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
37	361L	39+958.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
38	371L	40+158.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
39	381L	40+343.00	IG	Pile Bent	15.00	15.00	4
40	391L	40+550.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
41	401L	40+759.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
42	411L	40+954.50	IG	Pile Bent	20.25	20.00	4
43	421L	41+156.87	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4
44	431L	41+354.64	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4

45	441L	41+552.40	IG	Pile Bent	15.30	15.00	4
46	451L	41+750.40	IG	Pile Bent	20.30	20.00	4
47	461L	41+951.00	IG	Pile Bent	15.00	15.00	4
48	471L	42+131.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
49	481L	42+311.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
50	491L	42+501.00	IG	Pile Bent	15.00	15.00	4
51	501L	42+686.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
52	511L	42+886.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
53	521L	43+071.00	IG	Pile Bent	20.00	20.00	4
54	531L	43+307.00	IG	Pier Column	30.00	22.00	4
55	541L	43+572.08	IG	Pile Bent	20.28	20.00	2
56	551L	43+769.84	IG	Pile Bent	20.28	20.00	3
57	561L	43+969.63	IG	Pile Bent	26.37	22.00	2
58	571L	44+191.74	IG	Pile Bent	20.28	20.00	4
59	581L	44+379.25	IG	Pile Bent	15.00	15.00	4
60	591L	44+577.00	IG	Pier Column	22.00	22.00	4

### ระบบโครงสร้างส่วนล่าง

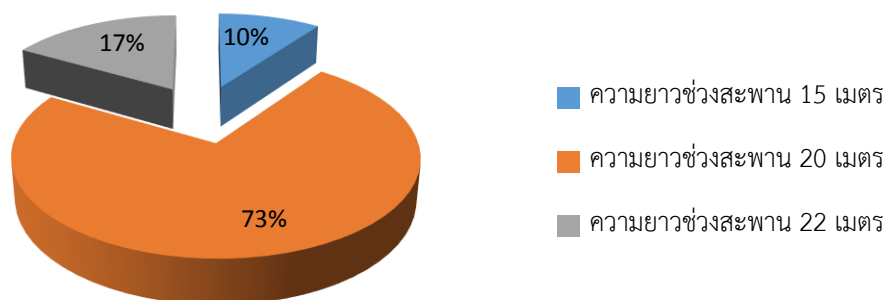


รูปที่ 3.2 สัดส่วนของระบบโครงสร้างส่วนล่าง

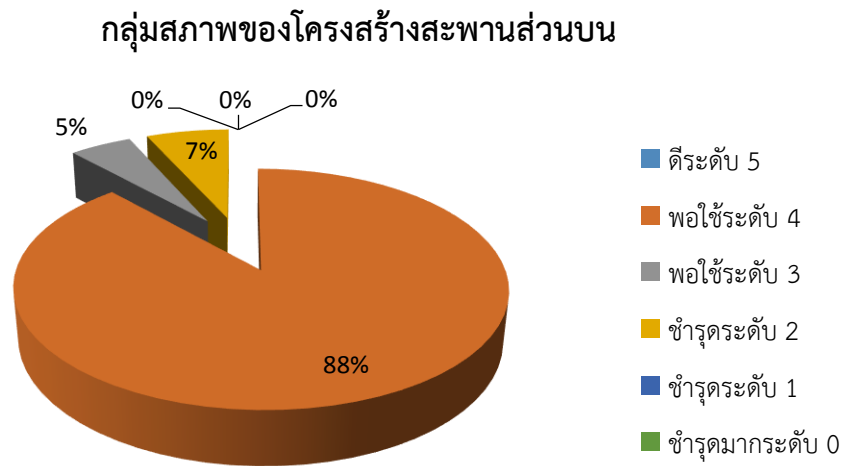
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของกลุ่มสภาพของโครงสร้างส่วนบน

ช่วงพาด สะพาน (เมตร)	กลุ่มสภาพของโครงสร้างสะพานส่วนบน						จำนวน	สัดส่วน (%)
	ระดับ 5	พอใช้ ระดับ 4	พอใช้ ระดับ 3	ชำรุด ระดับ 2	ชำรุด ระดับ 1	ชำรุด มาก ระดับ 0		
15.00	-	6	-	-	-	-	6	10
20.00	-	41	1	2	-	-	44	73.3
22.00	-	6	2	2	-	-	10	16.7
จำนวน	-	53	3	4	-	-	-	-
สัดส่วน (%)	-	88.33	5	6.67	-	-	-	-
รวม							60	100.0

จำแนกสัดส่วนของช่วงพาดสะพานในสายทางที่พิจารณา



รูปที่ 3.3 สัดส่วนของช่วงพาดสะพานในสายทางที่พิจารณา



รูปที่ 3.4 สัดส่วนกลุ่มสภาพของโครงสร้างส่วนบน



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการเสื่อมสภาพของโครงสร้างส่วนบนพอใช้ระดับ 3

### 3.1.2 ระบบของโครงสร้างสะพานส่วนบน (Structural system of super structure)

การพิจารณาระบบโครงสร้างสะพานส่วนบนที่มีค่าดีกรีของอินดีเทอร์มิเนท (Indeterminate structure) เป็นสำคัญซึ่งมีผลเกี่ยวเนื่องต่อตัวคูณของระบบโครงสร้าง (System factor) ซึ่งตัวคูณระบบโครงสร้างนี้ มีผลสะท้อนความสามารถในการต้านทานน้ำหนักของโครงสร้าง เนื่องจากพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพานมิได้เป็นลักษณะที่อิสระต่อกัน ซึ่งหมายความว่า ทุกๆส่วนของโครงสร้างสะพาน มีส่วนช่วยในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำต่อสะพาน โดยมาตรฐาน AASHTO LRFR มีการกำหนดค่าตัวคูณของระบบโครงสร้างดังนี้

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวคูณสำหรับระบบโครงสร้างสะพาน

Superstructure Type	$\phi_s$
Welded Members in Two-Girder/Truss/Arch Bridges	0.85
Riveted Members in Two-Girder/Truss/Arch Bridges	0.90
Multiple Eyebar Members in Truss Bridges	0.90
Three-Girder Bridges with Girder Spacing 6 ft (1.83m)	0.85
Four-Girder Bridges with Girder Spacing $\leq$ 4 ft (1.21m)	0.95
All Other Girder Bridges and Slab Bridges	1.00
Floorbeams with Spacing $>$ 12 ft (3.65m) and Noncontinuous Stringers	0.85
Redundant Stringer Subsystems between Floorbeams	1.00

จากการสำรวจในโครงข่ายสายทางที่พิจารณา พบว่า ระบบโครงสร้างสะพานส่วนบนเป็นแบบ I – Girder ซึ่งมีระยะห่างของคานเท่ากับ 2.50 เมตร และมีจำนวนของคานต่อหน้าตัดเท่ากับ 7 ช่วง ดังนั้น ค่าตัวคูณของระบบโครงสร้างจึงเท่ากับ 1.00 สำหรับคำนวณค่าความต้านทานของโมเมนต์ดัด และมาตรฐาน AASHTO LRFR กำหนดให้ไม่ต้องพิจารณาค่าตัวคูณของระบบโครงสร้างสำหรับค่าความต้านทานรับแรงเฉือน

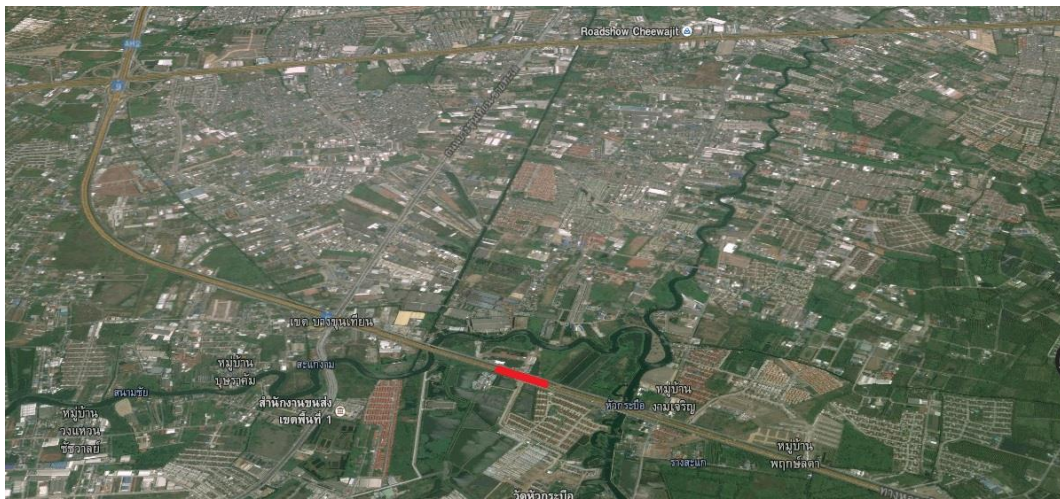
### 3.2 การคัดเลือกสะพานสำหรับการตรวจวัด (Bridge site)

การคัดเลือกสะพานสำหรับการตรวจวัดสะพานในโครงข่ายของทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 (ช่วงพระประแดง – ต่างระดับบางขุนเทียน) ที่มีระบบโครงสร้างส่วนบนเป็นคอนกรีตอัดแรงแบบคานหลักรูปตัวไอ โดยตลอดช่วงความยาวของสายทางที่ทำการพิจารณา มีความยาวประมาณ 12 กิโลเมตร ซึ่งตลอดทั้งสายทาง จะแบ่งช่วงพาดของสะพานทั้งหมด 3 ช่วงคือ 15.00 เมตร, 20 เมตร และ 22 เมตร ดังที่ได้จากข้อมูลสำรวจสะพานเบื้องต้น ประกอบกับสภาพภูมิประเทศในโครงข่ายทางหลวงที่มีลักษณะเป็นแอ่งระบายน้ำไปสู่คลองตลอดทั้งสายทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่บริเวณตำแหน่งได้สะพาน และมีถนนคู่ขนาน 2 ช่องจราจรที่ขนานไปกับสายทาง ดังนั้นการคัดเลือกสะพานจึงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการพิจารณาเลือกเพื่อเป็นหลักในการดำเนินกระบวนการในลำดับถัดไป การเลือกตำแหน่งของการตรวจวัดจึงต้องพิจารณาจากปัจจัยพื้นฐานสำคัญดังต่อไปนี้

1. สถานที่ที่ทำการตรวจวัด สามารถทำงานได้ง่าย

2. สถานที่ทำการตรวจวัด สามารถเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศปภอค
3. สามารถเข้าออกได้อย่างสะดวก
4. เป็นพื้นที่ที่มีตำแหน่งสำหรับวางห้องจัดเก็บอุปกรณ์ได้
5. เป็นพื้นที่ที่น้ำไม่สามารถท่วมถึง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกสะพานช่วงกิโลเมตรที่ 36 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น โดยมีลักษณะทางกายภาพของสะพานเป็นสะพานที่มีช่วงความยาวเท่ากับ 20.00 เมตร รองรับการใช้งานของช่องจราจรทั้งหมด 3 ช่องจราจร



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่ตั้งการตรวจวัดข้อมูลรถบรรทุกระยะยาว







รูปที่ 3.7 ลักษณะของภูมิประเทศที่ทำการตรวจวัดข้อมูลระยะยาว

### 3.3 การเตรียมการทดสอบสะพาน

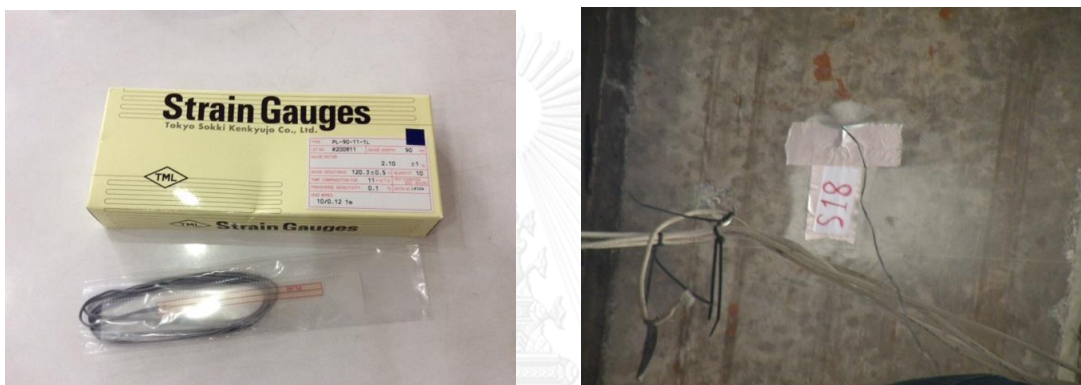
การศึกษารูปแบบพฤติกรรมของสะพานให้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริง จำเป็นต้องมีเครื่องมือในการเก็บข้อมูลของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานที่พิจารณา อีกทั้งวิธีการเปรียบเทียบผลของข้อมูลรถบรรทุกให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งการเตรียมการทดสอบสะพาน เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญต่อการเก็บข้อมูลทั้งในระยะสั้น (การทดสอบสะพานด้วยรถบรรทุกที่ทราบค่าน้ำหนักอย่างแท้จริง) และการเก็บข้อมูลในระยะยาว ผลที่ได้จะทำให้ทราบถึง สภาพการใช้งานจริงที่เกิดขึ้นตลอดทั้งสายทางที่พิจารณา และข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป

#### 3.3.1 ระบบการบันทึกข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

สภาพการใช้งานของสายทางที่พิจารณาเป็นทางหลวงพิเศษที่มีการทำความเร็วสูง อีกทั้งการจราจรที่มีความหนาแน่นตลอดทั้งเส้นทาง จึงไม่สามารถติดตั้งสถานีซึ่งน้ำหนักถาวรได้เหมือนสถานีซึ่งน้ำหนักของกรมทางหลวง ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจวัดข้อมูลด้วยวิธี Weight in motion ซึ่งจะมีวิธีการบันทึกข้อมูลโดยการเปิดใช้ตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ข้อมูลของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานที่ทำการพิจารณาเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยมาตรวัดความเครียดที่ใช้จะมีระบบความต้านทานไฟฟ้าซึ่งคุณสมบัติในการเปลี่ยนค่าตามการยืดหดซึ่งเมื่อมีรถบรรทุกหนักวิ่งผ่าน และทำการส่งสัญญาณไฟฟ้าสู่กล่องบริจคอมพลีชัน (Bridge completion) ผ่านสายแลนทั้ง 21 เส้น (Cable unshielded twist pair) เข้าสู่กล่องเก็บข้อมูลที่สามารถรองรับช่องสายแลนได้กล่องละ 8 ช่อง เป็นจำนวน 4 กล่อง (Data logger) ซึ่งกล่องเก็บข้อมูลจะเชื่อมต่อเข้ากับโมเด็มอันเป็นศูนย์กลางในการรับข้อมูลทั้งหมดก่อนถูกส่งต่อเข้าคอมพิวเตอร์ที่มีระบบการจัดเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Sensor Manager และเก็บข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลภายนอก (External hard disk) ทั้งนี้ระบบการจัดเก็บจะรวมถึงข้อมูลการตัดเพลลาของรถที่ได้จากอุปกรณ์ตัดเพลลา

### 3.3.1.1 มาตรฐานวัดความเครียด (Strain Gauge)

สะพานที่ดำเนินการทดสอบเป็นสะพานคอนกรีตจึงต้องใช้มาตรฐานวัดความเครียดสำหรับคอนกรีตโดยเฉพาะ ในการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้มาตรฐานยี่ห้อ TML รุ่น PL – 90-11-1L การติดตั้งจะทำการติดเข้ากับใต้ท้องคานรูปตัวไอซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้ติดตั้งทั้งหมด 3 ช่วงของความยาวสะพานโดยมีตำแหน่งที่นำมาพิจารณาคือ ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 หรือที่ 6.67 เมตร, 10 เมตร และ 13.33 เมตร ตามลำดับ การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด จะติดตั้งทั้งแนวของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอและตัวซี ดังนั้นจึงใช้อุปกรณ์วัดความเครียดทั้งหมด 21 ตัว เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการตรวจวัดข้อมูล มีความถูกต้องตามพฤติกรรมจริงสูงสุด



รูปที่ 3.8 มาตรฐานวัดความเครียดที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักยานยนต์ในสายทาง

### 3.3.1.2 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (Axle Detector)

เพื่อที่จะทราบความเร็วและจำนวนเพลลาของรถบรรทุก อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการระบุตำแหน่งเพลลาที่สอดคล้องกับเวลา และระยะห่างเพลลา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะสามารถทราบถึงความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านและประเภทของรถบรรทุก (ในกรณีที่แสงสว่างของตำแหน่งตรวจวัดไม่เพียงพอ จึงไม่สามารถระบุประเภทรถผ่านกล้องตรวจวัด) อุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะทำการติดตั้งบริเวณขาเข้าและขาออกของสะพานที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างช่วงความยาวของสะพาน



รูปที่ 3.9 ระบบการตรวจจับเพลิงติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางของขอบทางทั้งสองข้าง

### 3.3.1.3 กล้อง (Camera)

เพื่อให้การเก็บข้อมูลมีความถูกต้องยิ่งขึ้น จึงต้องมีการติดตั้งกล้องที่ทำงานพร้อมกับระบบการตรวจวัดซึ่งภาพเคลื่อนไหวที่ได้จะนำมาตรวจสอบความถูกต้องเพื่อให้แน่ชัดในการระบุประเภทของรถบรรทุกได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.10 การติดตั้งกล้องวงจรปิดบนขอบทางสะพาน

### 3.3.1.4 กล้องบริจคอมพลีทชั่น (Bridge completion)

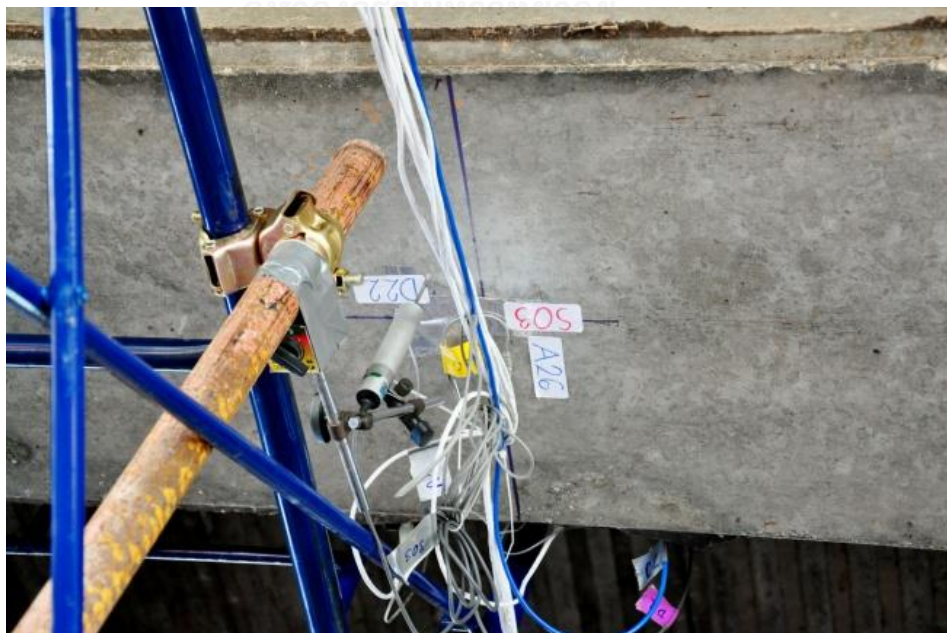
กล้องบริจคอมพลีทชั่นเป็นอุปกรณ์สำหรับการแปลงสัญญาณจากมาตรวัดความเครียดรวมถึงสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลิงเข้าสู่กล้องเก็บข้อมูลก่อนที่จะถ่ายข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการติดตั้งกล่องบริจคอมพลีทชั้น

### 3.3.1.5 สายแลน (Cable unshielded twist pair)

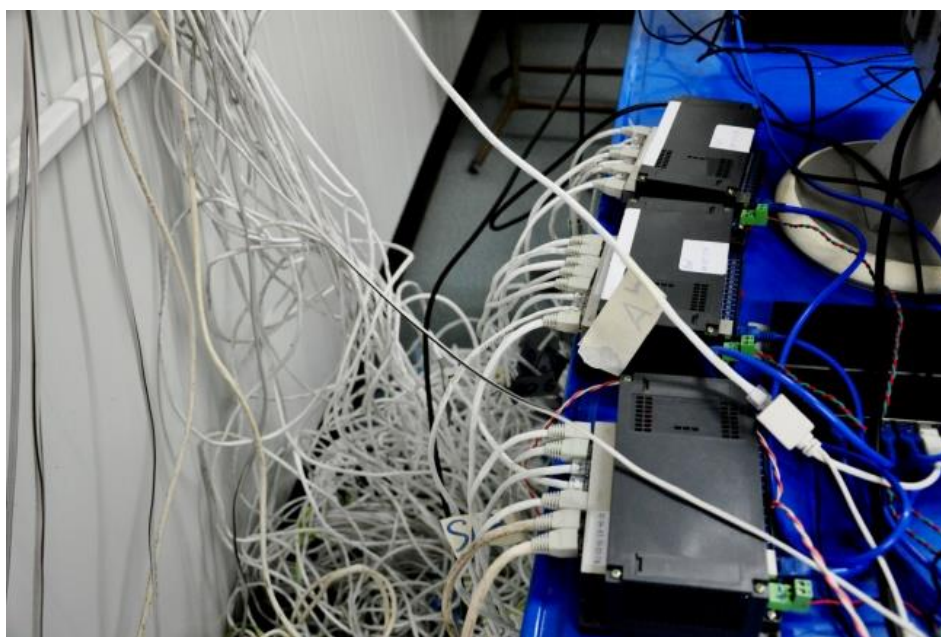
อุปกรณ์สายแลนมีไว้สำหรับเชื่อมต่อกล่องบริจคอมพลีทชั้นเข้าสู่กล่องเก็บข้อมูล ซึ่งในการตรวจวัดจะมีสายแลนที่ใช้ 21เส้นสำหรับมาตรวัดความเครียด, 2เส้น สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา และ 1เส้นสำหรับกล่อง รวมทั้งสิ้น 24เส้น



รูปที่ 3.12 การวางตำแหน่งสายแลนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การตรวจวัด

### 3.3.1.6 กล่องเก็บข้อมูล (Data logger)

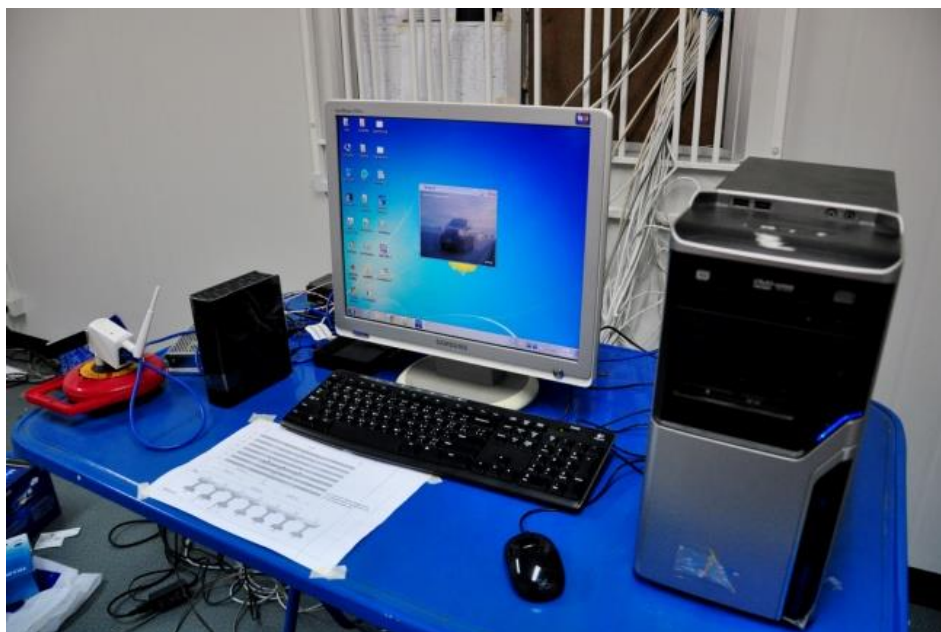
กล่องเก็บข้อมูลเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณต่างๆจากเครื่องมือตรวจวัดทั้งมาตรวจวัดความเครียดและอุปกรณ์ตรวจจับเพลลาซึ่งจะแปลงข้อมูลสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีจำนวนช่องแปรสัญญาณ 8 ช่อง, ช่วงรับอนาล็อก 0-80mV และรองรับความละเอียดของการแปลงสัญญาณที่ 24บิต



รูปที่ 3.13 กล่องเก็บข้อมูลที่มีช่องแปรสัญญาณจำนวน 8 ช่อง

### 3.3.1.7 คอมพิวเตอร์ (Computer)

อุปกรณ์คอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมของโปรแกรมและสภาพการใช้งานปัจจุบัน



รูปที่ 3.14 คอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

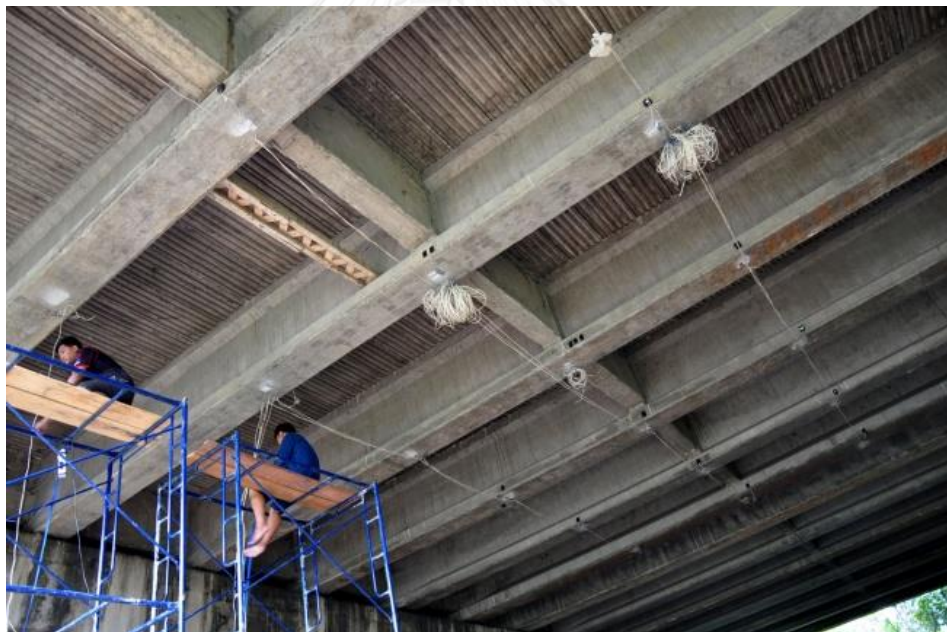
### 3.3.2 การติดตั้งและตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัด

การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดมีขั้นตอนดังนี้คือ

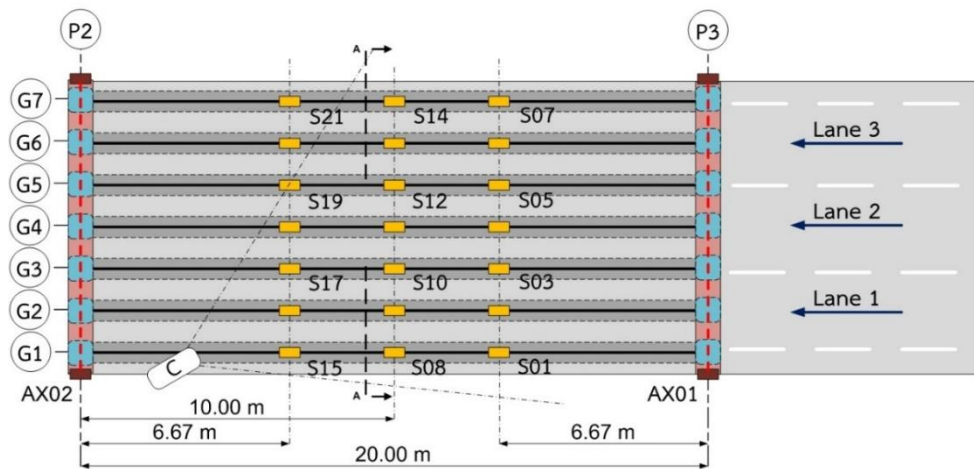
1. สำหรับอุปกรณ์มาตรวัดความเครียด – วางแนวเพื่อระบุตำแหน่งการติดตั้งของมาตรวัดความเครียด เมื่อสามารถระบุแนวได้แล้วจึงทำการต่อเติมพื้นไม้ในส่วนของมาตรวัดความเครียดซ้อนทับกับบริเวณที่เป็นแอ่งน้ำ ซึ่งแนวเอ็นเพื่อระบุตำแหน่งที่ถูกต้อง กำหนดตำแหน่งการติดตั้งและทำการขีดผิวคอนกรีตที่จะติดมาตรวัดความเครียด ทำความสะอาดให้แห้ง และยึดมาตรวัดความเครียดติดกับท้องคานคอนกรีตอัดแรงด้วยวัสดุประสาน
2. การวางแนวของสายแลนเพื่อให้ง่ายต่อการซ่อมแซมแก้ไข ในกรณีที่อุปกรณ์เกิดการเสียหายระหว่างการดำเนินการ และเชื่อมต่อสายแลนเข้ากับอุปกรณ์กล่องบริจคอมพิวเตอร์ชั้น
3. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลานบนสะพาน สำหรับตำแหน่งของการตรวจวัดเป็นเส้นทางหลวงที่มีการทำความเร็วมากและการจราจรที่หนาแน่นตลอดเวลา จึงต้องทำการติดตั้งช่วงเวลากลางคืนเท่านั้น และจะต้องมีเจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวงเพื่ออำนวยความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว
4. ในขณะที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลาน การติดตั้งกล่องวงจรปิดเป็นสิ่งที่สามารถดำเนินการได้พร้อมกัน
5. เชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งบนสะพานเข้ากับสายแลนและนำมาเชื่อมต่อเข้าสู่กล่องเก็บข้อมูล ก่อนที่จะเชื่อมต่อรวมเข้าสู่โมเด็มและทำการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้เตรียมไว้



รูปที่ 3.15 การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสะพาน



รูปที่ 3.16 การติดตั้งมาตรวัดความเค็รียดและสายแลนสำหรับการตรวจวัดสะพาน



Note:

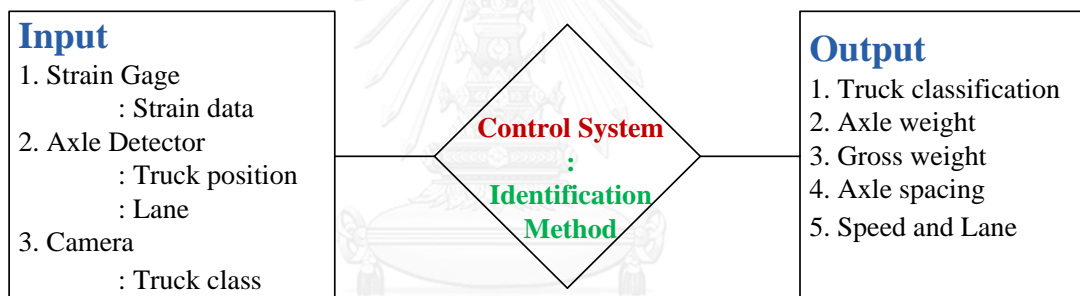
S = Concrete Strain Gauge (x21)

AX = Axle Detector (x2)

C = Camera(x1)

### Plan

รูปที่ 3.17 แสดงแผนผังตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดสะพาน



รูปที่ 3.18 แสดงแผนการดำเนินงานของการตรวจวัดสะพาน

### 3.4 การทดสอบสะพาน

การทดสอบสะพานภาคสนามเป็นการศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ เป็นการทดสอบโดยรถบรรทุกที่ทราบค่าจากการชั่งน้ำหนักและนำมาวิ่งผ่านสะพานที่พิจารณาเพื่อนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้คำนวณย้อนกลับหาเส้นอิทธิพลของโครงสร้างสะพาน (Influence line for bridge)

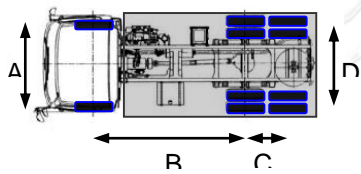
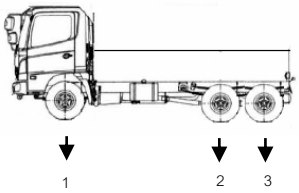
ในการทดสอบได้แบ่งประเภทรถบรรทุก 10 ล้อ และมีเพลาทั้งสิ้น 3 เเพล เป็น 2 ระดับ ได้แก่ น้ำหนักรถบรรทุกปานกลาง (Middle weight) และน้ำหนักรถบรรทุกตามพิกัดกฎหมาย (Heavy weight) มีน้ำหนักของรถบรรทุกประมาณ 20 ตัน และ 25 ตัน โดยมีข้อกำหนดของความเร็วในการทดสอบเป็น 3 ระดับได้แก่ ระดับความเร็วต่ำ (Low speed), ระดับความเร็วปานกลาง (Normal speed) และระดับความเร็วสูง (High speed) วิ่งผ่านสะพานที่ทำการทดสอบเพื่อประเมินความถูกต้องของการหาน้ำหนักรถบรรทุก





รูปที่ 3.19 การทดสอบปรับเทียบสะพานตาช้างด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ

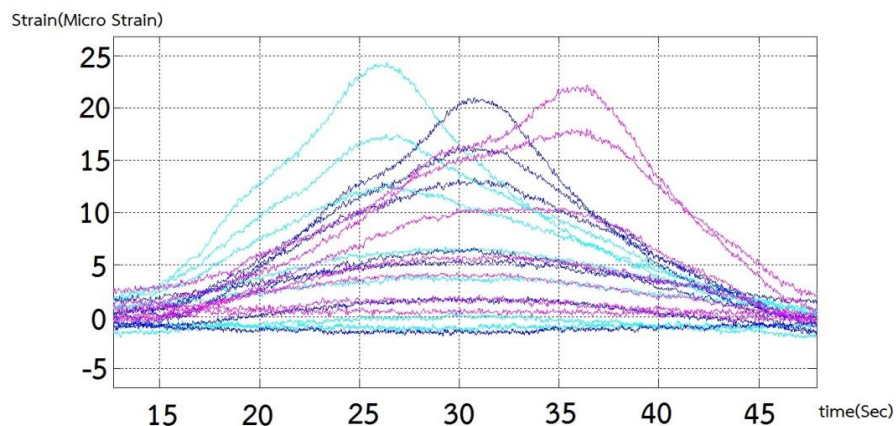
ตารางที่ 3.6 ข้อมูลรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ในการทดสอบ

ข้อมูลทางกายภาพของรถบรรทุกที่ทำการทดสอบ (เมตร)			
	สัญลักษณ์	รถบรรทุกคันที่ 1	รถบรรทุกคันที่.2
	A	1.98	1.90
	B	4.00	4.00
	C	1.30	1.35
	D	1.80	1.80
น้ำหนัก (ตัน)			
	เพลาคับที่ 1	4.26	5.11
	เพลาคับที่ 2	8.125	9.98
	เพลาคับที่ 3	8.125	9.98
	รวมน้ำหนักเพลาคับ	20.51	25.07

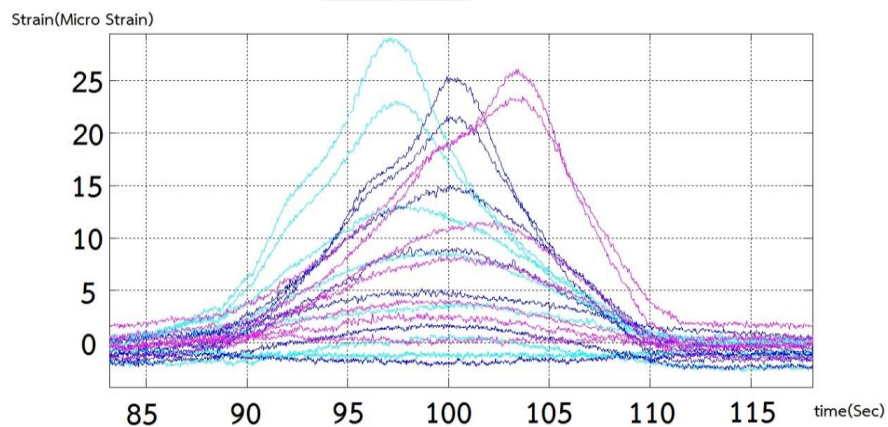
สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการทดสอบทางพลวัตเท่านั้นซึ่งแบ่งกรณีของการทดลองด้วย ความเร็วต่ำ ความเร็วปานกลาง และความเร็วสูง โดยข้อมูลค่าความเครียดที่ได้จากมาตรวัดความเครียดในช่วงของความยาวสะพานที่  $L/3$  แสดงผลลัพธ์ของข้อมูลสี่ฟ้า ช่วงของความยาวสะพานที่  $L/2$  แสดงผลลัพธ์ของข้อมูลสี่น้ำเงิน และช่วงความยาวสะพานที่  $2L/3$  แสดงผลลัพธ์ของข้อมูลสี่ม่วง ซึ่งแกนนอนเป็นช่วงของเวลาที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน และแกนตั้งแสดงข้อมูลของมาตรวัดความเครียด

ข้อมูลมาตรวัดความเครียดจะพิจารณาในช่วงที่ค่าความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงจากศูนย์เป็นค่าความชันซึ่งหมายถึง เพลาคับแรกของรถบรรทุก 10 ล้อ ได้วิ่งเข้าสู่ช่วงความยาวของสะพานที่

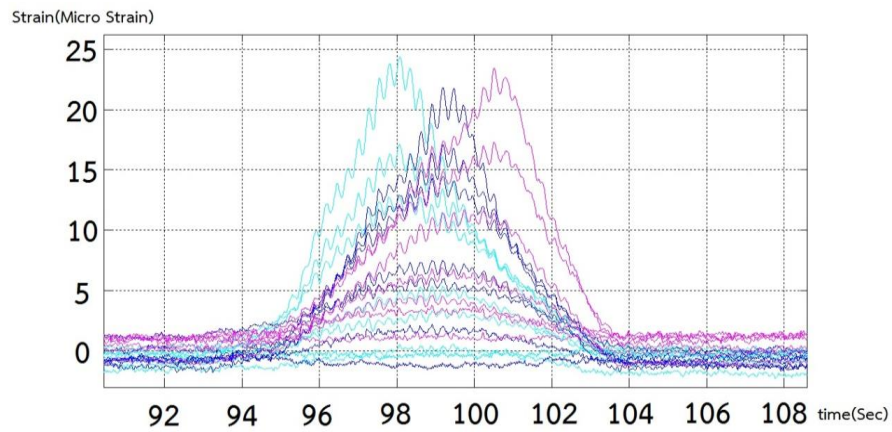
พิจารณา และการเปลี่ยนแปลงค่าความชันไปสู่ศูนย์หมายถึง เพลาสูดท้ายของรถบรรทุก 10 ล้อ ได้วิ่งออกจากช่วงความยาวของสะพานที่พิจารณา ซึ่งข้อมูลทางกายภาพของรถบรรทุกจะถูกนำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้ค่าความเร็วของการทดสอบที่แท้จริง และนำตำแหน่งของเพลาล้อในแต่ละช่วงเวลา มาคำนวณย้อนกลับเพื่อให้สามารถได้ค่าอิทธิพลของสะพานที่ทำการตรวจวัด (Influence line for bridge)



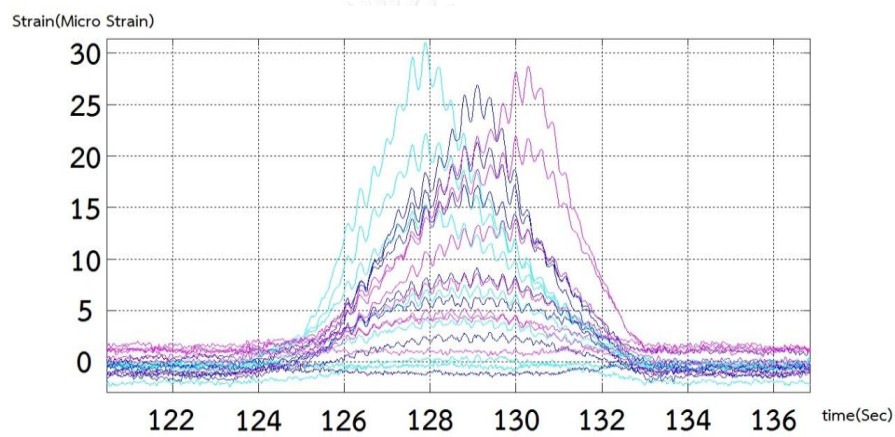
รูปที่ 3.20 การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 (20ตัน) ที่ความเร็วต่ำในช่องจราจรที่ 2



รูปที่ 3.21 การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 (25ตัน) ที่ความเร็วต่ำในช่องจราจรที่ 2

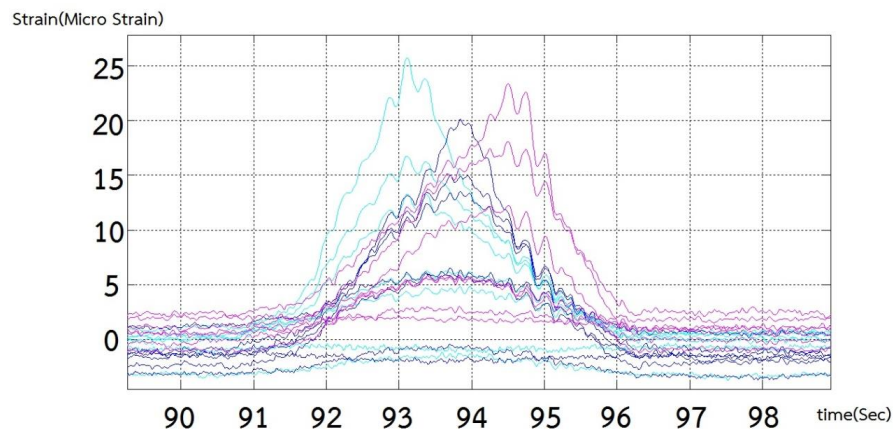


รูปที่ 3.22 การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 (20ต้น) ที่ความเร็วปานกลางในช่องจราจรที่ 2

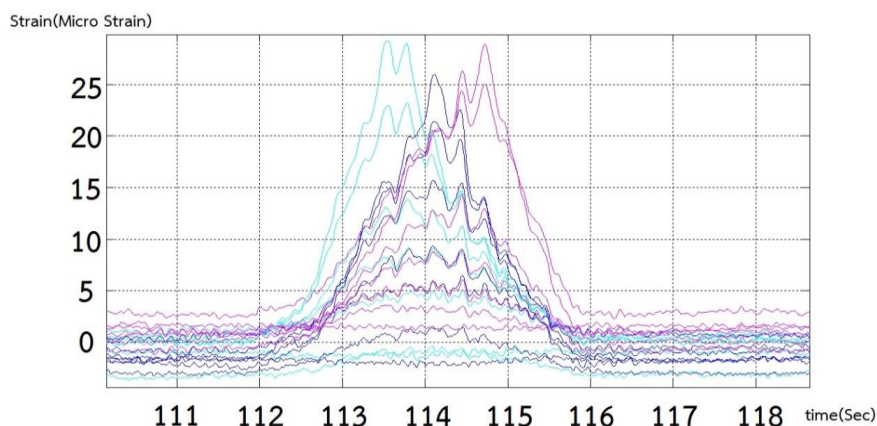


รูปที่ 3.23 การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกทุกคันที่ 2 (25ต้น) ที่ความเร็วปานกลางในช่องจราจรที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
2  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.24 การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกทุกคันที่ 1 (20ต้น) ที่ความเร็วสูงในช่องจราจรที่ 2

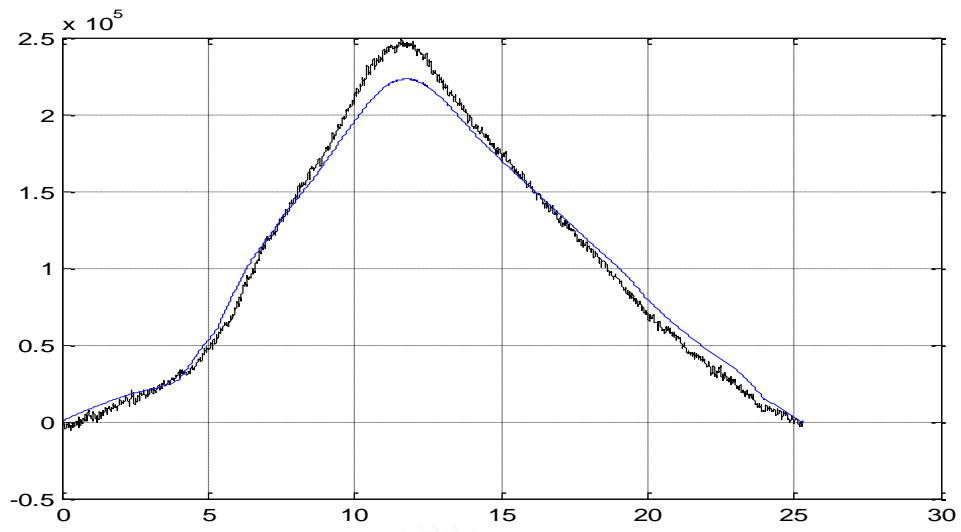


รูปที่ 3.25 การทดสอบทางพลวัตด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 (25ตัน) ที่ความเร็วสูงในช่องจราจรที่ 2

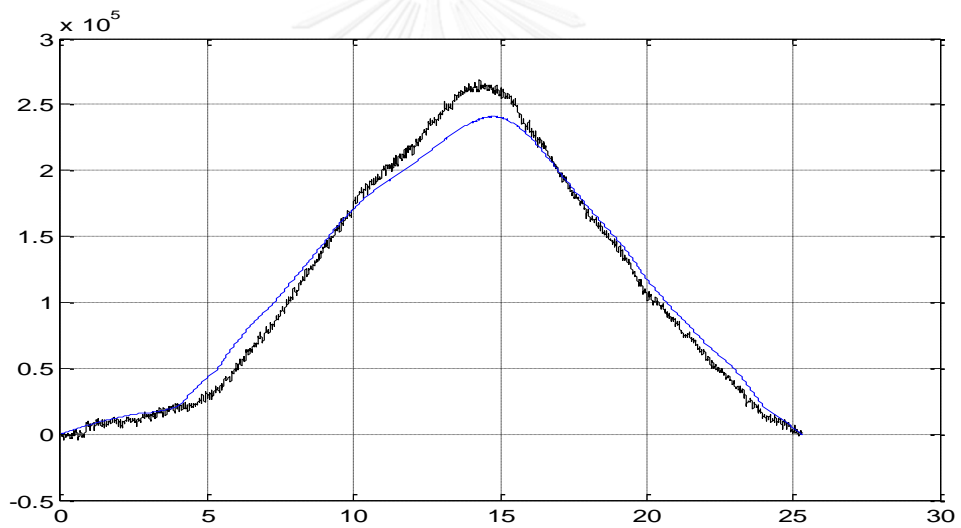
### 3.5 การคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกจากผลการทดสอบภาคสนาม

การคำนวณน้ำหนักรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามเป็นการใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีการเส้นอิทธิพล (Influence line method) ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1(การหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนผ่านสะพาน) โดยใช้ข้อมูลความเครียดของสะพานขณะที่มีรถบรรทุกแล่นผ่าน รวมถึงข้อมูลจากอุปกรณ์ตัดเพลลา มาทำการวิเคราะห์ค่าความเร็วรถ และค่าน้ำหนักเพลลาโดยตรง และใช้วิธีการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของผลต่างกำลังสองระหว่างค่าโมเมนต์ตัดของสะพานที่ตรวจวัดจริง และค่าโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณผ่านฟังก์ชันของเส้นอิทธิพล (Influence line) ด้วยคำสั่ง Fminunc (Find minimum of unconstrained multivariable function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าต่ำสุดของ Objective function

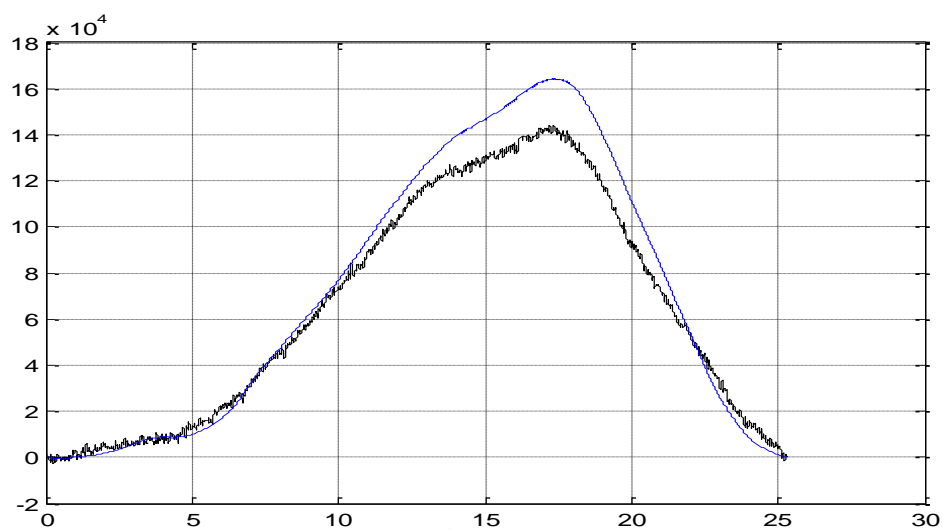
การคำนวณโมเมนต์ตัดที่คำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับโมเมนต์ตัดจริงที่ได้จากการตรวจวัดสะพานโดยมีตัวอย่างของการเปรียบเทียบข้อมูลเช่น น้ำหนักรถบรรทุกปานกลาง (20ตัน) วิ่งผ่านสะพานด้วยความเร็วต่ำซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะได้ค่าความเครียดและนำไปคำนวณเพื่อหาโมเมนต์ตัดจริงที่กระทำต่อสะพานซึ่งแสดงผลด้วยเส้นสีดำ และโมเมนต์ตัดที่ได้จากการคำนวณปรับเทียบค่าอิทธิพลของสะพานที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดจริง และโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ  $L/3$



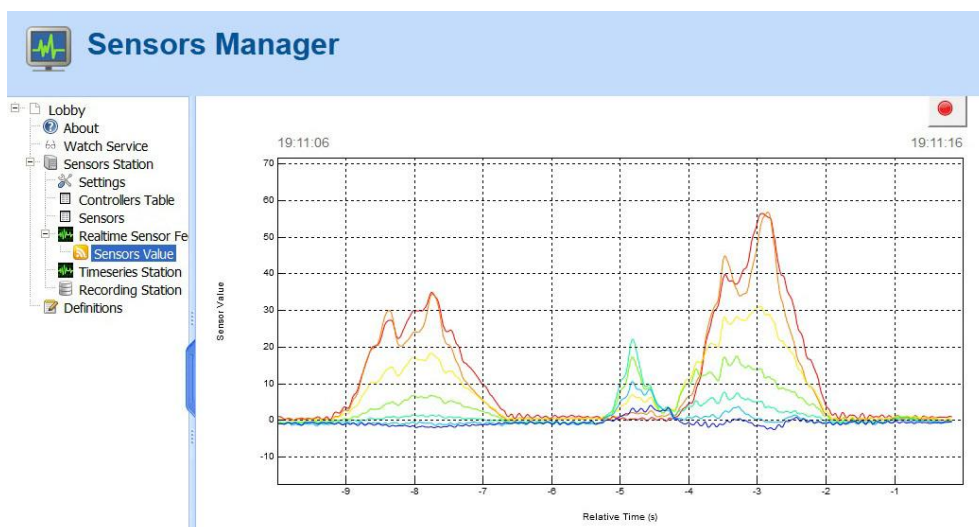
รูปที่ 3.27 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดจริง และโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ  $L/2$



รูปที่ 3.28 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดจริง และโมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะ  $2L/3$

### 3.6 การตรวจวัดน้ำหนักรถบรรทุกระยะยาว

เพื่อให้ได้ข้อมูลการใช้งานที่เกิดขึ้นจริงของโครงข่ายทาง จึงต้องทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกในระยะยาวผ่านเครื่องมือทดสอบสะพานซึ่งประกอบไปด้วย มาตรวัดความเครียด อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา และกล้อง โดยที่ระบบของการตรวจวัดจะถูกเปิดใช้งานตลอด 24 ชั่วโมงซึ่งทำงานควบคู่ไปกับกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งบนขอบสะพาน ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะสามารถอ้างอิงได้ตามเวลาที่บันทึกข้อมูลไว้ และข้อมูลจะถูกโปรแกรม Sensor manager ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการตรวจวัดทำการรีเซ็ตรบบทุกๆ 1 ชั่วโมงเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ทั้งนี้การควบคุมอุปกรณ์ตรวจวัดสามารถควบคุมผ่านระบบอินเตอร์เน็ตที่สามารถเชื่อมต่อสู่การควบคุมภายนอกซึ่งทำให้ทราบการดำเนินงานของระบบที่สามารถดำเนินต่อไปได้อย่างสมบูรณ์ และหากพบว่า มีข้อผิดพลาดจากการทำงานของระบบ จะสามารถทราบและดำเนินการแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.29 ระบบการตรวจวัดของ Sensor manager ในขณะที่ทำการเก็บบันทึกข้อมูลรถบรรทุก

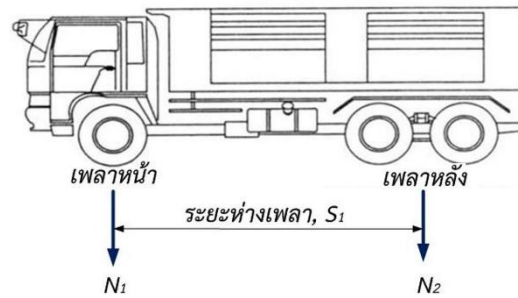
### 3.7 น้ำหนักบรรทุกจริงที่ได้จากการตรวจวัด

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดระยะยาวนี้ จะนำไปประเมินความสามารถการต้านทานสะพานอันเนื่องมาจากน้ำหนักรถบรรทุกในแต่ละประเภทซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณารถบรรทุกเพียง 3 ประเภทเท่านั้นคือ 1.รถบรรทุก 10 ล้อ 2.รถบรรทุกกึ่งพ่วง และ 3.รถบรรทุกพ่วง ซึ่งรถบรรทุกทั้ง 3 ประเภทนี้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการใช้งานสะพานมากที่สุด

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในรูปแบบของมาตรวัดความเครียด จะนำไปคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุก โดยที่ผลการวิเคราะห์จะให้ค่าน้ำหนักรถบรรทุกที่ลงในแต่ละเพลลา มีความใกล้เคียงกับน้ำหนักจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อีกทั้งข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตัดเพลลา ทำให้สามารถระบุประเภทของรถบรรทุกได้อย่างแม่นยำ ด้วยข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของรถบรรทุกทั้ง 3 ประเภทจะพิจารณาที่ น้ำหนักเพลลาหน้า น้ำหนักเพลลากลาง น้ำหนักเพลลาหลัง รวมถึงระยะห่างเพลลา และความเร็วของรถบรรทุก

และเพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณผลจากน้ำหนักรถบรรทุกในแต่ละประเภท งานวิจัยนี้จึงได้ทำการรวมน้ำหนักเพลลากลางอย่างละหนึ่งค่าและเพลลาหลังอย่างละหนึ่งค่า โดยใช้ระยะที่กึ่งกลางของเพลลาบรรทุกเป็นระยะห่างระหว่างเพลลา

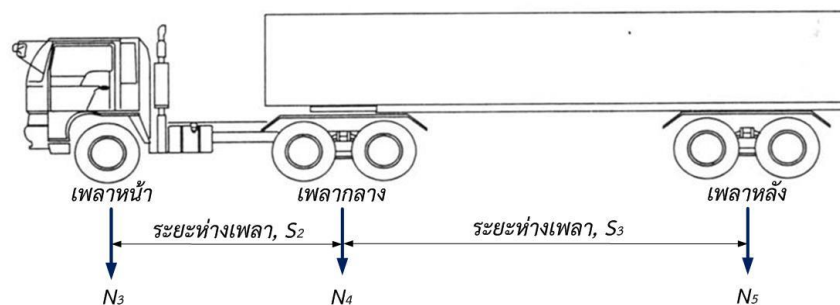
รถบรรทุกโดยมีมาตรฐานทั่วไปของการใช้งานในประเทศไทยจำแนกประเภทได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.30 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุก 10 ล้อ

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้งานในประเทศไทย

รถบรรทุก 10 ล้อ	
พารามิเตอร์	ค่าพื้นฐาน
น้ำหนักเพลาน้ำ ( $N_1$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลาลัง ( $N_2$ )	>4.00 ตัน
น้ำหนักรวม ( $N_1 + N_2$ )	>6.00 ตัน
ระยะห่างเพลาน้ำ ( $S_1$ )	3.00 – 5.50 เมตร



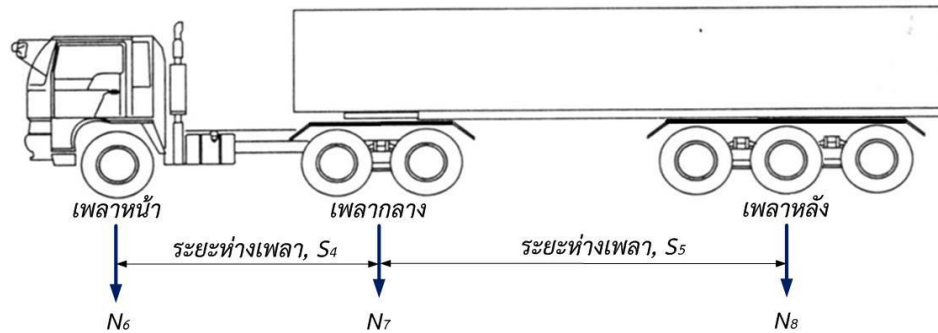
รูปที่ 3.31 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5เพลาน้ำ

ตารางที่ 3.8 มาตรฐานรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5เพลาน้ำที่ใช้งานในประเทศไทย

รถบรรทุกกึ่งพ่วง 5เพลาน้ำ 18 ล้อ	
พารามิเตอร์	ค่าพื้นฐาน
น้ำหนักเพลาน้ำ ( $N_3$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลากลาง ( $N_4$ )	>4.00 ตัน
น้ำหนักเพลาลัง ( $N_5$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักรวม ( $N_3 + N_4 + N_5$ )	>8.00 ตัน



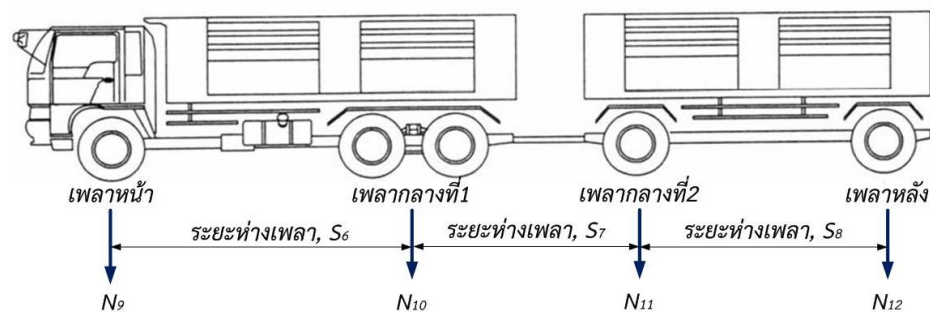
ระยะห่างเพลลา ( $S_2$ )	3.00 – 5.00 เมตร
ระยะห่างเพลลา ( $S_3$ )	4.50 – 7.50 เมตร



รูปที่ 3.32 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6เพลลา

ตารางที่ 3.9 มาตรฐานรถบรรทุกกึ่งพ่วง 6เพลลาที่ใช้งานในประเทศไทย

รถบรรทุกกึ่งพ่วง 6เพลลา 22ล้อ	
พารามิเตอร์	ค่าพื้นฐาน
น้ำหนักเพลลาหน้า ( $N_6$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลลากลาง ( $N_7$ )	>4.00 ตัน
น้ำหนักเพลลาหลัง ( $N_8$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักรวม ( $N_7 + N_8 + N_9$ )	>8.00 ตัน
ระยะห่างเพลลา ( $S_4$ )	3.00 – 5.00 เมตร
ระยะห่างเพลลา ( $S_5$ )	4.50 – 7.50 เมตร

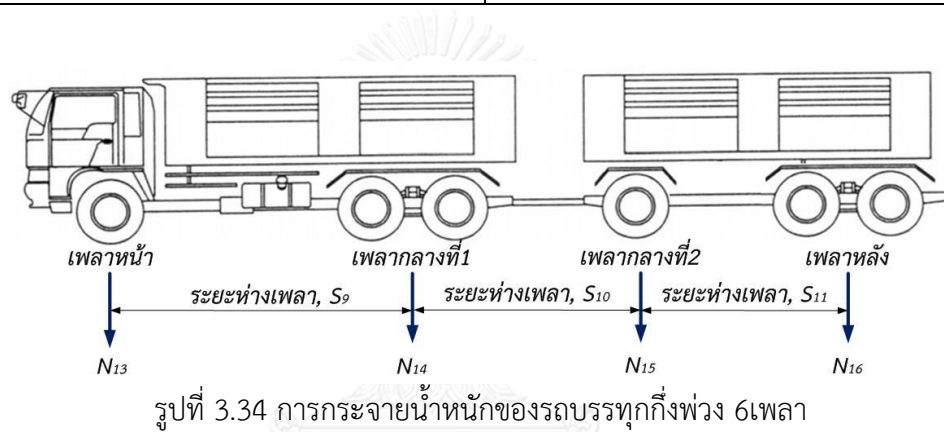


รูปที่ 3.33 การกระจายน้ำหนักของรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5เพลลา

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานรถบรรทุกพ่วง 5เพลลาที่ใช้งานในประเทศไทย

รถบรรทุกพ่วง 5เพลลา 18ล้อ	
---------------------------	--

พารามิเตอร์	ค่าพื้นฐาน
น้ำหนักเพลาหน้า ( $N_9$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลากลางที่ 1 ( $N_{10}$ )	>4.00 ตัน
น้ำหนักเพลากลางที่ 2 ( $N_{11}$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลาหลัง ( $N_{12}$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักรวม ( $N_9 + N_{10} + N_{11} + N_{12}$ )	>10.00 ตัน
ระยะห่างเพลา ( $S_6$ )	3.00 – 5.00 เมตร
ระยะห่างเพลา ( $S_7$ )	4.50 – 5.50 เมตร
ระยะห่างเพลา ( $S_8$ )	4.50 – 5.50 เมตร



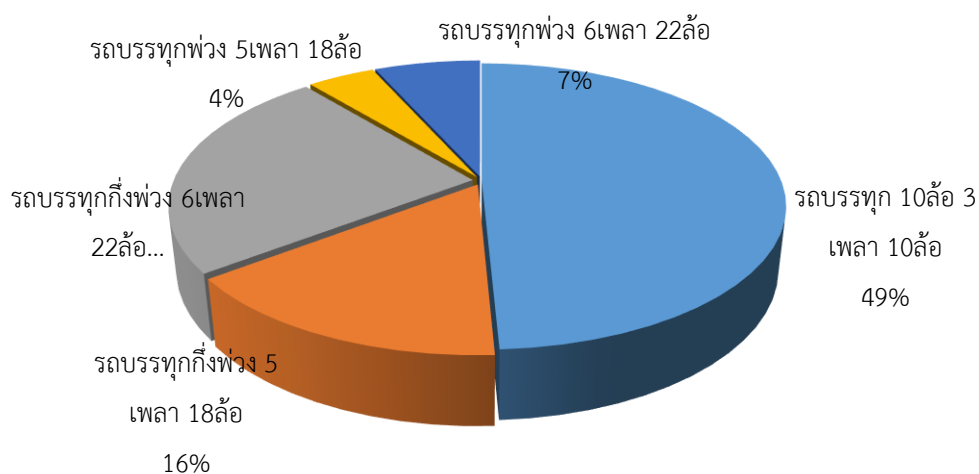
ตารางที่ 3.11 มาตรฐานรถบรรทุกพ่วง 6 เพลาที่ใช้งานในประเทศไทย

รถบรรทุกพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ	
พารามิเตอร์	ค่าพื้นฐาน
น้ำหนักเพลาหน้า ( $N_{13}$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลากลางที่ 1 ( $N_{14}$ )	>4.00 ตัน
น้ำหนักเพลากลางที่ 2 ( $N_{15}$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักเพลาหลัง ( $N_{16}$ )	>2.00 ตัน
น้ำหนักรวม ( $N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16}$ )	>10.00 ตัน
ระยะห่างเพลา ( $S_9$ )	3.00 – 5.00 เมตร
ระยะห่างเพลา ( $S_{10}$ )	4.50 – 5.50 เมตร
ระยะห่างเพลา ( $S_{11}$ )	4.50 – 5.50 เมตร

### 3.8 ผลจากการตรวจวัดน้ำหนักรถบรรทุกระยะยาว

จากการได้เก็บบันทึกข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกระยะยาวช่วงโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ถนน กาญจนภิเษก วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครฝั่งใต้ ช่วงหลักกิโลเมตรที่ 34+750 (ตำแหน่งที่ตั้งใกล้เคียงกับหมู่บ้าน บุราสิริ) ซึ่งได้เริ่มทำการเก็บบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 4 กรกฎาคม 2557 จนถึง วันพฤหัสบดีที่ 14 สิงหาคม 2557 รวมระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 41 วัน

#### สรุปข้อมูลรถบรรทุกจากโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9

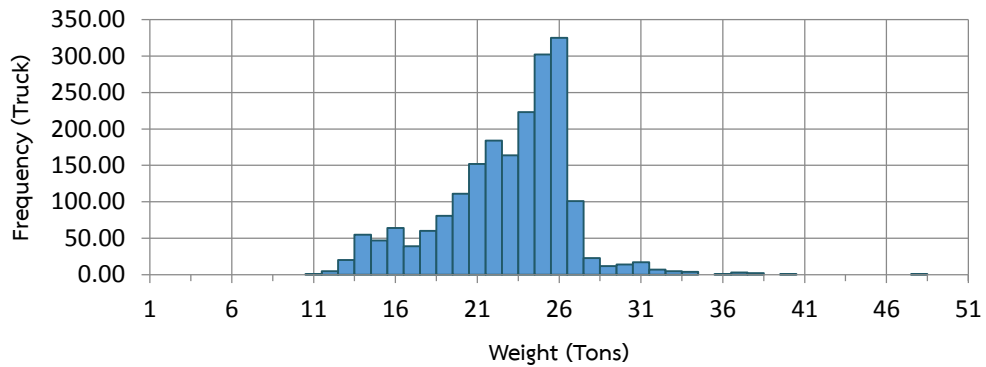


รูปที่ 3.35 แสดงสัดส่วนของรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้ตลอดระยะเวลา 41 วัน

ตารางที่ 3.12 สรุปข้อมูลรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้จากโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ถนน กาญจนภิเษก วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครฝั่งใต้

ประเภทรถบรรทุก	รายละเอียด	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	สัดส่วน (เปอร์เซ็นต์)
รถบรรทุก 10 ล้อ	3 เพลา 10 ล้อ	2,024	49.22
รถบรรทุก กึ่งพ่วง	5 เพลา 18 ล้อ	636	15.47
	6 เพลา 22 ล้อ	998	24.27
รถบรรทุก พ่วง	5 เพลา 18 ล้อ	177	4.30
	6 เพลา 22 ล้อ	277	6.74
รวมทั้งสิ้น		4,112	100

### ข้อมูลรถบรรทุก 10 ล้อ

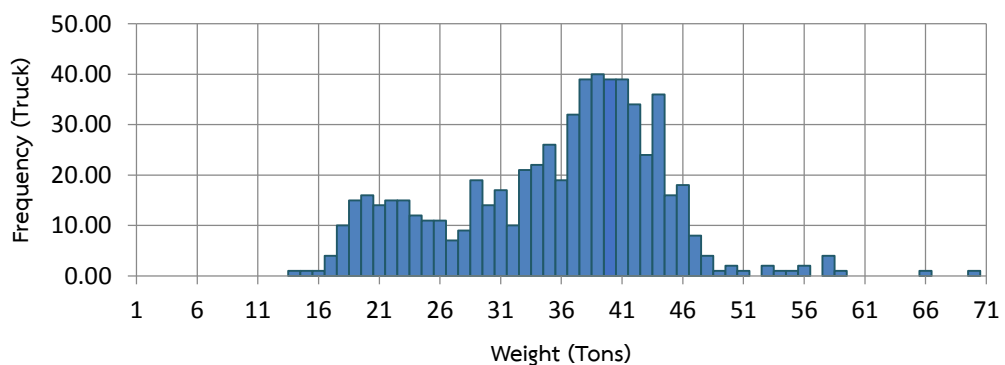


รูปที่ 3.36 ข้อมูลรถบรรทุก 10 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 3.13 สรุปข้อมูลรถบรรทุกสิบล้อทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว

ประเภทรถบรรทุก	รายละเอียด	น้ำหนักเฉลี่ย (ตัน)	น้ำหนักน้อยสุด (ตัน)	น้ำหนักมากที่สุด (ตัน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	พิกัดกฎหมาย (ตัน)
รถบรรทุก 10 ล้อ	3 เพลา 10 ล้อ	21.38	9.90	46.40	3.96	25.00

### ข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา 18 ล้อ

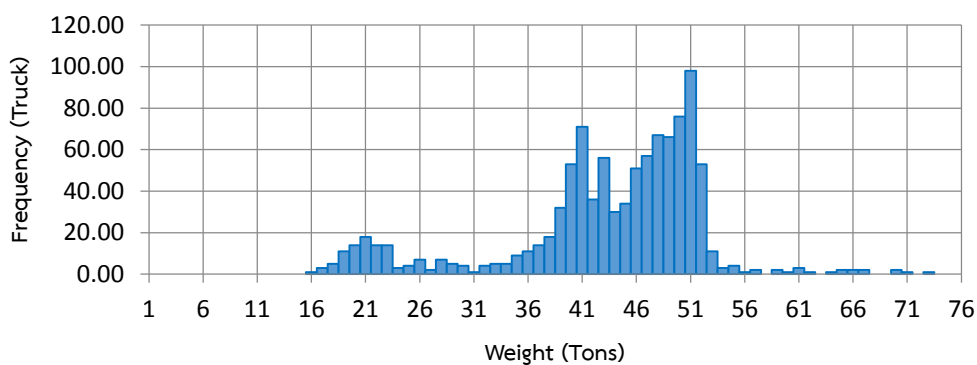


รูปที่ 3.37 แสดงข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลา 18 ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 3.14 สรุปข้อมูลรถบรรทุกกิ่งฟุ้ง 5เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว

ประเภทรถบรรทุก	รายละเอียด	น้ำหนักเฉลี่ย (ตัน)	น้ำหนักน้อยสุด (ตัน)	น้ำหนักมากที่สุด (ตัน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	พิกัดกฎหมาย (ตัน)
รถบรรทุกกิ่งฟุ้ง	5เพลลา 18 ล้อ	33.90	12.96	68.02	8.80	45.00

ข้อมูลรถบรรทุกกิ่งฟุ้ง 6เพลลา 22ล้อ

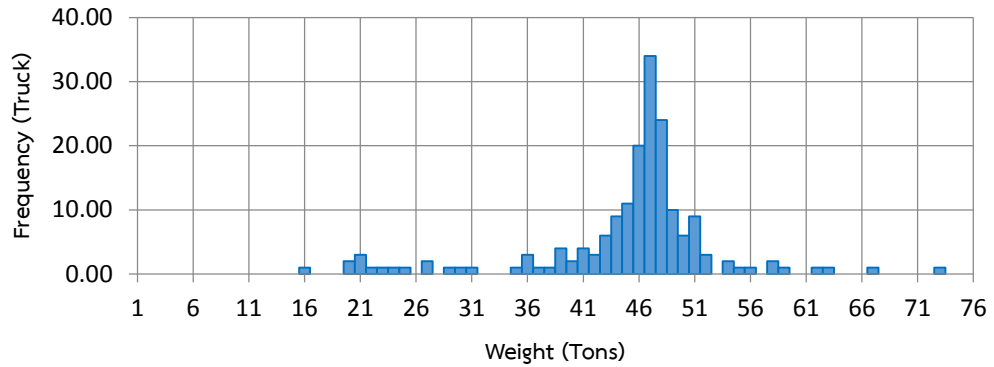


รูปที่ 3.38 แสดงข้อมูลรถบรรทุกกิ่งฟุ้ง 6เพลลา 22ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 3.15 สรุปข้อมูลรถบรรทุกกิ่งฟุ้ง 6เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว

ประเภทรถบรรทุก	รายละเอียด	น้ำหนักเฉลี่ย (ตัน)	น้ำหนักน้อยสุด (ตัน)	น้ำหนักมากที่สุด (ตัน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	พิกัดกฎหมาย (ตัน)
รถบรรทุกกิ่งฟุ้ง	6เพลลา 22 ล้อ	41.88	14.78	71.49	9.19	50.50

### ข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 5เพลลา 18ล้อ

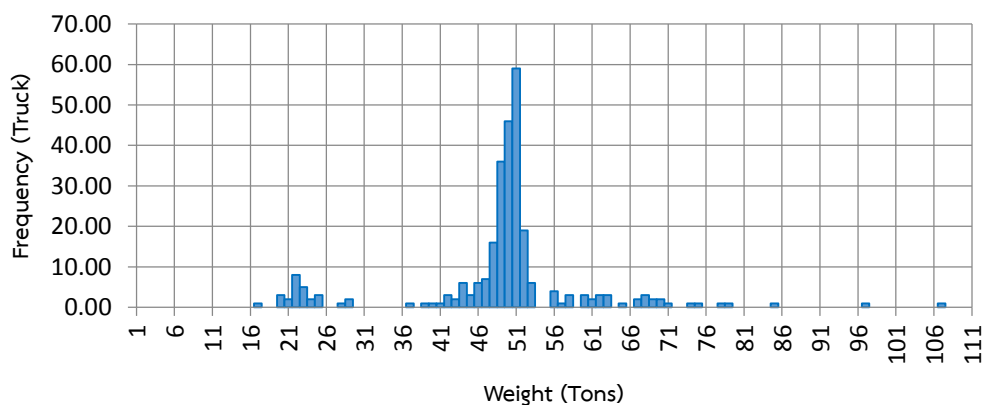


รูปที่ 3.39 แสดงข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 5เพลลา 18ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 3.16สรุปข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 5เพลลาทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว

ประเภทรถบรรทุก	รายละเอียด	น้ำหนักเฉลี่ย (ตัน)	น้ำหนักน้อยสุด (ตัน)	น้ำหนักมากที่สุด (ตัน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	พิกัดกฎหมาย (ตัน)
รถบรรทุกพ่วง	5เพลลา 18 ล้อ	45.65	14.95	75.76	8.91	50.50

### ข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 6เพลลา 22ล้อ

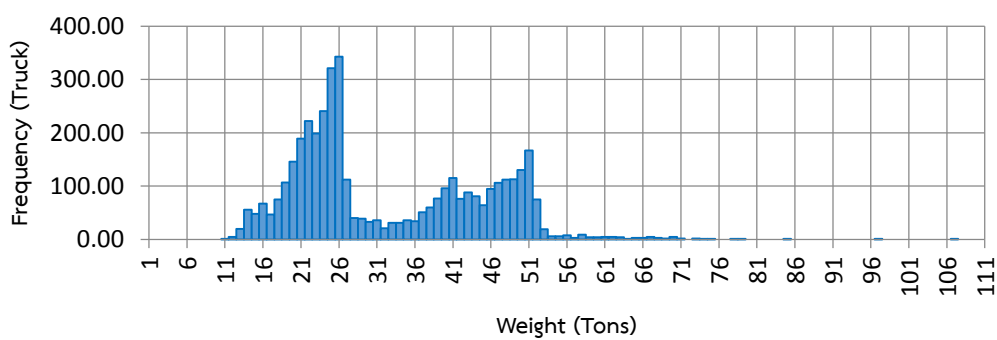


รูปที่ 3.40 แสดงข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 6เพลลา 22ล้อ ที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 3.17 สรุปข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 6เพลาทันหมดที่ตรวจวัดระยะยาว

ประเภทรถบรรทุก	รายละเอียด	น้ำหนักเฉลี่ย (ตัน)	น้ำหนักน้อยสุด (ตัน)	น้ำหนักมากที่สุด (ตัน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	พิสัย (ตัน)
รถบรรทุกพ่วง	6เพลาล้อ	47.69	15.66	105.33	11.47	50.50

รวมข้อมูลของรถบรรทุกทุกประเภท



รูปที่ 3.41 แสดงข้อมูลรถบรรทุกทุกประเภทที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 3.18 สรุปข้อมูลทั้งหมดที่ตรวจวัดระยะยาว

รายละเอียด	น้ำหนักเฉลี่ย (ตัน)	น้ำหนักน้อยสุด (ตัน)	น้ำหนักมากที่สุด (ตัน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	รวม (คัน)
รวมรถบรรทุกทุกประเภท	30.99	9.90	105.33	12.39	4112

## บทที่ 4

### การสร้างแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์สะพานในโครงข่าย

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของสะพานในสายทาง

จากการตรวจวัดสะพานในสายทางและข้อมูลจากสำนักบำรุงทางธนบุรี กรมทางหลวง พบว่าการสำรวจรายละเอียดของสะพานมีความสอดคล้องกับแบบก่อสร้าง จึงสมมติฐานว่า ระบบโครงสร้างของสะพานในสายทางสามารถอ้างอิงจากแบบสะพานที่ใช้ก่อสร้างได้ โดยรายละเอียดของแบบก่อสร้างสะพานจะพิจารณาดังนี้

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดมาตรฐานและข้อกำหนดสำหรับการก่อสร้างสะพานในสายทาง

มาตรฐานคอนกรีต				
คอนกรีตที่ใช้สำหรับส่วนต่างๆของโครงสร้างสะพาน จะต้องรับแรงอัดสูงสุด (Ultimate strength) จากการอัดแท่งคอนกรีตทดลองขนาด 15×15×15 ซม. เมื่อหล่อแล้ว 28วัน				
ส่วนของโครงสร้าง	แรงอัดสูงสุดไม่น้อยกว่า ( $kg / m^2$ )	ปริมาณปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า ( $kg / m^3$ )	Slump ไม่นเกิน ( $cm$ )	ขนาดหินใหญ่สุดแนะนำ
คานคอนกรีตอัดแรง	450	400	10	¾”
พื้นสะพาน	300	350	10	1”
มาตรฐานเหล็ก				
ขนาดเหล็กเสริม	เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $mm$ )	น้ำหนักกระบอก ( $kg / m$ )	มาตรฐาน มอก.	สัญลักษณ์
RB6	6	0.22	20	SR24
RB9	9	0.50	20	SR24
DB12	12	0.89	24	SD30
DB16	16	1.58	24	SD30
DB20	20	2.47	24	SD30
DB25	25	3.85	24	SD30
DB28	28	4.83	24	SD30
DB32	32	6.31	24	SD30

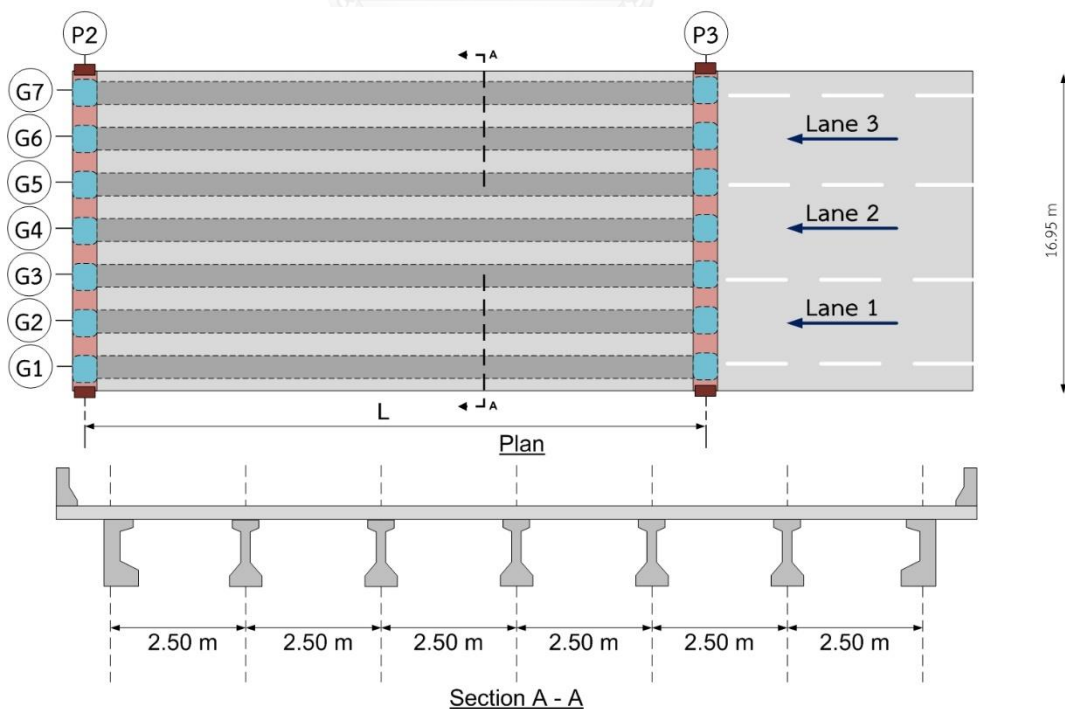


ระยะหุ้มคอนกรีตถึงผิวเหล็กที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีต

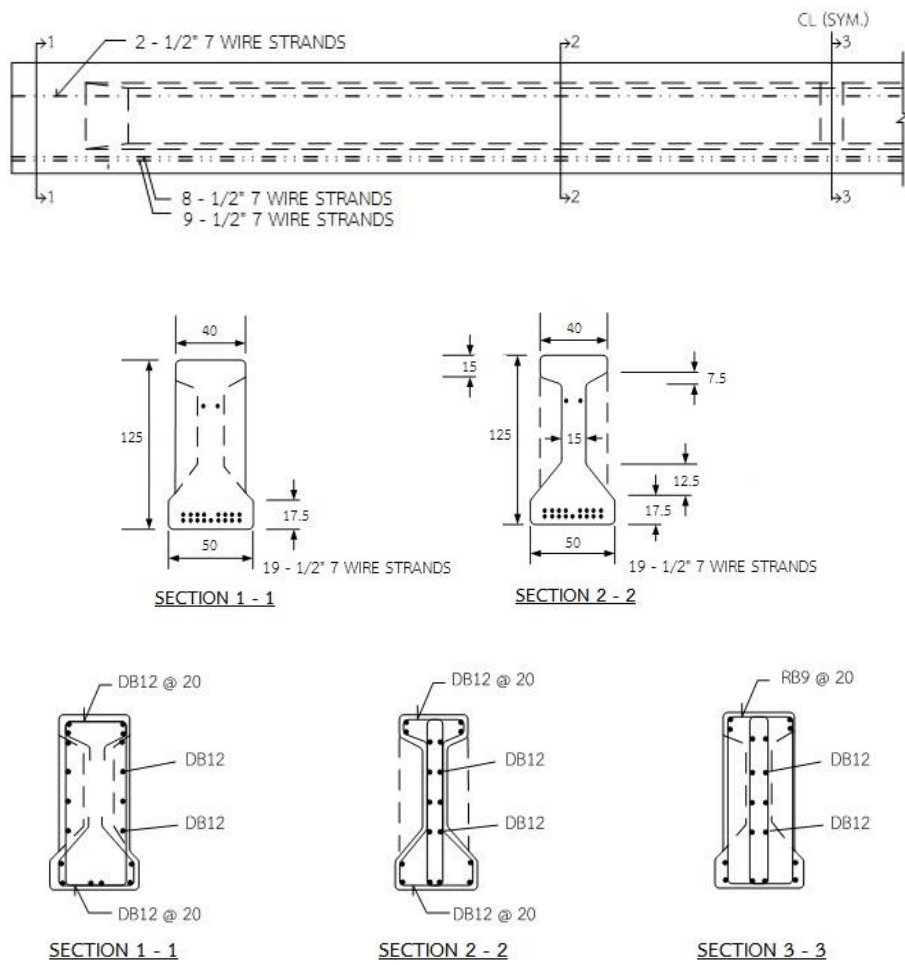
1. คานคอนกรีตอัดแรง ระยะ 2.50 cm
2. ผิวล่างพื้นสะพาน ระยะ 2.50 cm
3. ผิวบนพื้นสะพาน ระยะ 4.00 cm
4. ตอม่อส่วนที่สัมผัสพื้น ระยะ 7.50 cm
5. ตอม่อส่วนที่ไม่สัมผัสพื้น ระยะ 5.00 cm

#### เหล็กเสริมอัดแรง (Prestressing steel)

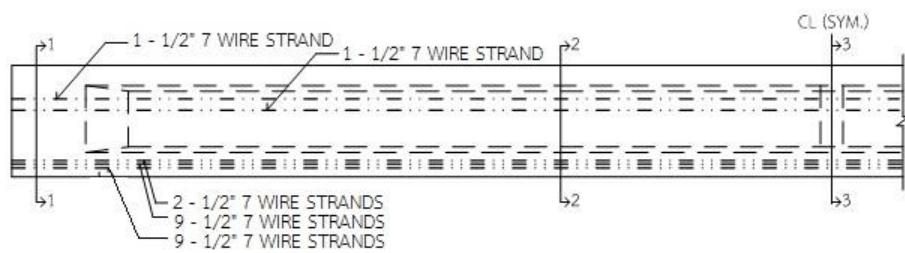
1. เหล็กเสริมอัดแรงชนิด 7wire strand ชั้นคุณภาพ 1860 ตามมาตรฐาน มอก. 420 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.70 mm มีแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ไม่น้อยกว่า 18,730 kg ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53 mm มีแรงดึงสูงสุดไม่น้อยกว่า 10,430 kg
2. เหล็กอัดแรงชนิดลวด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.00 mm มีแรงดึงสูงสุดไม่น้อยกว่า 16,500 kg
3. Initial prestressing stress ในเหล็กอัดแรงเท่ากับ 13,250 ksc หรือดึงให้ Strands แต่ละเส้นยืด (Elongation) เท่ากับ 33.18 cm จากฐานการดึง 50.00 m
4. ให้ตัดเหล็กอัดแรงเมื่อคอนกรีตรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 360 ksc

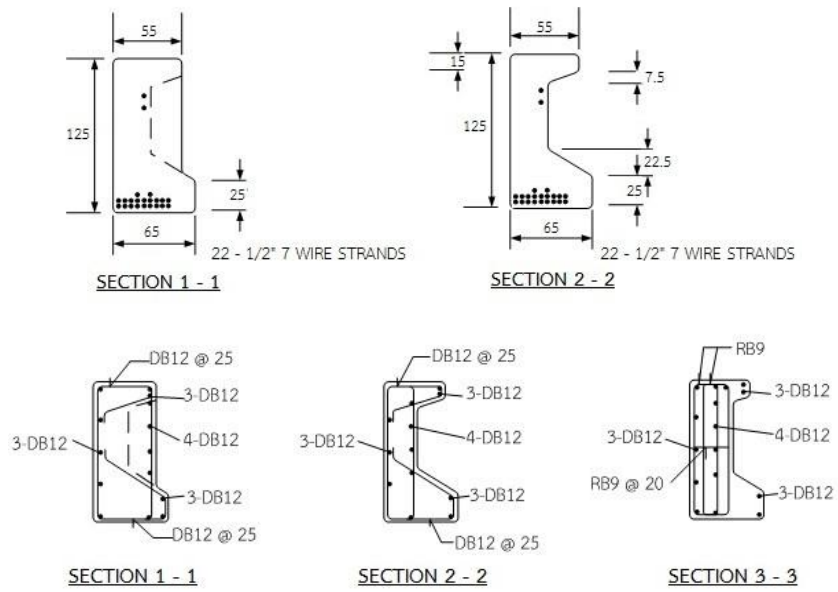


รูปที่ 4.1 รูปแบบหน้าตัดของสะพานตามแบบก่อสร้างสะพานทั้งโครงข่าย

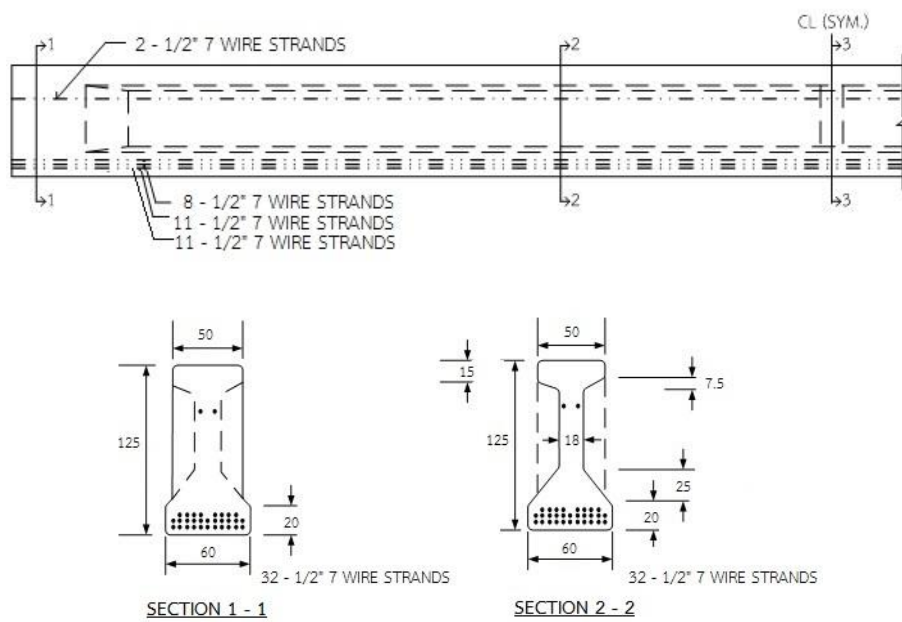


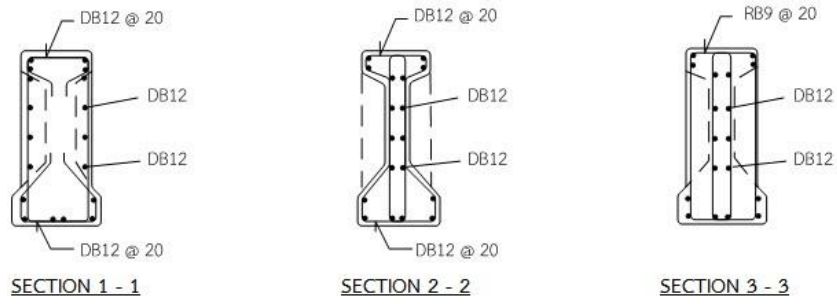
รูปที่ 4.2 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 15 เมตร



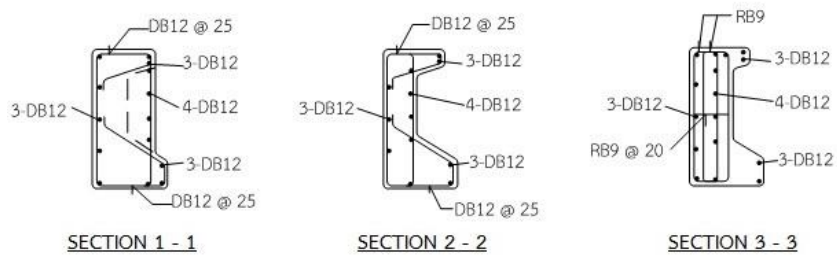
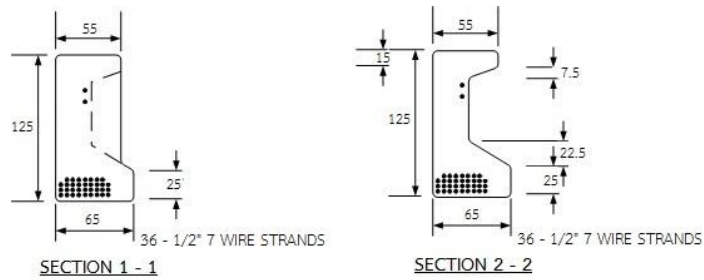
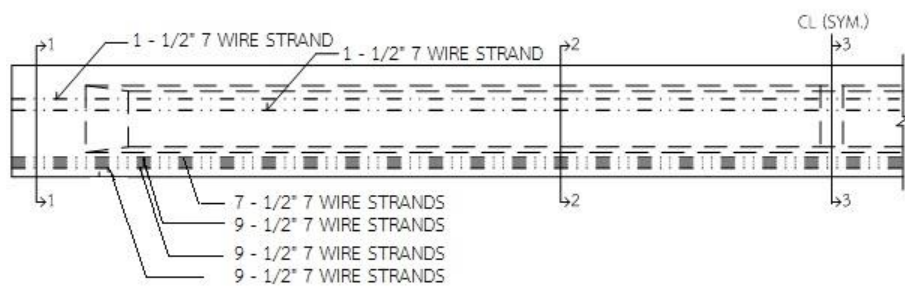


รูปที่ 4.3 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวซีที่ช่วงพาดสะพาน 15 เมตร

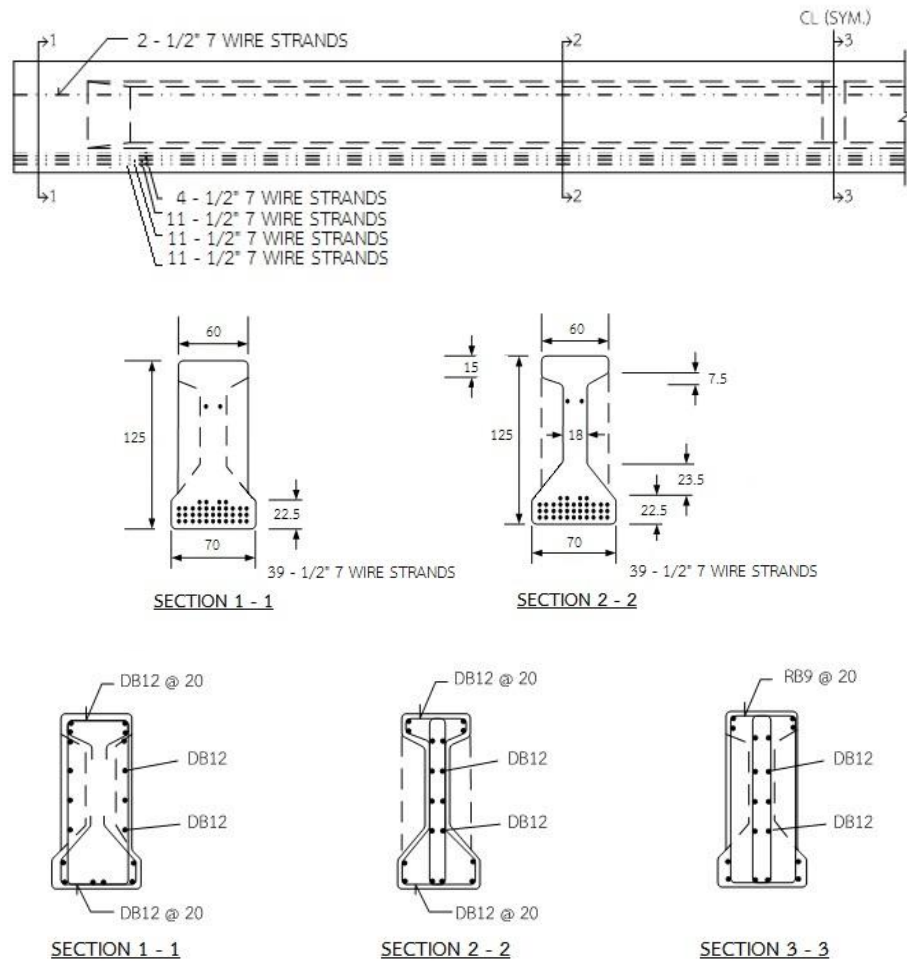




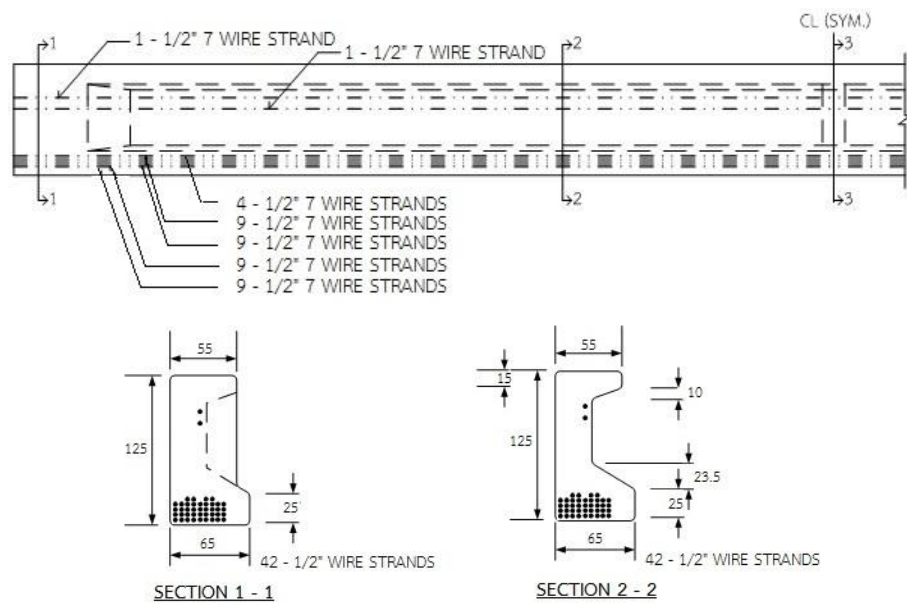
รูปที่ 4.4 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 20เมตร

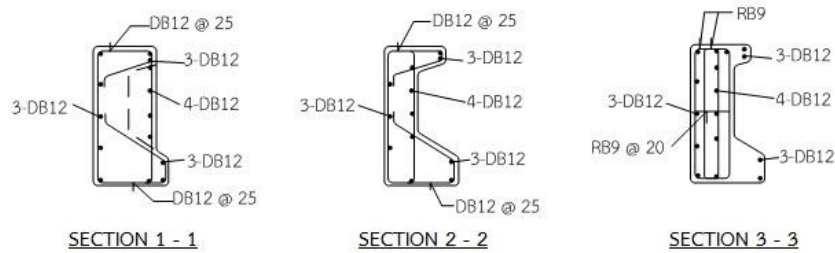


รูปที่ 4.5 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวซีที่ช่วงพาดสะพาน 20เมตร



รูปที่ 4.6 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 22 เมตร





รูปที่ 4.7 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวซีที่ช่วงพาดสะพาน 22 เมตร

#### 4.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพาน (Dead load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานเป็นส่วนหนึ่งของพารามิเตอร์สำหรับการพิจารณาความสามารถต้านทานของสะพาน เนื่องจาก ส่วนต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่รับได้ของสะพานและน้ำหนักบรรทุกคงที่ จะได้น้ำหนักบรรทุกจรที่สะพานสามารถรองรับน้ำหนักเพิ่มในส่วนต่างนี้ได้ จึงเป็นผลให้จำเป็นต้องลดน้ำหนักของระบบของโครงสร้างสะพานส่วนบนทั้งหมดโดยที่ สะพานยังสามารถรองรับการใช้งานตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงออกแบบไว้

พารามิเตอร์ที่สำคัญในส่วนของน้ำหนักบรรทุกคงที่ มาตรฐาน AASHTO LRFR (มาตรฐานสำหรับการประเมินสะพาน) ได้กำหนดให้พิจารณา 4 ตัวแปรหลักดังนี้คือ

1. ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด ( $\overline{DL}$ )
2. ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างประกอบ ( $\overline{D_{C1}}$ )
3. ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างคอนกรีตหล่อในที่ ( $\overline{D_{C2}}$ )
4. ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกคงที่ของวัสดุพื้นผิว ( $\overline{D_w}$ )

ดังนั้น ผลรวมของค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกคงที่คือ

$$\overline{DL} = \overline{D_{C1}} + \overline{D_{C2}} + \overline{D_w} \quad (4.1)$$

การพิจารณาพารามิเตอร์น้ำหนักบรรทุกคงที่จะพิจารณาแบบน้ำหนักบรรทุกแผ่ต่อความยาวสะพานโดยอ้างอิงจากแบบก่อสร้างที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.7 ตามแต่ละประเภทของชิ้นส่วนสะพานและช่วงความยาวสะพาน

อย่างไรก็ดีในงานก่อสร้างไม่เพียงแต่สะพานที่พิจารณาในสายทาง แต่เป็นสิ่งปลูกสร้างทุกประเภท มักจะมีความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลให้การสร้างไม่ได้เป็นไปตามแบบร้อยเปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ จึงต้องพิจารณาความแปรปรวนด้านขนาดและมิติของโครงสร้าง อีกทั้งความแปรปรวนทางด้านน้ำหนัก ซึ่งทุกปัจจัยมีผลให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่ไว้วิเคราะห์ในขั้นตอนของการออกแบบต้องปรับค่าด้วยตัวคูณค่าความคลาดเคลื่อน (Bias Factor ( $\lambda_{DL}$ ))

$$\overline{D_{C1}} = \lambda_{D_{C1}} D_{C1} \quad (4.2)$$

$$\overline{D_{C2}} = \lambda_{D_{C2}} D_{C2} \quad (4.3)$$

$$\overline{D_W} = \lambda_W D_W \quad (4.4)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่จึงเป็นผลรวมของส่วนเบี่ยงเบนทั้ง 3 องค์ประกอบคือ

1. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ทั้งหมด ( $\sigma_{DL}$ )
2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างประกอบ ( $\sigma_{D_{C1}}$ )
3. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของโครงสร้างคอนกรีตหล่อในที่ ( $\sigma_{D_{C2}}$ )
4. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของวัสดุพื้นผิว ( $\sigma_{D_W}$ )

ดังนั้น ผลรวมของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่คือ

$$\sigma_{DL} = \sqrt{\sigma_{D_{C1}}^2 + \sigma_{D_{C2}}^2 + \sigma_{D_W}^2} \quad (4.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation) คือ

$$V_{DL} = \frac{\sigma_{DL}}{DL} \quad (4.6)$$

ทั้งนี้เนื่องจากกรมทางหลวงไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ที่ใช้งานในประเทศไทย ในงานวิจัยจึงเลือกใช้ค่าที่แนะนำของ Nowak (1999) ที่ได้เก็บสำรวจข้อมูลสะพานในประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่, ค่าความคลาดเคลื่อนของหน่วยน้ำหนัก และค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดและมิติในโครงสร้างสะพานโดยใช้สมมติฐานการแจกแจงความน่าจะเป็นที่น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เป็นการแจกแจงแบบปกติ ดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ทางสถิติของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่

ส่วนประกอบของโครงสร้าง	ตัวคูณค่าความคลาดเคลื่อน ( $\lambda_{DL}$ )	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับสัมประสิทธิ์ความแปรผัน ( $V_{DL}$ )
ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของชิ้นส่วนโครงสร้างประกอบ ( $\overline{D_{C1}}$ )	1.03	0.08
ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ของโครงสร้างคอนกรีตหล่อในที่ ( $\overline{D_{C2}}$ )	1.05	0.10

ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกคงที่ของวัสดุพื้นผิว ( $\overline{D}_W$ )	1.00	0.25
--	------	------

#### 4.1.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน

ความสามารถในการรับกำลังชิ้นส่วนโครงสร้าง (Nominal resistance) ขึ้นอยู่กับความต้านทานของชิ้นส่วนที่มีความปลอดภัยน้อยที่สุดของสะพานหรือที่ชิ้นส่วนวิกฤตซึ่งต้องได้รับการตรวจสอบทั้งในขั้นตอนก่อนการก่อสร้างและขั้นตอนของการประเมินโครงสร้างสะพานโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO LRFR ซึ่งความต้านทานที่พิจารณา จะเป็นความต้านทานขั้นต่ำของชิ้นส่วนสะพานโดยมีผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load factor) รวมกับน้ำหนักบรรทุกจรจากมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินคูณด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร (Live load factor) รวมถึงการพิจารณาสภาพของการใช้งานผ่านค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพาน (Condition factor) ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 3 (การตรวจวัดสะพานและการประเมินความถูกต้องของการหาน้ำหนัก)

$$\phi R_n = \gamma_D D + \gamma_L L_n \quad (4.7)$$

โดยที่

$\phi$	=	ตัวคูณลดกำลังสำหรับโครงสร้างสะพาน (Resistance factor)
$R_n$	=	กำลังต้านทานของสะพาน (Nominal component resistance)
$\gamma_D$	=	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load factor)
$D$	=	น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Nominal dead load effect)
$\gamma_L$	=	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร (Live load effect)
$L_n$	=	น้ำหนักบรรทุกจรจากมาตรฐานรถบรรทุกสำหรับการประเมินรวมผลจากการกระแทกทางพลศาสตร์ ( $\overline{IM} = 1.33$ )

การพิจารณาค่าความต้านทานของสะพานสามารถพิจารณาด้วยอีกวิธีหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (4.8) ที่เรียกว่า Rating factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความสามารถต้านทานของสะพานส่วนด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกการใช้งาน ที่อ้างอิงจาก AASHTO LRFD (2007) และ AASHTO LRFR (2011) โดยมีตัวแปรสำคัญคือ ตัวคูณลดกำลังสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพาน (Condition factor) และ ตัวคูณลดสำหรับระบบโครงสร้างสะพานส่วนบน (System factor)



$$RF = \frac{\phi_C \phi_S R_n - (\gamma_{D_C})(D_C) - (\gamma_{D_W})(D_W)}{(\gamma_L)(LL + IM)} \quad (4.8)$$

โดยที่

- $\phi_C$  = ตัวคูณลดสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพาน (Condition factor)
- $\phi_S$  = ตัวคูณลดสำหรับระบบโครงสร้างสะพานส่วนบน (System factor)
- $R_n$  = กำลังต้านทานของสะพาน (Nominal component resistance)
- $\gamma_{DC}$  = ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ของชิ้นส่วนโครงสร้าง (LRFD load factor for structural component and attachments)
- $\gamma_{DW}$  = ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ของวัสดุพื้นผิว (LRFD load factor for wearing surfaces and utilities)
- $\overline{D}_w$  = น้ำหนักบรรทุกคงที่ของวัสดุพื้นผิว (Dead load effect due to wearing surface and utilities)
- $\gamma_L$  = ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร (Live load factor)
- $LL$  = น้ำหนักบรรทุกจร (Live load effect)
- $IM$  = ตัวประกอบการกระแทก (Dynamic load allowance)

เนื่องจากค่ากำลังวัสดุที่กำหนด (Nominal value) และกำลังวัสดุจริงจากการทดสอบ (Mean value) มีความแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้ความต้านทานทั้งโมเมนต์และแรงเฉือนของสะพาน มีความแปรปรวนตามกำลังวัสดุ ค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณาคือ ตัวแปรปรับแก้ความคลาดเคลื่อน (Bias factor)

$$\lambda = \frac{\text{mean}}{\text{nominal}} \quad (4.9)$$

ข้อมูลทางสถิติของกำลังวัสดุที่ใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO LRFD นั้นอาจมีความไม่สอดคล้องกับข้อมูลทางสถิติของกำลังวัสดุในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวแปรปรับแก้ความคลาดเคลื่อนสำหรับความต้านทานในประเทศไทย โดยอ้างอิงจากการผลการทดสอบของกรมทางหลวง (ราชวัลลภ กัมพูพงศ์" 2013) ที่มีการรวบรวมข้อมูลกำลังวัสดุดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหล่อในที่ จากการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่พื้นสะพาน 80 ตัวอย่างและตอม่อสะพาน 120 ตัวอย่าง

2. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอัดแรง จากการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบจากโรงงานจำหน่ายคอนกรีตผสมเสร็จและจากห้องปฏิบัติการของสถาบันการศึกษาที่มีความน่าเชื่อถือ (CPAC, Lab KU)
3. กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมและลวดอัดแรงจากห้องปฏิบัติการของสถาบันการศึกษา (Lab AIT)

โดยพิจารณาข้อมูลการทดสอบวัสดุ เช่น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และกำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง โดยนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางสถิติแบบตัวแปรสุ่ม (Simulation random variable) ของกำลังรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนจากกำลังวัสดุที่ระบุตามแบบมาตรฐานการก่อสร้างของกรมทางหลวง (Normal value) และข้อมูลการวิเคราะห์ความต้านทานของสะพานจริง (Mean value) ของหน้าตัดสะพาน 31 แห่งในประเทศไทย

สำหรับสะพานที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นระบบโครงสร้างส่วนบนแบบสะพานคอนกรีตอัดแรงระบบคานหลักรูปตัวไอ โดยการตรวจวัดของกรมทางหลวงสามารถแบ่งข้อมูลได้เป็น 13 แห่งจากการตรวจวัดสะพาน 31 แห่ง ซึ่งในที่นี้จะแสดงข้อมูลเฉพาะของระบบสะพานคอนกรีตอัดแรงระบบคานหลักรูปตัวไอเท่านั้น

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากการตรวจวัดสะพานคอนกรีตอัดแรงระบบคานหลักรูปตัวไอ

ลำดับ	สำนักบำรุงทาง	ทางหลวงหมายเลข	กิโลเมตร	ชื่อสะพาน	ช่วงพาดสะพาน (เมตร)	โมเมนต์ดัด		แรงเฉือน	
						$\lambda$	$V$	$\lambda$	$V$
1	ตาก	1	520+550 LT	กิตติขจร LT	50.00	1.01	0.03	1.08	0.08
2	ตาก	1	520+550 RT	กิตติขจร LT	50.00	1.08	0.02	1.11	0.08
3	นครราชสีมา	2	160+728 LT	ข้ามทางรถไฟนครราชสีมา	15.00	1.08	0.02	1.18	0.11
4	ขอนแก่น	2	371+124 LT	ข้ามทางรถไฟขอนแก่น	35.00	1.01	0.03	1.22	0.09
5	ขอนแก่น	2	31+249 LT	น้ำพองเก่า	15.00	1.08	0.02	1.11	0.07
6	ชลบุรี	3	137+628	ข้ามแยกกระทิงลาย	25.00	1.01	0.03	1.23	0.09

7	ระยอง	3	191+508 LT	ข้ามทาง รถไฟระยอง	18.00	1.08	0.02	1.26	0.09
8	ระยอง	36	54+326 LT	ต่างระดับ ชลบุรี	25.00	1.01	0.03	1.24	0.10
9	ราชบุรี	4	80+617 LT	ต่างระดับ แยกบางแพ	26.50	1.01	0.03	1.23	0.10
10	ราชบุรี	4	100+000 LT	ต่างระดับ (บึกซี)	18.00	1.08	0.02	1.26	0.09
11	ราชบุรี	4	100+600 LT	สิริลักษณ์	15.00	1.08	0.02	1.11	0.70
12	อยุธยา	32	34+100 LT	ต่างระดับ บางปะหัน	20.00	1.08	0.02	1.27	0.10
13	อยุธยา	32	52+194 LT	คลองบาง แก้ว	30.50	1.01	0.03	1.21	0.09

ผลตรวจวัดของกรมทางหลวงพบว่า การพิจารณาเลือกใช้ค่าตัวแปรปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ( $\lambda$ ) น่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่อ้างอิงจาก Nowak (1999) เนื่องจากข้อมูลค่าตัวแปรปรับแก้ความคลาดเคลื่อนความต้านทานของสะพานมีความสอดคล้องกับสะพานที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทยโดยอ้างอิงจากผลการทดสอบของกรมทางหลวงที่น่าเชื่อถือ แต่อย่างไรก็ดี ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน (Coefficient of Variation) ไม่ควรนำผลการศึกษาของกรมทางหลวงมาใช้ เนื่องจากอาจมีความไม่เหมาะสมจากจำนวนการเก็บตัวอย่างกำลังวัสดุที่น้อย และไม่เพียงพอ ซึ่งพารามิเตอร์ของค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบนขึ้นกับจำนวนการเก็บตัวอย่างข้อมูลเป็นสำคัญ

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้ค่า  $\lambda$  ที่ได้จากข้อมูลการศึกษาของกรมทางหลวงเป็นสำคัญ และพิจารณาใช้ค่า  $V$  จากข้อมูลการศึกษาของ Nowak (1999) ที่มีการเก็บข้อมูลกำลังวัสดุสะพานเป็นจำนวนมากในประเทศสหรัฐอเมริกา

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับความต้านทานของสะพานที่เลือกใช้ในงานวิจัย

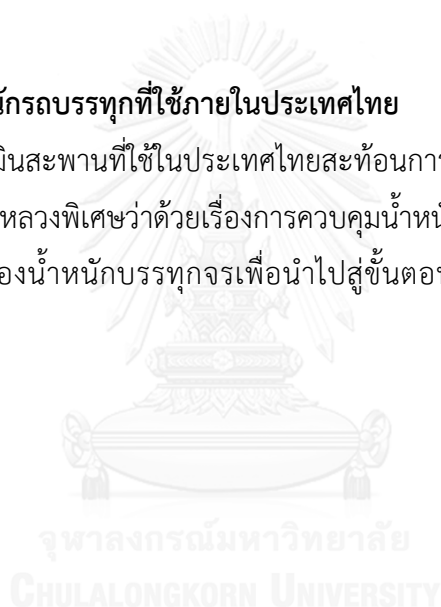
ค่าตัวแปรปรับแก้ความคลาดเคลื่อน		ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน	
$\lambda_R$		$V_R$	
โมเมนต์ดัด	แรงเฉือน	โมเมนต์ดัด	แรงเฉือน
1.05	1.19	0.075	0.14

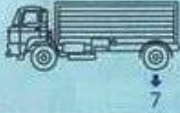
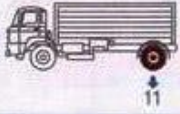

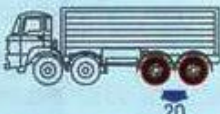
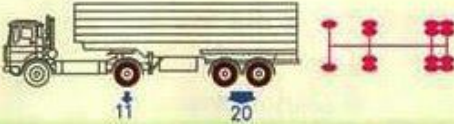

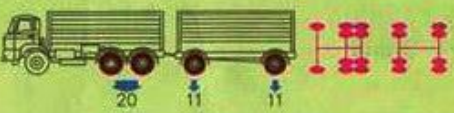
## 4.2 แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจร (Live load model)

การประเมินสะพานในสายทางที่ตรวจวัด จะต้องทำการตรวจสอบการใช้งานของรถบรรทุกในหลายๆกรณีที่มีโอกาสทำให้สะพานเกิดความเสียหายสูงสุด ซึ่งในที่นี้จึงต้องมีการตรวจสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL – 93 ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบสะพาน รวมถึงการตรวจสอบรถบรรทุกตามพิกัดกฎหมายที่ใช้ในประเทศไทย โดยจะคัดเลือกเฉพาะรถบรรทุกที่ใช้งานเป็นหลักในสายทางเช่น รถบรรทุกสิบล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วง และรถบรรทุกพ่วง ผลจากการวิเคราะห์จะสามารถตรวจสอบแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานตามแต่ละกรณี เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสะพานจะสามารถรองรับการใช้งานได้อย่างปลอดภัยทุกกรณี

### 4.2.1 ข้อกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ภายในประเทศไทย

เพื่อให้การประเมินสะพานที่ใช้ในประเทศไทยสะท้อนการใช้งานจริง จึงต้องอาศัยข้อมูลตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษว่าด้วยเรื่องการควบคุมน้ำหนักการใช้งานของยานยนต์เป็นหลักอ้างอิงสำคัญในการจำลองน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการปรับเทียบตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก



ลำดับ	ในประเภท	ลักษณะยานพาหนะ Vehicle type	น้ำหนักกรวด ( ตัน ) Gross Weight ( ton )
1	11		2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 4 เส้น (2 เพลา 4 เส้น) 9.50 ตัน
2	12(2)		2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 6 เส้น (2 เพลา 6 เส้น) 15 ตัน
3	15		3 เพลา 6 ล้อ ใช้ยาง 10 เส้น (3 เพลา 10 เส้น) 25 ตัน
4	18		4 เพลา 8 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (4 เพลา 12 เส้น) 30 ตัน
5	12(2) + 19(4)		รถกึ่งพ่วง 2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (4 เพลา 14 เส้น) 35 ตัน
6	15 + 19(4)		รถกึ่งพ่วง 2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (5 เพลา 18 เส้น) 45 ตัน
7	15 + 20(2)		รถพ่วง 2 เพลา 4 ล้อ ใช้ยาง 8 เส้น (5 เพลา 18 เส้น) 47 ตัน

รูปที่ 4.8 เล่ม 122 ตอนพิเศษ 150 ง ราชกิจจานุเบกษา 28 ธันวาคม 2548

ลำดับ	ใบประกาศ	ลักษณะยานพาหนะ Vehicle type	น้ำหนักบรรทุก ( ตัน )				
			เส้นทางสาย 1.1A-49	เส้นทางสาย 1.1A-53	เส้นทางสาย 1.1A-56	เส้นทางสาย 1.1A-58	
1	19/2	 KING PIN > 8.00 M. 20 25.5	รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ตี	50.5	50.5	-	-
2	19/3(1)	จดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553  KING PIN 7.00 TO < 8.00 M. 20	รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ตี	50.5 (ผ่อนผัน)	50.5	-	49
3	19/3(2)	จดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553  KING PIN 8.00 TO < 7.00 M. 20	รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ตี	50.5 (ผ่อนผัน)	50.5	-	47
4	19/3(3)	จดทะเบียนก่อน 1 มกราคม 2553  KING PIN 4.50 TO < 6.00 M. 20	รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ตี	50.5 (ผ่อนผัน)	50.5	-	45
5	19/4	 KING PIN > 8.00 M. 20	รถกึ่งพ่วง 7 เพลา 24 ตี	55.5	50.5	-	-
6	20/1	 > 9.75 M. 20 10 18	รถพ่วง 6 เพลา 22 ตี	53 (ผ่อนผัน)	53 (1 ก. 52)	53 (1 ก. 56 - 31 ก. 56)	-
7	20/2	 > 9.75 M. 20	รถพ่วง 7 เพลา 24 ตี	58 (1 ก. 57 - 31 ก. 54)	58 (1 ก. 55 - 31 ก. 55)	58 (1 ก. 56 - 31 ก. 58)	-
8	จากประกาศ (ฉบับที่ 1) 18+20(2)	 >= 30 M. 20 11 11	รถพ่วง 6 เพลา 20 ตี	52	52	52 (1 ก. 56 - 31 ก. 56)	-
9	20/3	ยานพาหนะชนิดรถพ่วงและรถพ่วง (FULL TRAILER) ยานพาหนะประเภทที่ต่อรถบรรทุกจากฐานรถพ่วงของรถ - ยานพาหนะที่ขนส่งสิ่งของจำนวนมากหรือของเหลว ซึ่งโดยสภาพจะต้องมีใบลากแยกหากันได้โดยเป็นกรณีของรถพ่วง - ยานพาหนะที่ติดตั้ง เครื่องจักร เครื่องยนต์ - ยานพาหนะที่โดยสภาพมีลักษณะเป็น เครื่องจักร เครื่องยนต์		-	53 (1 ก. 52)	50.5	-
หมายเหตุ		- ยานพาหนะชนิดรถพ่วงและรถพ่วงที่ติดตั้งเครื่องจักร เครื่องยนต์ ใบลากแยกจากฐานรถพ่วง ไม่เป็นประเภทที่ขึ้นรถพ่วงของรถพ่วง					

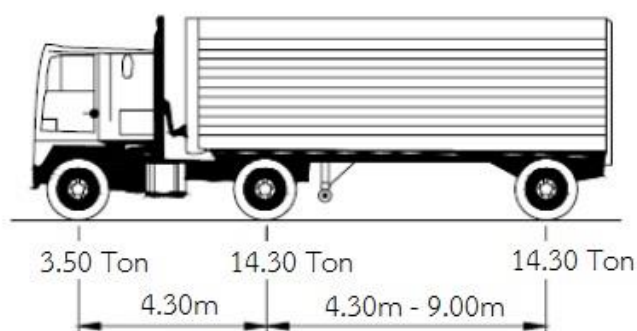
รูปที่ 4.9 เล่ม 126 ตอนพิเศษ 92 ง ราชกิจจานุเบกษา 30 มิถุนายน 2552

#### 4.2.2 มาตรฐานน้ำหนักบรรทุกจร HL - 93

เนื่องจากสะพานที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่ ออกแบบด้วยมาตรฐาน AASHTO LRFD (HL - 93) ซึ่งเพื่อให้การวิเคราะห์มีความครอบคลุมการประเมินสะพานที่ใช้ในประเทศไทย จึงต้อง

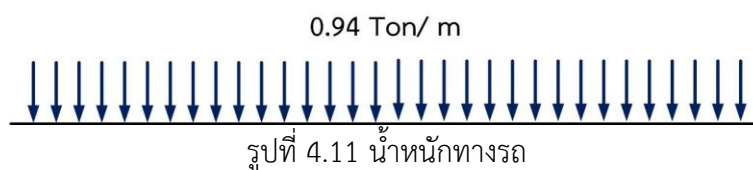
คำนึงถึงผลการวิเคราะห์ตามมาตรฐานน้ำหนักบรรทุกจร HL - 93 สำหรับการประเมินแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจรมาตรฐาน HL - 93 ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วนได้แก่

1. น้ำหนักบรรทุกจรมาตรฐาน HS20 - 44 - น้ำหนักรถถึงพ่วง 3 เพลา น้ำหนักบรรทุกรวม 32.10 ตันแบ่งเป็นน้ำหนักลงเพลาหน้า 3.50 ตัน เพลากลาง 14.30 ตันและเพลาหลัง 14.30 ตัน ความกว้างเพลา 1.8 เมตร โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเพลาหน้าและเพลากลางเท่ากับ 4.3 เมตร และระยะห่างระหว่างเพลากลางและเพลาหลังมีค่าได้ตั้งแต่ 4.3 ถึง 9 เมตร โดยเลือกใช้ค่าที่ทำให้เกิดแรงภายในจากน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุด

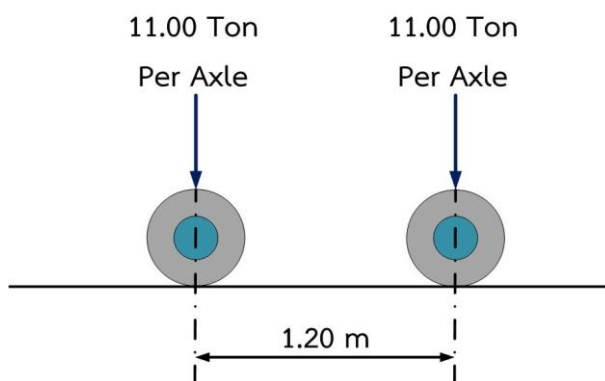


รูปที่ 4.10 น้ำหนักบรรทุกจรมาตรฐาน HS20 - 44

2. น้ำหนักทางรถ (Lane load) - น้ำหนักแผ่เทียบเท่าขนาด 0.94 ตันต่อเมตร



3. น้ำหนักบรรทุกจรช่วงเพลาสั้น (Tandem load) น้ำหนักของเพลาคู่โดยแบ่งน้ำหนักเพลาละเท่าๆกันที่ 11 ตัน ความกว้างเพลาเท่ากับ 1.8 เมตรและระยะห่างระหว่างเพลาเท่ากับ 1.2 เมตร



รูปที่ 4.12 น้ำหนักรถบรรทุกช่วงเพลาสั้น

ค่าที่ใช้สำหรับการประเมิน จะพิจารณาเลือกใช้ค่าที่สูงสุดระหว่างน้ำหนักรถบรรทุกมาตรฐาน HS20 – 44 หรือค่าที่ได้จากน้ำหนักรถบรรทุกช่วงเพลาสั้น (Tandem load) เพื่อนำไปรวมกับผลจากการคำนวณน้ำหนักทางรถ (Lane load) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

1. น้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน HS20-44 รวมกับน้ำหนักทางรถ (Lane load)
2. น้ำหนักรถบรรทุกช่วงเพลาสั้น (Tandem) รวมกับ น้ำหนักทางรถ (Lane load)

สำหรับงานวิจัยนี้จะเสนอแบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสะพานด้วยวิธี AASHTO LRFR ของสะพานในโครงข่าย โดยเลือกใช้ทั้งมาตรฐานรถบรรทุกสำหรับประเทศไทย และรถบรรทุกตามมาตรฐาน HL - 93 เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าการประเมินจะครอบคลุมความปลอดภัยในทุกกรณี

#### 4.2.3 ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก (Distribution factor)

การวิเคราะห์ความปลอดภัยของสะพานนั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อชิ้นส่วนโครงสร้างวิกฤติ ในกรณีของงานวิจัยนี้เป็นระบบคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอซึ่งมีชิ้นส่วนคานหลักที่ต้องพิจารณาเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานสะพานซึ่งการวิเคราะห์จะพิจารณาที่ผลกระทบต่อหนึ่งช่องจราจรหรือสองช่องจราจรเป็นสำคัญ จึงต้องกระจายน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวไปสู่ชิ้นส่วนวิกฤติด้วยพารามิเตอร์ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก (Distribution factor,  $\overline{DF}$ ) ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ดังนี้

สำหรับหาโมเมนต์จากผลของน้ำหนักบรรทุกจรหนึ่งช่องจราจร

$$\overline{DF} = 0.06 + \left( \frac{S}{4300} \right)^{0.4} \left( \frac{S}{L} \right)^{0.3} \left( \frac{K_g}{Lr_s^3} \right)^{0.1} \quad (4.10)$$

สำหรับหาโมเมนต์จากผลของน้ำหนักบรรทุกจรสองช่องจราจร



$$\overline{DF} = 0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{Lt_s^3}\right)^{0.1} \quad (4.11)$$

สำหรับหาแรงเฉือนจากผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรหนึ่งช่องจราจร

$$\overline{DF} = 0.36 + \frac{S}{7600} \quad (4.12)$$

สำหรับหาแรงเฉือนจากผลของน้ำหนักบรรทุกทุกจรสองช่องจราจร

$$\overline{DF} = 0.2 + \frac{S}{3600} - \left(\frac{S}{10700}\right)^2 \quad (4.13)$$

โดยที่

$\overline{DF}$	=	ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก (lane)
$S$	=	ระยะห่างระหว่างคาน (mm)
$L$	=	ความยาวช่วงสะพาน (mm)
$K_g$	=	สติฟเนสของคานหลักตามแนวยาว (mm <sup>4</sup> )
$t_s$	=	ความหนาของแผ่นพื้น (mm)

ทั้งนี้พจน์  $\left(\frac{K_g}{Lt_s^3}\right)$  สามารถแทนค่าเป็น 1.0 ตามข้อแนะนำของ AASHTO LRFD 2007

#### 4.2.4 ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (ADTT)

ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (ADTT average daily truck traffic) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดตลอดอายุการใช้งานสะพานที่ 75 ปี (สำหรับการออกแบบ) และที่ 5 ปี (สำหรับการประเมิน) ซึ่งปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันมีค่ามากหรือน้อยนั้นมีผลจากปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ตำแหน่งของสายทางที่ทำการพิจารณา – เนื่องจากผู้ใช้งานในสายทาง จำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อการเดินทางในระบบขนส่งตามเส้นทางหลวงเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จึงสามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่า ทางหลวงพิเศษในโครงข่าย จะเป็นตำแหน่งที่มีการใช้เวลายานมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการสัญจรภายในตัวเมืองที่มีการจราจรติดขัด

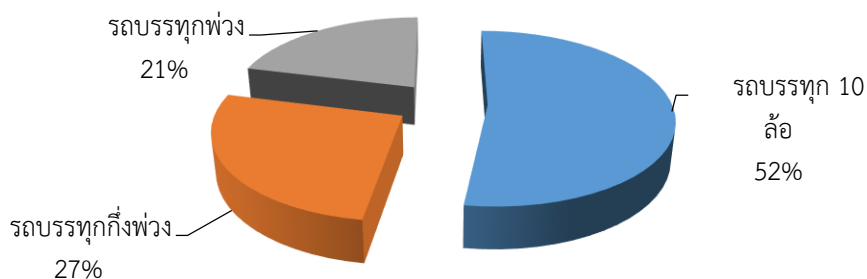
2. เวลา – เนื่องจากปริมาณการใช้งานในสายทางขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่สัญจร หากพิจารณาในช่วงแคบๆ การใช้งานในช่วงเวลา 1 สัปดาห์ ปริมาณการจราจรน่าจะมากที่สุดระหว่างวันจันทร์ ถึงวันศุกร์ และปริมาณการจราจรจะลดน้อยลงระหว่างวันเสาร์ ถึงวันอาทิตย์ และหากพิจารณาในช่วงที่กว้างขึ้น เช่น พิจารณาในแต่ละฤดูกาล ซึ่งการใช้งานในแต่ละฤดูกาล อาจมีปริมาณการใช้งานที่ไม่เท่ากัน

ดังนั้น หากการเก็บข้อมูลด้วยระยะเวลาอันสั้น ข้อมูลที่ได้อาจมีความถูกต้องเพียงบางส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงข้อมูลปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันจากสำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลปริมาณจราจรเฉลี่ย คัน / วัน บนทางหลวงสาย 9 ตอนควบคุมที่ 100 สายทาง: พระประแดง, แขวงการทาง: สำนักบำรุงทางธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ปี	รถบรรทุก 10 ล้อ (คัน)	สัดส่วน (%)	รถบรรทุกกึ่งพ่วง (คัน)	สัดส่วน (%)	รถบรรทุกพ่วง (คัน)	สัดส่วน (%)	ADTT รวม (คัน)
2556	3,767	48	2,566	33	1,524	19	7,857
2555	3,066	47	1,992	30	1,489	23	6,547
2554	5,178	54	2,062	22	2,263	24	9,503
2553	5,269	54	2,296	23	2,207	23	9,772
2552	4,302	53	2,228	28	1,537	19	8,067
2551	5,318	51	2,852	28	2,169	21	10,339
2550	4,646	59	1,767	22	1,513	19	7,926
รวม	31,546	52	15,763	27	12,702	21	60,011
เฉลี่ย							8,573

ข้อมูลสัดส่วนของรถบรรทุกบนทางหลวงสาย 9 (ปริมาณจราจรเฉลี่ย คัน / วัน)



รูปที่ 4.13 ข้อมูลสัดส่วนรถบรรทุกบนทางหลวงสาย 9

มาตรฐาน AASHTO LRFR (2011) แบ่งประเภทของความหนาแน่นปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันเป็น 3 ระดับ คือ

1.  $ADTT \geq 5,000$  (ความหนาแน่นจราจรสูง)
2.  $ADTT = 1,000$  (ความหนาแน่นจราจรปานกลาง)
3.  $ADTT \leq 100$  (ความหนาแน่นจราจรต่ำ)

ดังนั้น ความหนาแน่นปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันบนทางหลวงสาย 9 นี้ จึงเป็นสายทางที่มีการสัญจรของยานพาหนะที่สูง ซึ่งเมื่อคิดเป็นสัดส่วนต่อความหนาแน่นจราจรที่อ้างอิงจาก AASHTO LRFR นี้ มีค่าสูงถึง 71% ของ ADTT ที่ 5,000 และหากเปรียบเทียบผลการศึกษาคความหนาแน่นปริมาณการจราจรบางแห่งในประเทศไทย (การศึกษาพิภักดีน้ำหนักรถบรรทุกวิทยาลัยโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน มหาวิทยาลัยนเรศวร, กรมทางหลวง 2556) พบว่าสายทางบางแห่งมีค่า ADTT สูงสุดถึง 4000 คันต่อช่องจราจรและมีค่าน้อยลงลดหลั่นกันไปตามความสำคัญของสายทาง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโครงข่ายทางหลวงสาย 9 เป็นเส้นทางที่รองรับการใช้งานสูงกว่าสายทางอื่นๆ ซึ่งเป็นเหตุให้ต้องมีการตรวจสอบการใช้งานอย่างละเอียดยิ่งขึ้นซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 4.4 (ผลของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง)

#### 4.2.5 ความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกันหลายคัน (Multiple presence)

ในปัจจุบันสะพานที่ใช้งานภายในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นสะพานที่รองรับการใช้งานของยานพาหนะมากกว่า 1 ช่องจราจรขึ้นไป จึงมีผลทำให้โอกาสของความน่าจะเป็นที่ยานพาหนะจะเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกันหลายคันภายในช่วงเวลาเดียวกันจึงแบ่งออกเป็นรถบรรทุกที่วิ่งอยู่บนช่องจราจรเดียวกันหรือช่องจราจรที่ติดกัน  $P_{SXS}$  (Percentage of side-by-side loading event) ทั้งนี้โอกาสของความน่าจะเป็นที่ยานพาหนะจะเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกันหลายคันจึงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Average daily truck traffic) โดยแบ่งสภาพความหนาแน่นการจราจรออกเป็น 3 ระดับดังนี้

1.  $ADTT \geq 5,000$  (ความหนาแน่นจราจรสูง)
2.  $ADTT = 1,000$  (ความหนาแน่นจราจรปานกลาง)
3.  $ADTT \leq 100$  (ความหนาแน่นจราจรต่ำ)

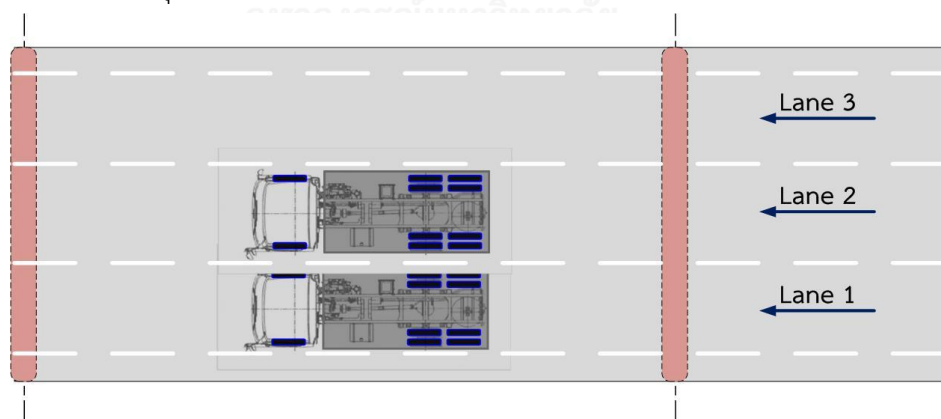
ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างมาตรฐานการแบ่งสัดส่วนของโอกาสความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกวิ่งพร้อมกันหลายคันแปรผันตามปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน

Traffic Volume	Light	Average	Heavy
NYS DOT LRFD classification	ADTT = 100	ADTT = 1000	ADTT = 5000
NYS DOT LRFD $P_{S \times S}$	0.5% of all trucks	1.25% of all truck	2% of all trucks
AASHTO LRFR classification	ADTT $\leq$ 100	ADTT = 1000	ADTT $\geq$ 5000
AASHTO LRFR $P_{S \times S}$	0.5% of heaviest 20% of trucks	1% of heaviest 20% trucks	6.67% of heaviest 20% of trucks

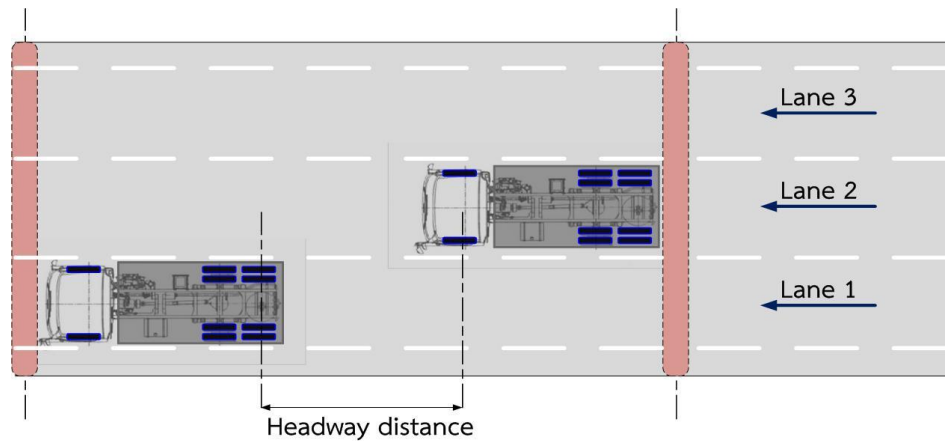
สำหรับงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงข้อมูลปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันจากกรมทางหลวงซึ่งได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.4 ดังนั้นจึงพิจารณาโอกาสของความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกหลายคันจะเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกัน  $P_{S \times S}$  เพียงหนึ่งค่าเท่านั้น

การจำแนกเหตุการณ์ที่รถบรรทุกจะวิ่งพร้อมกันหลายคันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

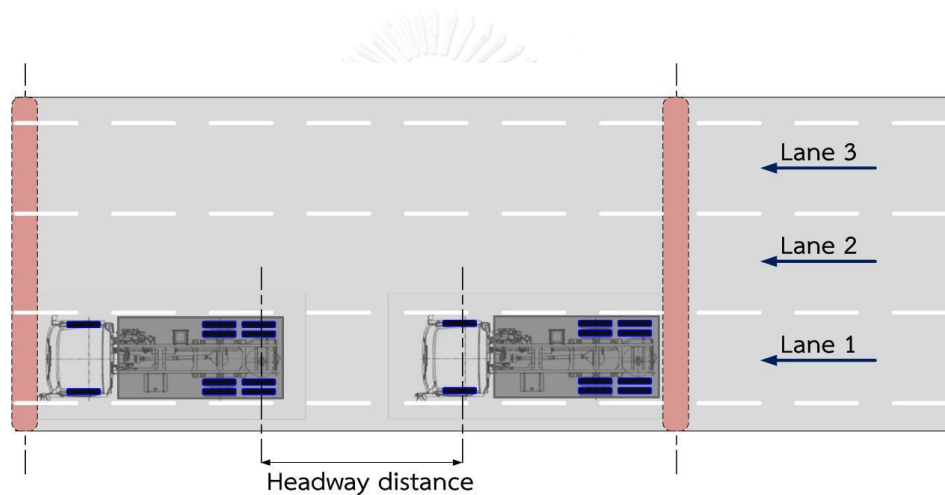
1. รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรที่ติดกันแบบชิดกัน (Two trucks in adjacent lane side-by-side)
2. รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรที่ติดกันแบบไม่ชิดกัน (Two trucks in adjacent lanes staggered)
3. รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรเดียวกัน (Two trucks in the same lane)



รูปที่ 4.14 รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรที่ติดกันแบบชิดกัน



รูปที่ 4.15 รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรที่ติดกันแบบไม่ชิดกัน



รูปที่ 4.16 รถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรเดียวกัน

เหตุการณ์ดังกล่าวจึงมีผลทำให้โครงสร้างสะพานต้องรองรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อายุการใช้งานของสะพานนั้นสั้นลง ดังนั้นการใช้งานรถบรรทุกภายในประเทศไทยจึงมีข้อกำหนดกฎหมายที่ควบคุมการใช้งานของรถบรรทุก ให้สามารถใช้เส้นทางจราจรซ้ายสุดเท่านั้น (ช่องจราจรที่ 1) และมีบางกรณีพบว่ารถบรรทุกมีการละเมิดใช้เส้นทางจราจรถัดมา (ช่องจราจรที่ 2 หรือช่องจราจรที่ 3) ซึ่งโอกาสของความน่าจะเป็นการใช้งานจะลดลงตามช่องจราจรที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาการจำลองการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพานในสายทางสำหรับ 1 ช่องจราจร และที่ 2 ช่องจราจรเท่านั้น

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์การจำลองน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ได้จากการสุ่มตรวจช่วงในระยะยาวด้วยการจำลองสะพาน 1 ช่องจราจร และมีรถบรรทุกสองคันเคลื่อนที่บนช่องจราจรเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ จะได้ข้อมูลของชนิด

รถบรรทุกทั้งสองชนิด ระยะห่างระหว่างเพลาสุดท้ายของรถบรรทุกคันแรกกับเพลารอกของรถบรรทุกคันที่สอง (Headway distance) รวมถึงค่าโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนสูงสุด และเนื่องจากสะพานในสายทางที่พิจารณามีช่วงความยาวสะพานสูงสุดที่ 22 เมตร การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ต่อเนื่อง เหตุการณ์จึงพิจารณาการเคลื่อนที่เรียงกันของรถบรรทุกเพียงสองคันเท่านั้น

สำหรับผลการวิเคราะห์สะพานที่ 2 ช่องจราจร อ้างอิงจาก (Moses 2001) เรื่องการทำนายผลน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดทั้ง 1 ช่องจราจร และ 2 ช่องจราจร (Extreme load events) โดยทำการคำนวณด้วยผลของการเก็บข้อมูลน้ำหนักบรรทุกจรระยะยาวที่ตรวจวัดจริง ตามสมการที่ 4.14 และสมการที่ 4.15

$$\overline{W}_{I_{max}} = \overline{W}_I + t_{(ADTT)} \sigma_{W_I} \quad (4.14)$$

$$\overline{W}_{T_{max}} = 2\overline{W}_I + t_{(ADTT)} \sqrt{2} \sigma_{W_I} \quad (4.15)$$

โดยที่

$\overline{W}_{I_{max}}$	=	ค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดจากการทำนายที่ 1 ช่องจราจร (Kips)
$\overline{W}_{T_{max}}$	=	ค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดจากการทำนายที่ 2 ช่องจราจร (Kips)
$\overline{W}_I$	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำหนักบรรทุกจรทั้งหมดที่ 1 ช่องจราจร (Kips)
$t_{(ADTT)}$	=	ค่าตัวคูณจากตาราง Standard normal distribution
$\sigma_{W_I}$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากการเก็บข้อมูลระยะยาว

ผลจากการคำนวณพบว่าทั้งค่าของน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดจากการทำนายที่ 1 ช่องจราจรและ 2 ช่องจราจร มีสัดส่วนคงที่เท่ากับ 1.30 เท่าจากผลการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่ 1 ช่องจราจร

ดังนั้นการจำลองวิเคราะห์รถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกันหลายคันในสายทางหลวงพิเศษช่วงบางขุนเทียน – สุขสวัสดิ์ จึงใช้การวิเคราะห์เพียง 1 ช่องจราจรเท่านั้น โดยมีข้อมูลรถบรรทุกวิ่งเรียงกันสองคันด้วยระยะห่างระหว่างเพลาสุดท้ายของรถบรรทุกคันแรกกับเพลารอกของรถบรรทุกคันที่สอง (Headway distance) มีระยะห่างตั้งแต่ 5 เมตร ถึง 15 เมตร และโอกาสของความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกวิ่งพร้อมกันหลายคันหากอ้างอิงด้วยมาตรฐาน AASHTO LRFR พบว่ามีค่า  $P_{S_{xS}}$  เท่ากับ 6.67% ในขณะที่ผลการศึกษาในประเทศไทยโดยกรมทางหลวงซึ่งอ้างอิงจากรายงานการตรวจวัดในภาคสนามจากโครงการทดสอบสะพานกรมทางหลวงภายใต้การกระตุ้นแบบพลวัตเนื่องจากการจราจรและแผ่นดินไหวเพื่อปรับปรุงการออกแบบและเสริมกำลัง (2013) บันทึกพฤติกรรมจราจรบนสะพานที่อยู่บนทางหลวงสายหลักของประเทศ ตลอดช่วงระยะเวลาทดสอบด้วยเครื่องบันทึกภาพระบบดิจิตอล (Digital Video Recorder) เป็นระยะเวลา 2 วัน วันละไม่ต่ำกว่า 4 ชั่วโมง

ต่อสะพาน โดยติดตั้งกล้องในตำแหน่งที่สามารถเก็บภาพได้ครอบคลุมช่วงความยาวสะพานทดสอบ ภายใต้การจราจรปกติจำนวนทั้งสิ้น 31 สะพานซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลพบว่ามีค่าเฉลี่ย  $P_{SXS}$  เท่ากับ 2.00%

#### 4.2.6 ตัวประกอบการกระทบทางพลศาสตร์ (Impact factor)

ในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบสะพานหรือการประเมินสะพานในสายทาง ค่าตัวประกอบการกระทบทางพลศาสตร์ เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ เนื่องจากสภาพพื้นผิวทางจราจรที่ใช้งานจริงทั้งสะพานในต่างประเทศรวมถึงสะพานในประเทศไทย ล้วนมีโอกาสที่ผิวทางไม่ได้มีความราบเรียบตลอดทั้งสาย ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ ค่าตัวประกอบการกระทบทางพลศาสตร์ จึงมีความเกี่ยวเนื่องกับสภาพพื้นผิวจราจรที่มีความขรุขระ รวมถึงความเร็วของยานพาหนะในสายทาง ประกอบกับผลเกี่ยวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้งาน โดยปัจจัยเหล่านี้ เป็นปัจจัยหลักสำคัญในการพิจารณาค่าตัวประกอบการกระทบทางพลศาสตร์

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งตัวแปรของค่าตัวประกอบการกระทบทางพลศาสตร์เป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ

1. น้ำหนักบรรทุกจรรวมผลทางพลศาสตร์สำหรับการออกแบบสะพาน ( $L_n$ )
2. น้ำหนักบรรทุกจรรวมผลทางพลศาสตร์สำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายที่ได้จากการตรวจวัดรถบรรทุกในประเทศไทย ( $\overline{LL}$ )

สำหรับน้ำหนักบรรทุกจรรวมผลทางพลศาสตร์สำหรับการออกแบบ ( $L_n$ ) เมื่อออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ที่สภาวะจำกัดกำลัง กำหนดให้ใช้ค่าตัวประกอบการกระทบเป็น 33% หรือเท่ากับ 1.33 คงที่ตลอดความยาวสะพาน ทำให้น้ำหนักบรรทุกจรรวมผลทางพลศาสตร์ที่ใช้ออกแบบสะพานคือน้ำหนักบรรทุกจร HL - 93 คูณด้วยตัวประกอบการกระทบ 1.33 แสดงด้วยสมการ 4.16 หรือการใช้น้ำหนักบรรทุกตามพิภักฎหมายไทยซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณาตามประเภทรถบรรทุกหลักๆคือ รถบรรทุกสิบล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วง และรถบรรทุกพ่วง แสดงด้วยสมการ 4.17 เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลของการปรับเทียบตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรต่อไป

$$L_n = LL_{HL93} \times \overline{IM} \quad (4.16)$$

$$L_n = LL_{Thai\_truck} \times \overline{IM} \quad (4.17)$$

โดยที่

$$L_n = \text{น้ำหนักบรรทุกจรรวมผลทางพลศาสตร์สำหรับการออกแบบ}$$

$$\begin{aligned}
 LL_{HL93} &= \text{น้ำหนักบรรทุกทุกจร HL - 93 (Ton)} \\
 LL_{Thai\_truck} &= \text{น้ำหนักบรรทุกทุกจรตามพิกัดกฎหมายประเทศไทย (Ton)} \\
 \overline{IM} &= \text{ตัวประกอบการกระแทกทางพลศาสตร์ (1.33)}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.7 ตัวประกอบการกระแทกสำหรับการออกแบบของ AASHTO LRFD

Component	$\overline{IM}$
Deck joints – All limit states	75%
All other components	
- Fatigue and Fracture Limit state	15%
- All other Limit state	33%

สำหรับการใช้ค่าตัวประกอบการกระแทกเพื่อประเมินสะพานในประเทศไทยด้วยมาตรฐาน AASHTO LRFR (อ้างอิงจาก LRFD อีกทางหนึ่ง) โดยใช้ค่า  $\overline{IM}$  เท่ากับ 1.33 ตามตารางที่ 4.7 อาจมีความไม่สอดคล้องและไม่เหมาะสมสำหรับการใช้ค่าดังกล่าวมาประเมินสะพานในประเทศไทย เนื่องจากตัวประกอบการกระแทกแปรผันตรงกับความเร็วรถบรรทุกและแปรผกผันกับน้ำหนักรวมรถบรรทุก ดังนั้นความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมการใช้งานของรถบรรทุกไทยและรถบรรทุกสหรัฐอเมริกา จึงมีความแตกต่างกัน ทั้งประเภทของรถบรรทุก รวมถึงคุณภาพของผิวทางจราจร, ประเภทของวัสดุและสภาพการจราจรซึ่งมีโอกาสส่งผลต่อพฤติกรรมการใช้ขูดยานและสายทาง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ ค่า  $\overline{IM} = 1.33$  จากมาตรฐาน AASHTO LRFD จึงอาจไม่สอดคล้องกับผลทางพลศาสตร์ของรถบรรทุกไทย

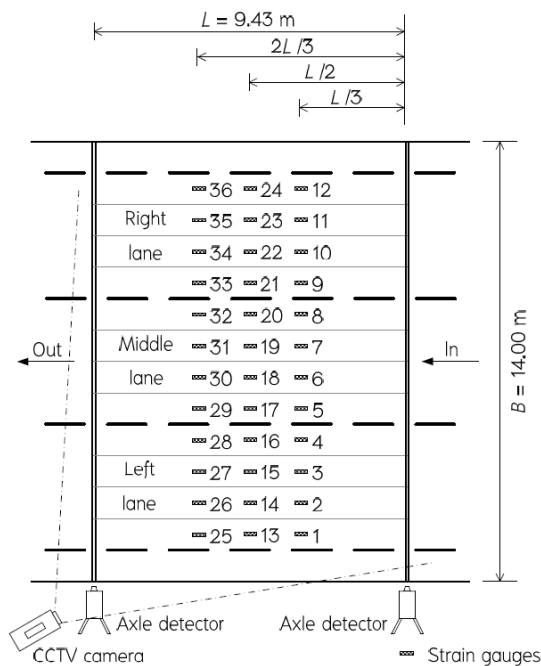
ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงอ้างอิงจากผลการวิจัยค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้ตรวจวัดสะพานในประเทศไทย โดยเป็นผลการศึกษาของ (เอกวิทย์ ชันแก้ว" 2012) โดยมีตำแหน่งของการทดสอบสะพานตั้งอยู่ที่วงแหวนตะวันตก กม.28+170.31 ข้ามคลองบางน้อย เขตบางแค กรุงเทพมหานคร

สำหรับขั้นตอนการศึกษา เป็นการพิจารณาเลือกช่วงองทำการตรวจวัดสะพาน โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่เป็นอุปกรณ์สำหรับการเก็บสัญญาณใน 3 ช่วงพาดสะพานคือ 1/3, 1/2 และ 2/3 ของความยาวสะพาน โดยในแต่ละช่วงพาดสะพาน มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด 12 ตัว รวมทั้งสิ้น 36 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และพิจารณาเฉพาะรถบรรทุกหนักที่มีน้ำหนักรวมมากกว่า 10 ตันขึ้นไป ผลจากการตรวจวัดข้อมูลสามารถตรวจวัดได้เป็นจำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน

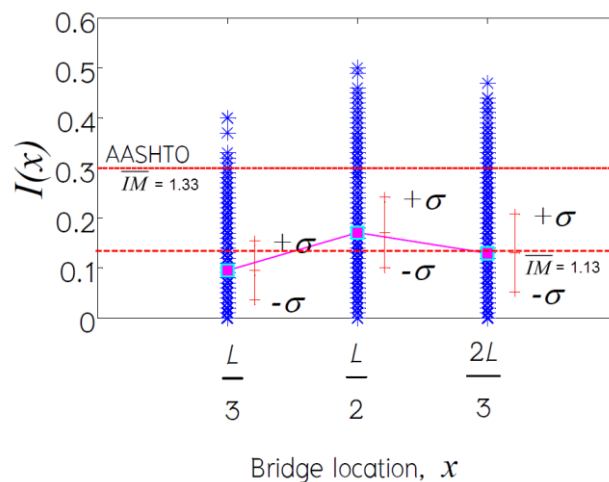


ทั้งนี้ผลของค่าตัวประกอบการกระแทก เป็นผลที่ได้จากการคำนวณของโมเมนต์ดัดที่กระทำต่อสะพาน โดยวิเคราะห์ได้จากสัญญาณความเครียด เพื่อหาค่าตัวประกอบจากค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ณ ตำแหน่งต่างๆ ในขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปผ่านสะพาน

ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกทุกตำแหน่งมีค่าเป็น 0.13 หรือ 13% ( $\overline{IM} = 1.13$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.18



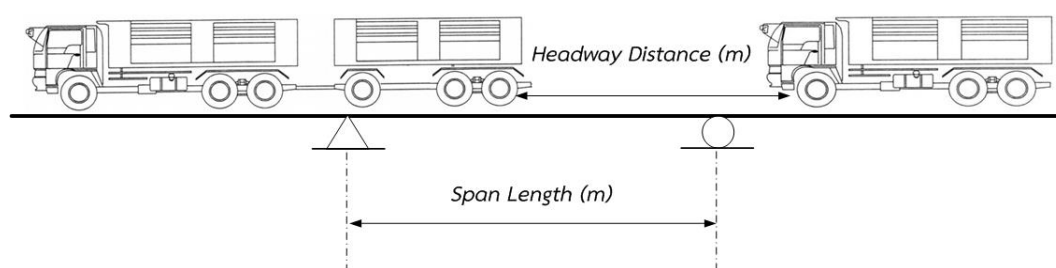
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (เอกวิทย์ ชันแก้ว" 2012)



รูปที่ 4.18 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก 10 ตันขึ้นไป 4,975 คัน (เอกวิทย์ ชันแก้ว" 2012)

อย่างไรก็ดีค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกจากผลการศึกษาดังกล่าว วิเคราะห์มาจากผลการทดสอบสะพานที่มีความยาวช่วง 10 เมตรเท่านั้น ในขณะที่งานวิจัยนี้พิจารณาช่วงพาดสะพานที่ 15 เมตร, 20 เมตร และ 22 เมตร ซึ่งมีช่วงพาดสะพานที่มากกว่า 10 เมตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอใช้ตัวประกอบการกระแทกสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายที่มีค่าเป็น 10% เท่านั้นโดยอ้างอิงจากค่าต่ำสุดจากผลการศึกษาที่ตำแหน่ง L/3

#### 4.3 การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการจำลองน้ำหนักบรรทุกจรจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถบรรทุก

เพื่อให้ทราบถึงผลน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดในอนาคตอันเนื่องมาจากขบวนรถที่วิ่งเพียงหนึ่งคันหรือขบวนรถที่วิ่งพร้อมกันหลายคัน จึงทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่ได้จากการเก็บข้อมูลระยะยาว โดยทำการสุ่มโอกาสของความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกจะวิ่งหนึ่งคันหรือวิ่งพร้อมกันหลายคัน ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกจรจะทำให้ทราบถึงผลของน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่เกิดขึ้นผ่านการจำลองเหตุการณ์การเคลื่อนที่ทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์

การจำลองน้ำหนักบรรทุกจรบนสะพานจากข้อมูลที่ตรวจวัดในระยะยาวมาวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองเหตุการณ์ของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานในสายทาง เพื่อวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดและค่าแรงเฉือนสูงสุด จากผลการตรวจวัดสะพานระยะยาวมีข้อมูลในการจำลองทั้งสิ้น 4,112 คัน ประกอบไปด้วย รถบรรทุกสิบล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วง และรถบรรทุกพ่วง โดยการจำลองเหตุการณ์ โดยทำการสุ่มรถบรรทุกเป็นสองกรณีดังนี้

1. การสุ่มรถบรรทุกหนึ่งคันจากข้อมูลรถบรรทุกทั้งหมด โดยมีสัดส่วนของความน่าจะเป็นเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ของโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์รถบรรทุกวิ่งหนึ่งคันเท่านั้น
2. การสุ่มรถบรรทุกมากกว่าหนึ่งคันจากข้อมูลรถบรรทุกทั้งหมด ในกรณีนี้ จะพิจารณาการสุ่มรถบรรทุกเพียงแค่ 2 คันเท่านั้น เนื่องจากสะพานในสายทางที่พิจารณา มีความยาวช่วงสะพานสูงสุดที่ 22 เมตร ซึ่งมีสัดส่วนของความน่าจะเป็นเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ของ

โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์รถบรรทุกวิ่งเรียงกันบนสะพานที่พิจารณา อีกทั้งระยะห่างระหว่างเพลาสุดท้ายของรถบรรทุกคันแรก และเพลากลางของรถบรรทุกคันหลัง จะทำการสุ่มระยะห่างระหว่าง 5 ถึง 15 เมตร เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการจราจรจริงบนสะพานมากที่สุด

เมื่อทำการสุ่มรถบรรทุกในแต่ละกรณี การสุ่มรถบรรทุกในแต่ละประเภท จะอ้างอิงจากสัดส่วนของข้อมูล ADTT ที่ได้จากกรมทางหลวงโดยมีรายละเอียดเป็นสัดส่วนรถบรรทุกดังนี้ รถบรรทุกสิบล้อ 52 เปอร์เซ็นต์, รถบรรทุกกึ่งพ่วง 27 เปอร์เซ็นต์ และรถบรรทุกพ่วง 21 เปอร์เซ็นต์

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกบนสะพานด้วยชุดคำสั่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB จากการกำหนดชุดคำสั่งการคำนวณด้วยทฤษฎีเส้นอิทธิพล (Influence line) จากเหตุการณ์ทั้งหมดที่กำหนดไว้เท่ากับ 5,000,000 เหตุการณ์ ซึ่งจะสามารถทราบถึงค่าโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนสูงสุด ที่เกิดขึ้นบนสะพานในสายทาง

ตารางที่ 4.8 ผลจากการจำลองข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัดในสายทางเพื่อหาผลของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด

ช่วงพาดสะพาน (เมตร)	ประเภทรถคันแรก	น้ำหนักรวม (ตัน)	Headway distance (เมตร)	ประเภทรถคันที่สอง	น้ำหนักรวม (ตัน)	โมเมนต์สูงสุด (ตัน เมตร)	แรงเฉือนสูงสุด (ตัน)
15	รถบรรทุกกึ่งพ่วง	38.34	12.74	รถบรรทุกพ่วง	105.33	187.13	65.78
20	รถบรรทุกพ่วง	105.33	5.12	รถบรรทุกสิบล้อ	23.75	297.77	75.51
22	รถบรรทุกพ่วง	105.33	5.24	รถบรรทุกสิบล้อ	23.10	349.66	79.02

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงสุดเป็นผลมาจากข้อมูลของรถบรรทุกพ่วงที่มีน้ำหนักเท่ากับ 105.33 ตัน จึงเป็นผลให้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าแปรปรวนอันเนื่องมาจากน้ำหนักรถบรรทุกที่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากๆ ข้อมูลความแปรปรวนดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อเนื่องในการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

#### 4.4 ผลของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง

การวิเคราะห์ความปลอดภัยของสะพานนั้นต้องคำนึงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการใช้งานที่ 5 ปีสำหรับการประเมินสภาวะการใช้งาน ซึ่งค่าตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วย ปริมาณการจราจรของสายทางที่พิจารณา น้ำหนักของรถบรรทุกและ ระยะห่างระหว่างเพลลา โดยหากต้องการข้อมูลที่สะท้อนการใช้งานตามปกติ จะต้องเก็บข้อมูลของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานที่ทำการพิจารณาตลอดระยะเวลาที่ 5 ปี แต่หากใช้วิธีการดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน จึงเป็นที่มาของการใช้ทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบลในการประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกในอนาคตจากลักษณะการแจกแจงน้ำหนักรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้ในปัจจุบัน

ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของข้อมูลรถบรรทุกที่ตรวจวัดได้ทั้งค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน จะถูกนำมาสร้างกราฟ Cumulative distribution function (CDF) ในกระดาษ Normal Probability และนำมาหารด้วยมาตรฐาน AASHTO HL - 93, มาตรฐานน้ำหนักรถบรรทุกไทยซึ่งแบ่งรายละเอียดเป็น รถบรรทุกสิบล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง กราฟที่ถูกสร้างจะนำไปคำนวณด้วยทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบล (Gumbel's Extreme value type I distribution) เพื่อทำนายผลของน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นในอนาคตตลอดการใช้งานในช่วงระยะเวลาต่างๆ การพิจารณาผลของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนบนของสะพานมีตัวแปรที่ประกอบไปด้วย Load distribution factor (DF) ผลทางพลศาสตร์จากรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยตัวแปร Dynamic amplification factor (IM) ซึ่งจะได้ค่าผลของน้ำหนักบรรทุกต่อชิ้นส่วนคานวิฤติของสะพานสำหรับหนึ่งช่องจราจรและสองช่องจราจร ( $\overline{LL}$ ) ที่แตกต่างกันตามช่วงระยะห่างระหว่างคาน (Beam spacing) ตามแบบก่อสร้างสะพานในสายทางในช่วงความยาวต่างๆ ค่าจากการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีค่าสุดขีดของกัมเบล จะพิจารณาที่บริเวณส่วนปลายของการแจกแจง (Tail end distribution) เพื่อนำไปประมาณค่าสูงสุดของค่าโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนสูงสุด ผลของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ( $\overline{L}_{max}$ ) ที่มีค่าตัวแปรไร้มิติ

ผลจากการวิเคราะห์จะพบว่า กราฟการแจกแจงจะมีลักษณะใกล้เคียงเป็นเส้นตรง ทั้งในกรณีของค่าโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ดังนั้นจึงทำการจำลองเส้นตรงเพื่อใช้ตัดกับแกน y และการจำลองเส้นตรงดังกล่าว จะสามารถทราบถึงความชันของเส้นตรงบริเวณส่วนปลาย ผลที่ได้จะเป็นค่าตัวแปรของจุดตัดแกน y ที่เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เป็นอินเวอร์สของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของน้ำหนักบรรทุก จากการแจกแจงแบบปกติ (Inverse standard normal distribution function) และค่าความชันของเส้นตรงเป็นผลมาจากเส้นความชันของน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการจำลองเทียบกับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL-93 และมาตรฐานน้ำหนักรถบรรทุกไทย ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

$$\sigma_{event} = \frac{1}{m} \quad (4.18)$$

$$\alpha_N = \sqrt{\frac{2 \ln(N)}{\sigma_{event}}} \quad (4.19)$$

$$u_N = \mu_{event} + \sigma_{event} \left( \sqrt{2 \ln(N)} - \frac{\ln(\ln(N)) + \ln(4\pi)}{2\sqrt{2 \ln(N)}} \right) \quad (4.20)$$

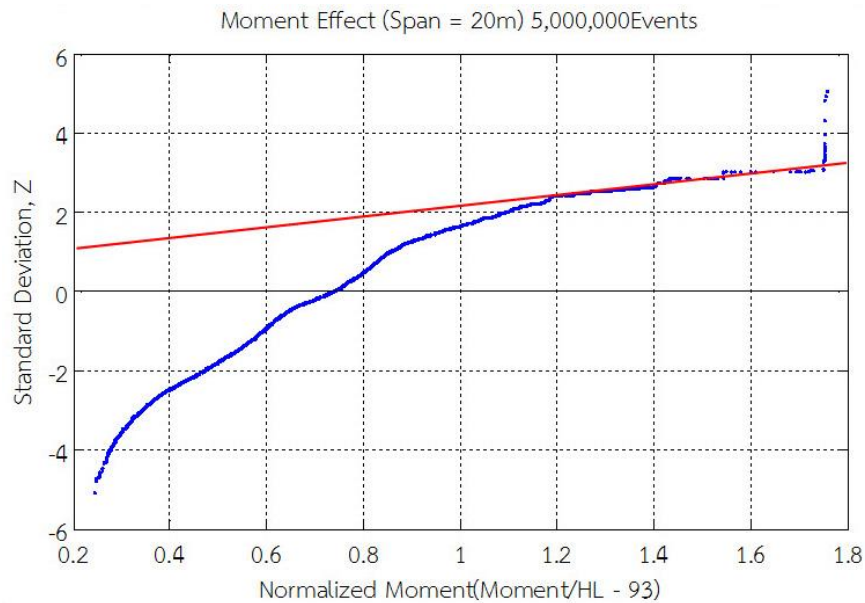
$$\bar{L}_{max} = \mu_{max} = u_N + \frac{0.577216}{\alpha_N} \quad (4.21)$$

โดยที่

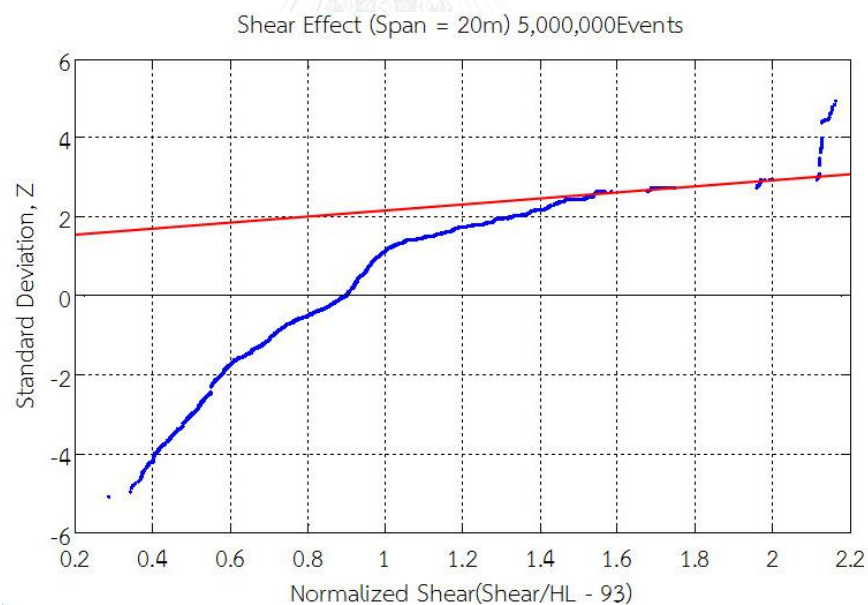
- $m$  = ความชันของเส้นตรงบริเวณส่วนปลาย  
 $N$  = จำนวนเหตุการณ์ที่พิจารณา  
 $\sigma_{event}$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ตรวจขังได้  
 $\mu_{event}$  = ค่าเฉลี่ยผลของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ตรวจขังได้  
 $\alpha_N$  = ค่าส่วนกลับการกระจายตัวของ Gumbel  
 $u_N$  = ค่าเฉลี่ยผลของน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ช่วงการประเมินการใช้งานสะพาน  
 $\bar{L}_{max}$  = ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดสำหรับการประเมินสะพาน

ผลจากการจำลองเหตุการณ์การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างการตรวจวัดได้ในระยะยาวจะถูกนำมาสร้างกราฟ Normalized ซึ่งพบว่ากราฟของการแจกแจงสามารถจำแนกการวิเคราะห์เป็นสองกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาเส้นความชันสูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลบริเวณส่วนปลายที่ 5เปอร์เซ็นต์ของการแจกแจง

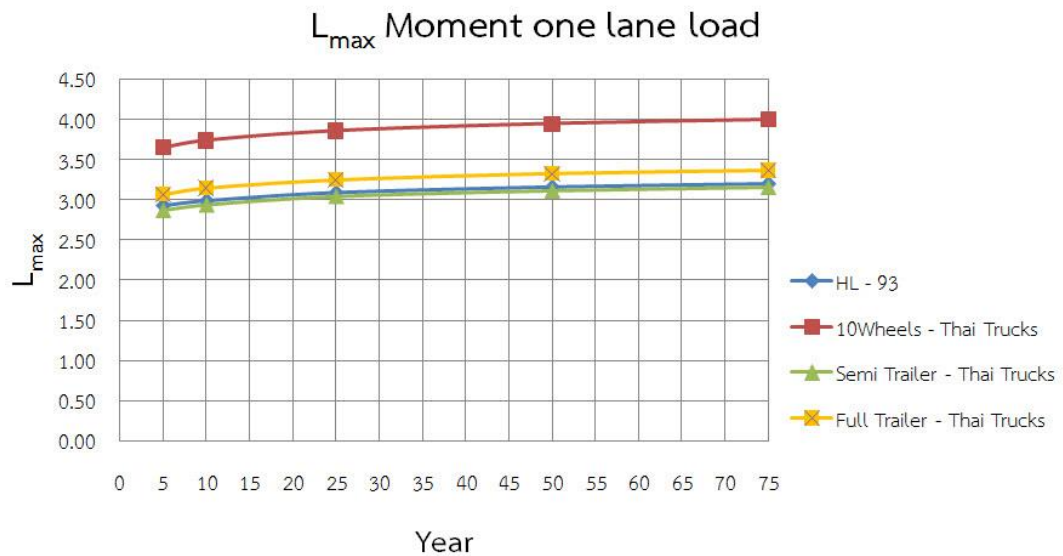


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณีนี้ที่ 1 ผลของโมเมนต์ตัดที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยโมเมนต์ตัดที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93

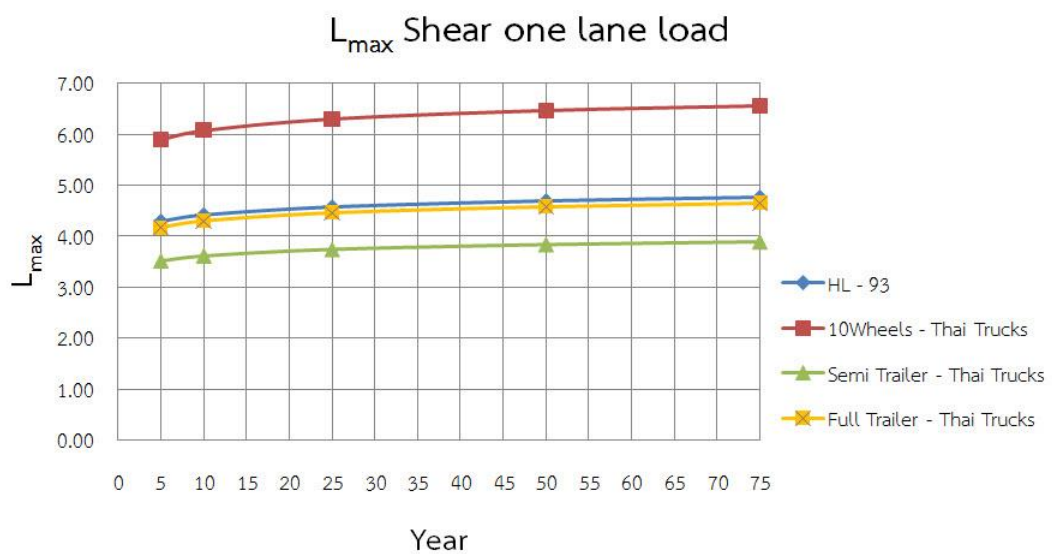


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณีนี้ที่ 1 ผลของแรงเฉือนที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยแรงเฉือนที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93

ผลจากการแจกแจงด้วยกรณีนี้ที่ 1 เป็นการพิจารณาข้อมูลช่วงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของกราฟ 5เปอร์เซ็นต์แรกมีดังนี้



รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร

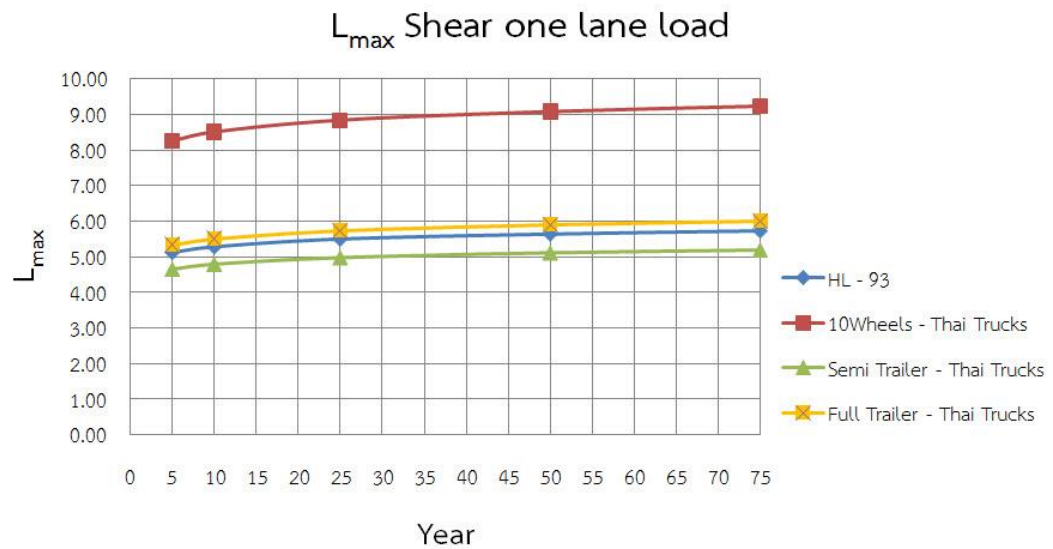


รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร





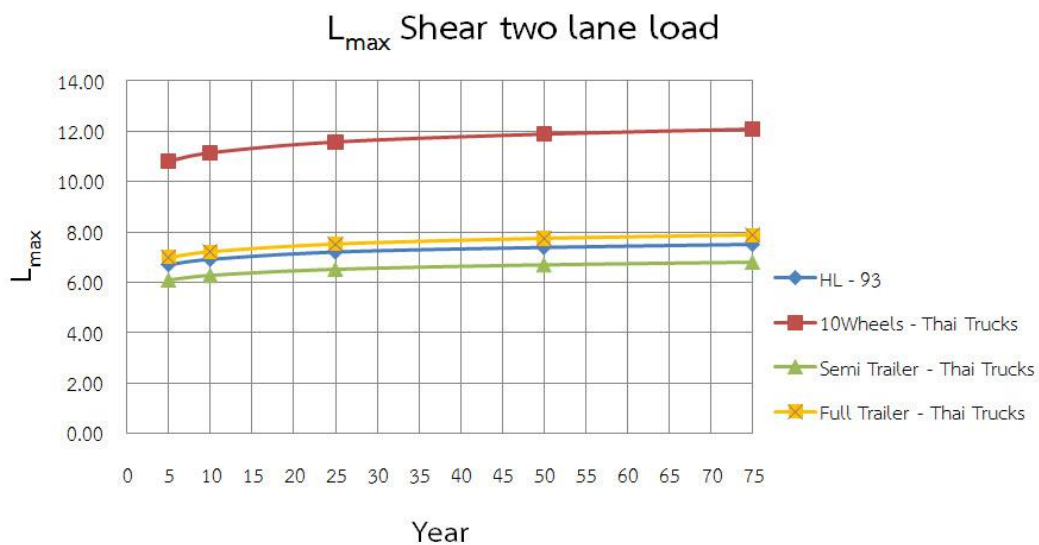
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



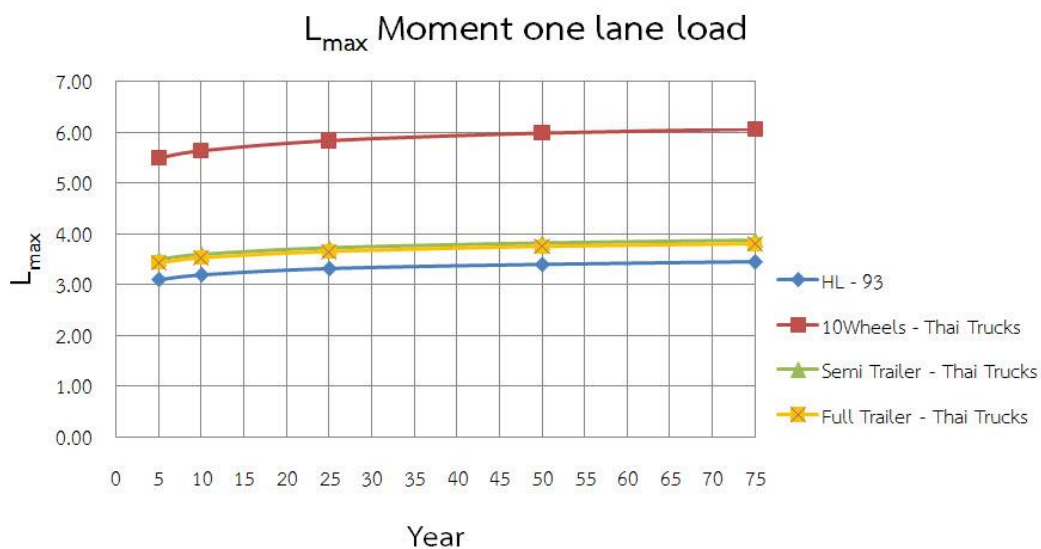
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



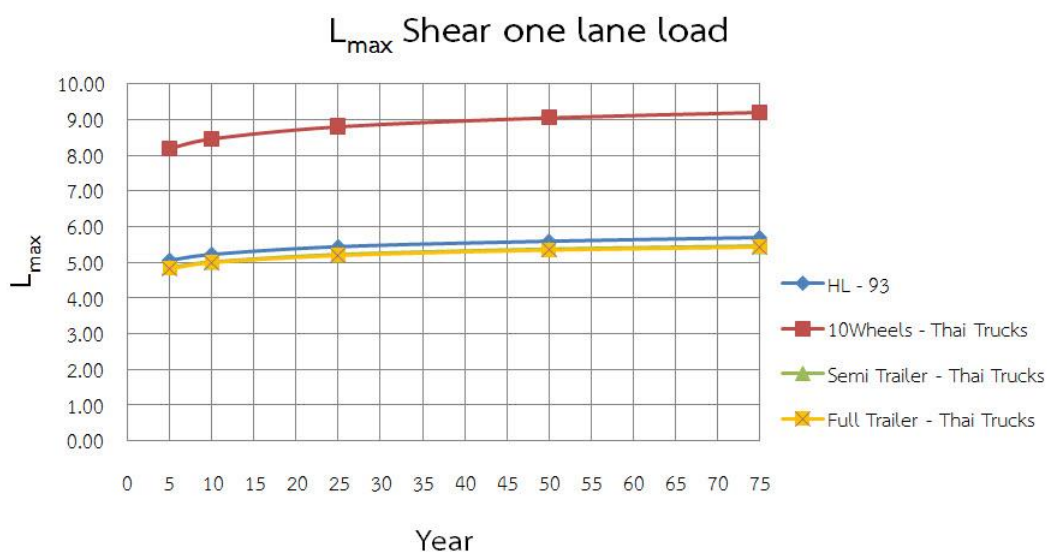
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



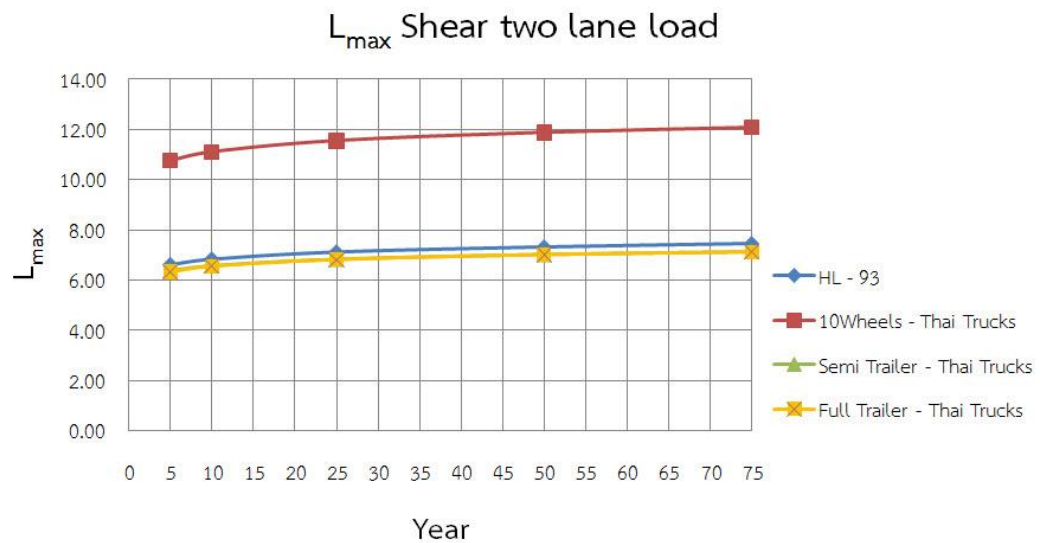
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร



รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร

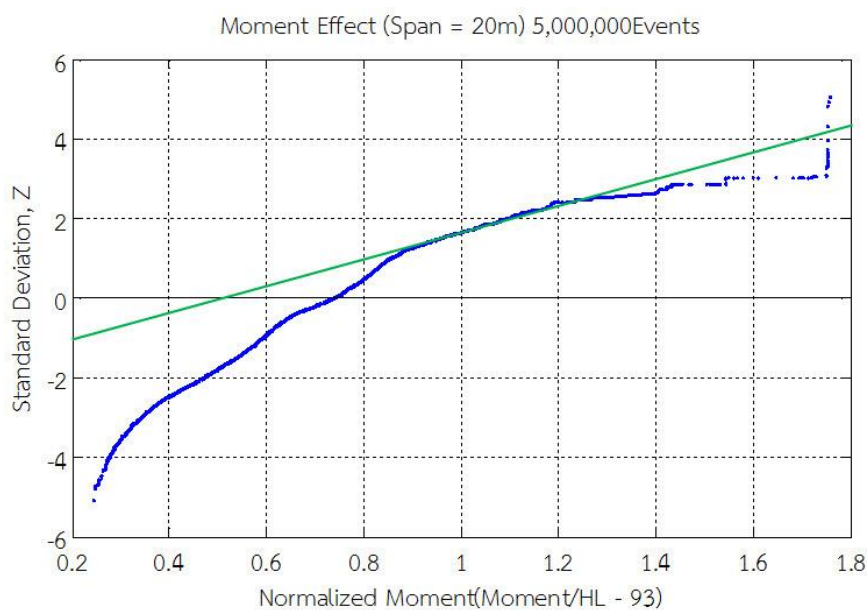


รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร

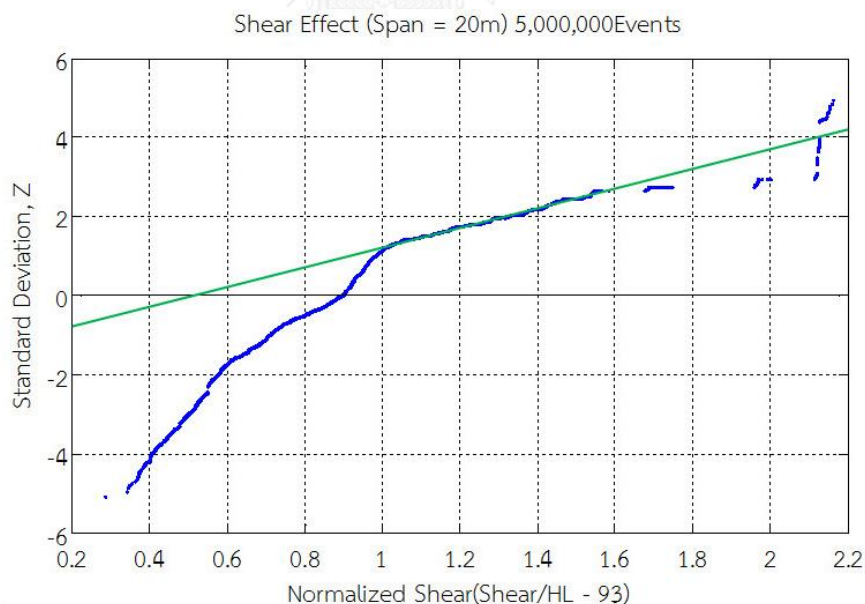


รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร

กรณีที่ 2 พิจารณาเส้นความชันซึ่งเป็นข้อมูลบริเวณถัดมาจากความชันแรก

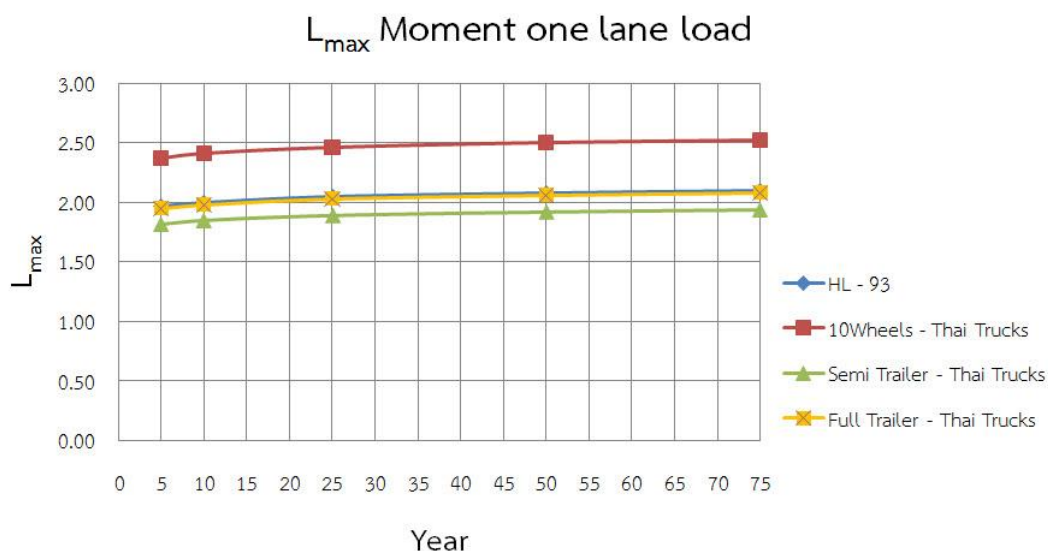


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณีที่ 2 ผลของโมเมนต์ตัดที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยโมเมนต์ตัดที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93

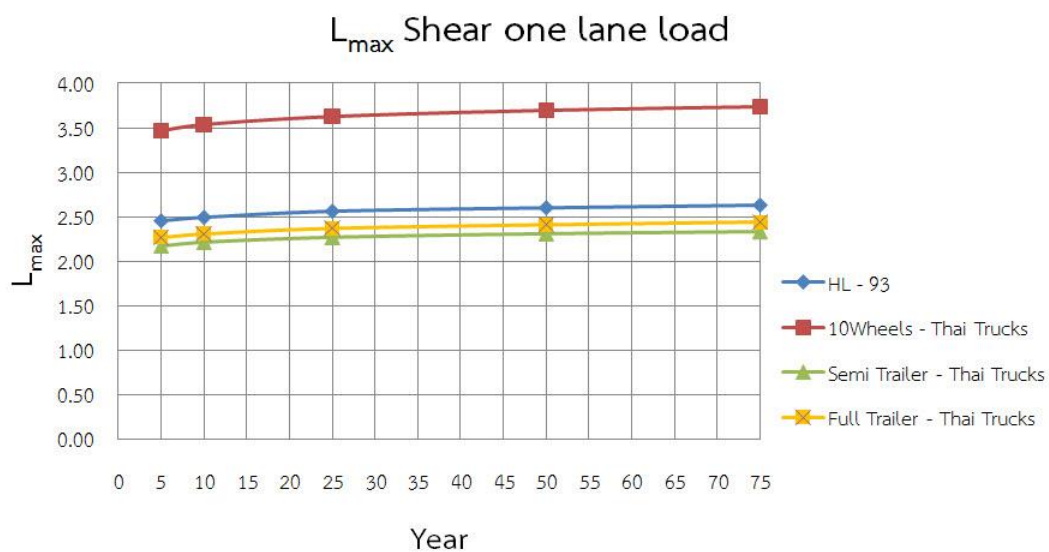


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงเส้นตรงบริเวณส่วนปลายของการแจกแจงของกรณีที่ 2 ผลของแรงเฉือนที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์รถบรรทุก 5,000,000 เหตุการณ์หารด้วยแรงเฉือนที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93

ผลจากการแจกแจงด้วยกรณีที่ 2 เป็นการพิจารณาข้อมูลช่วงเส้นตรงถัดจากความชันแรก การวิเคราะห์ด้วยความชันบริเวณนี้ เพื่อเป็นผลในการเปรียบเทียบระหว่างผลของเส้นตรงที่ได้จาก กรณีที่1 และกรณีที่2 เนื่องจากข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าการกระจายตัวของข้อมูลใน ส่วนของน้ำหนักบรรทุกทุกค่อนข้างมาก โดยเฉพาะรถบรรทุกที่เกินกว่ากฎหมายซึ่งผลของการ Normalized ทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน พบว่า น้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่ากฎหมายมีปริมาณเป็น ส่วนน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้กฎหมายที่กำหนด จึงเป็นสาเหตุให้การกระจาย ตัวที่ส่วนปลายของกราฟ Normalized ค่อนข้างเบาบาง และมีการกระโดดของข้อมูลอย่างเห็นได้ชัด ในบริเวณส่วนปลายของข้อมูล



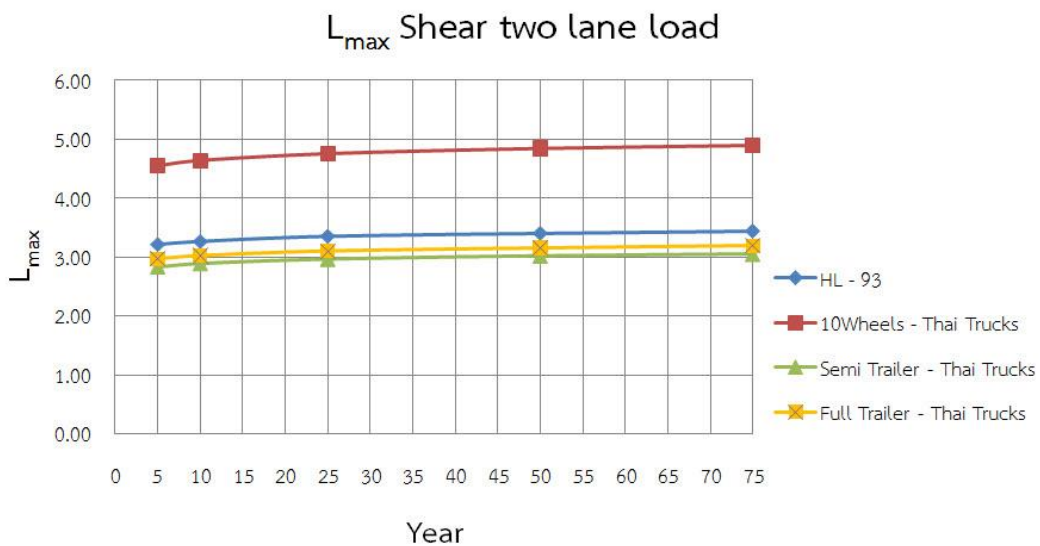
รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วง ความยาวสะพาน 15 เมตร



รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร



รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร

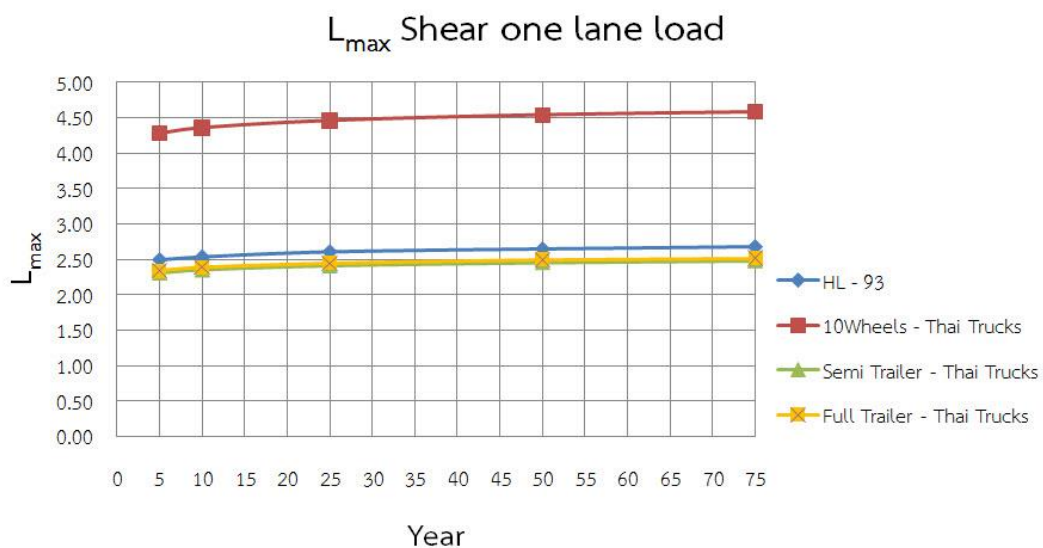


รูปที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 15 เมตร



รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร

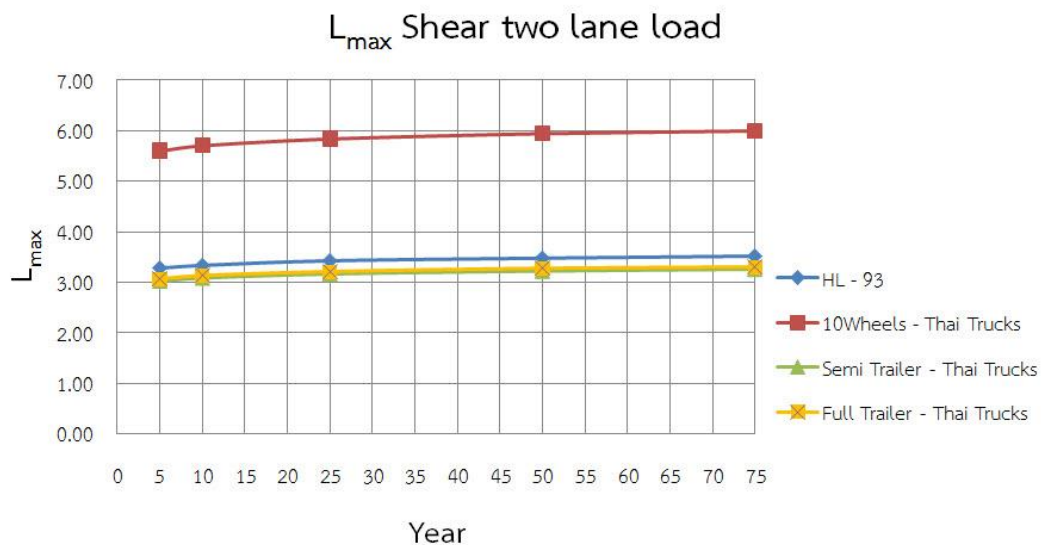




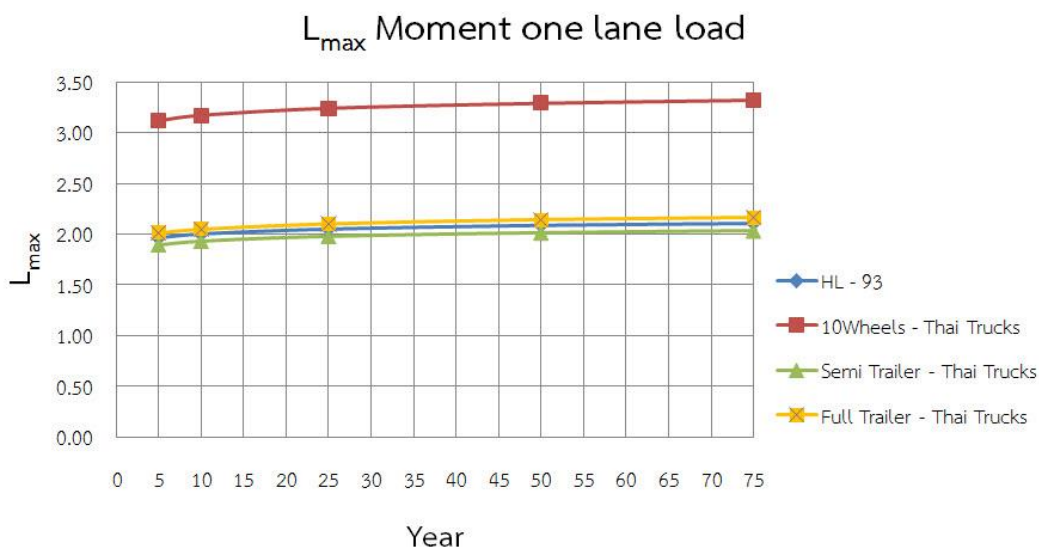
รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



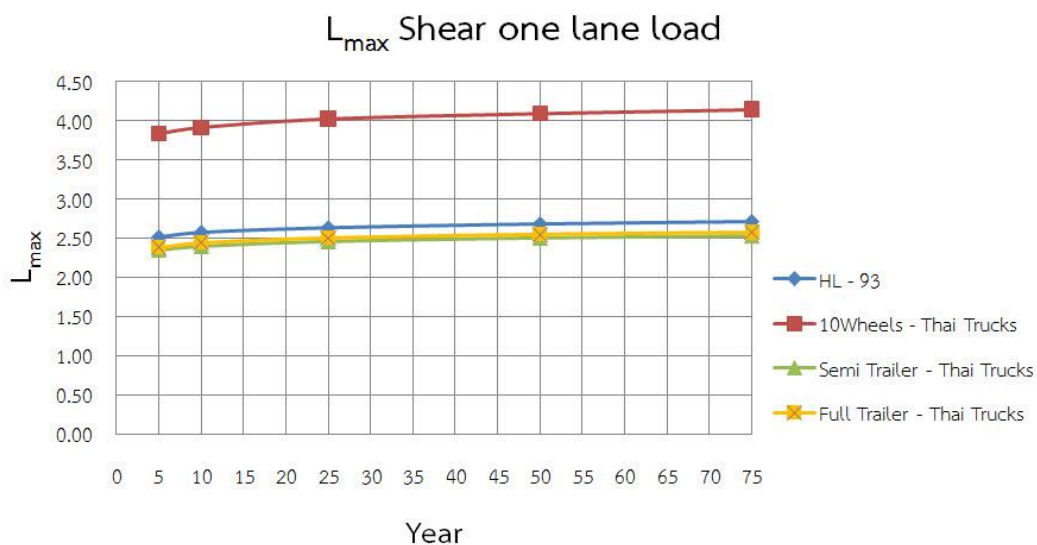
รูปที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ตัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



รูปที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 20 เมตร



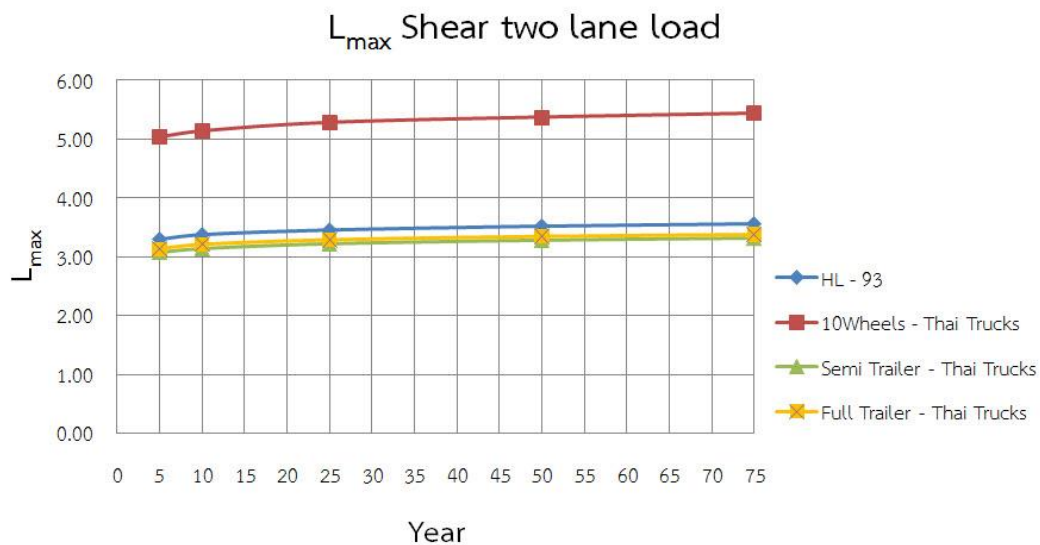
รูปที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกทุกจรของโมเมนต์ดัดสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร



รูปที่ 4.45 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับหนึ่งช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร



รูปที่ 4.46 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร



รูปที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนสำหรับสองช่องจราจรที่ช่วงความยาวสะพาน 22 เมตร

จากผลการวิเคราะห์ของทั้งสองกรณีมีข้อสังเกตที่พบคือ ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดสำหรับการประเมินสะพาน ( $\bar{L}_{max}$ ) โดยการใช้น้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93, น้ำหนักบรรทุกจากรถบรรทุกทั้งพ่วงและรถพ่วง มีค่า  $\bar{L}_{max}$  ทั้งสามประเภทที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่า  $\bar{L}_{max}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกสลิป มีค่า  $\bar{L}_{max}$  สูงกว่ารถบรรทุกประเภทอื่นๆ อันเนื่องมาจากข้อมูลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์ เป็นการใช้อัตราของรถบรรทุกทุกประเภท ซึ่งในที่นี้ได้รวมผลของน้ำหนักบรรทุกทั้งพ่วงและรถบรรทุกพ่วงที่มีน้ำหนักตามพิคตกฎหมายที่ 50.50 ตัน ในขณะที่รถบรรทุกสลิปมีพิคตกฎหมายที่ 25.00 ตัน เมื่อนำผลจากการจำลองทั้งหมด ทหารด้วยผลของน้ำหนักบรรทุกทุกสลิป จึงทำให้ค่า Normalized ที่ได้จากรถบรรทุกสลิปมีค่าสูงกว่ารถบรรทุกประเภทอื่นๆ

และจากการคาดการณ์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดพบว่า การวิเคราะห์ที่ 5 ปี, 10 ปี, 25 ปี, 50 ปี และที่ 75 ปี มีค่าจากการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันเพียง 2 เปอร์เซ็นต์สำหรับการเปรียบเทียบระหว่าง 5 ปี ถึง 10 ปี และมีค่าความแตกต่างที่ 7 เปอร์เซ็นต์สำหรับการเปรียบเทียบระหว่าง 5 ปี ถึง 75 ปี ซึ่งจะเห็นว่าค่าความแตกต่างของการประเมินที่ระดับ 5 ปี ถึง 75 ปี มีความแตกต่างกันเพียง 2-7 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกใช้ค่าการวิเคราะห์เฉพาะที่ 5 ปี ซึ่งเป็นการอ้างอิงที่สอดคล้องตามมาตรฐาน AASHTO LRFR สำหรับการประเมินสะพานที่ 5 ปี และคาดว่าน่าจะเพียงพอสำหรับการปรับเทียบค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการประเมินในสายทาง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีกัมเบลทั้งสองกรณีนี้ จะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของค่าดัชนีความเชื่อมั่นที่จะกล่าวในบทถัดไป

## บทที่ 5

### การประเมินความปลอดภัยของสะพาน

#### 5.1 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่น

ในการปรับเทียบตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกจรด้วยการวิเคราะห์ผ่านทฤษฎีความเชื่อมั่น มีส่วนประกอบของพารามิเตอร์ที่สำคัญอันประกอบไปด้วย พารามิเตอร์สำหรับความต้านทานของหน้าตัด, พารามิเตอร์สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่อื่นเนื่องมาจากวัสดุของหน้าตัด และพารามิเตอร์สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทั้งงานวิจัยและการวิเคราะห์จากข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงอ้างอิงพารามิเตอร์จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในประเทศไทยเป็นหลัก และจะใช้ข้อมูลบางส่วนจากมาตรฐาน AASHTO ในกรณีที่ไม่มีผลการศึกษภายในประเทศหรือ ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่าอันเนื่องจากการเก็บตัวอย่างเป็นจำนวนมากที่รวมถึงระยะเวลาการตรวจวัด

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้อ้างอิงสำหรับความต้านทานของหน้าตัด

Resistance ( $\bar{R}$ )			Dead load ( $\bar{DL}$ )			Live load ( $\bar{LL}$ )		
$\lambda_R(\gamma_D DL + \gamma_L L_n)$			$\lambda_D DL$			$\bar{L}_{max} \times L_n \times \bar{IM} \times \bar{DF}$		
Symbol	Description	Based on	Symbol	Description	Based on	Symbol	Description	Based on
$\lambda_R$	Resistance Bias factor	DOH	$\lambda_D$	Dead load bias factor	AASHTO	$\bar{L}_{max}$	Live load effect	1month data
$\gamma_D$	Dead load factor	AASHTO	$DL$	Dead load effect	As built drawing	$L_n$	Thai truck and HL - 93	1month data and AASHTO
$DL$	Dead load effect	As built drawing	$\sigma_{DL}$	S.D. of Dead load	AASHTO	$\bar{IM}$	Impact factor	Chula
$\gamma_L$	Live load factor	Calibration				$\bar{DF}$	Distribution factor	AASHTO
$L_n$	Thai truck and HL - 93	1month data and AASHTO				$\sigma_{LL}$	S.D. of Live load	1month data
$\sigma_R$	Live load effect from Thai truck	AASHTO						

## 5.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่น

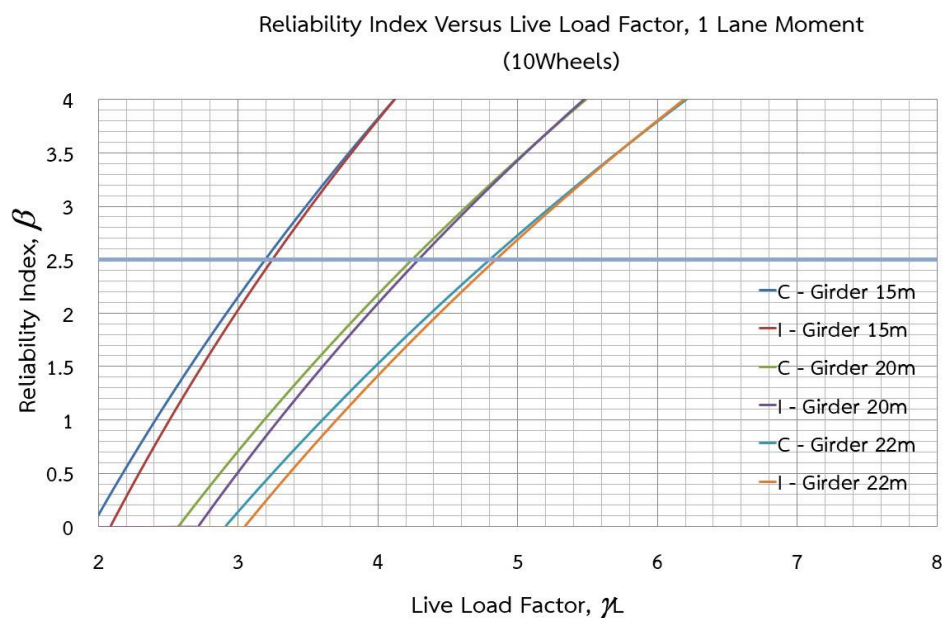
เนื่องจากสะพานที่ใช้ในประเทศไทยมีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน อีกทั้งยังไม่มีมาตรฐานการประเมินความปลอดภัยของสะพานจากการใช้งานอันเนื่องมาจากการตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกทุกภายในประเทศซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐานของต่างประเทศเช่น AASHTO LRFR ได้กำหนดให้ใช้ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่ระดับปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 5.2 ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการประเมินจากมาตรฐาน AASHTO LRFR

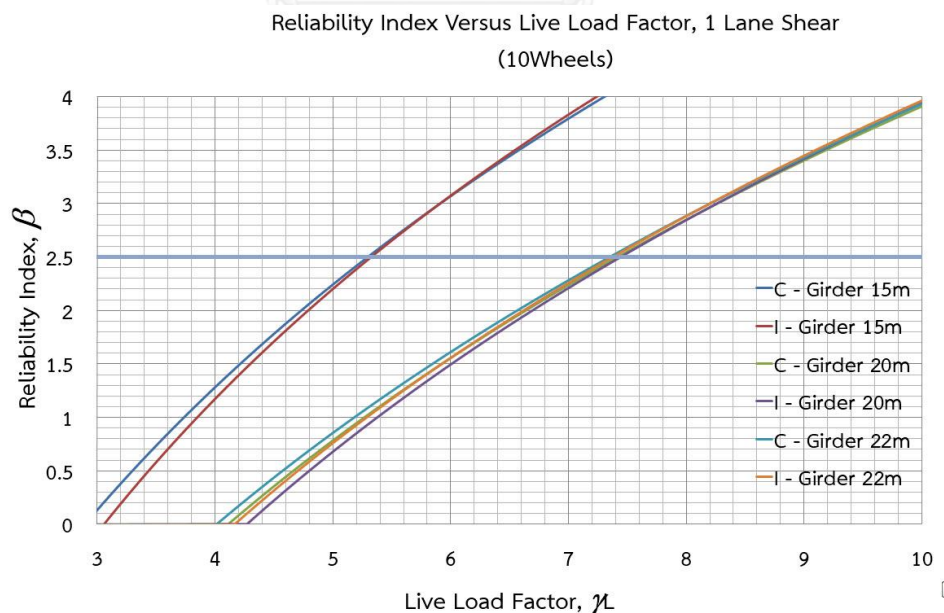
ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับ Type3, Type 3S2, Type 3 – 3 และ Lane loads
ไม่ระบุ	1.80
ADTT $\geq$ 5,000	1.80
ADTT = 5,000	1.65
ADTT $\leq$ 5,000	1.40

ตัวอย่างค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการประเมินสะพานด้วยมาตรฐาน AASHTO LRFR เป็นมาตรฐานที่ได้จากการปรับเทียบจากการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลจากการใช้งานรถบรรทุกในต่างประเทศ ซึ่งหากนำค่าจากมาตรฐานดังกล่าวเป็นตัวแปรสำหรับการประเมินสะพานในประเทศอาจมีความปลอดภัยไม่เพียงพอ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงมีความเป็นห่วงความปลอดภัยของการใช้งานสะพาน ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยผลจากการตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกทุกในประเทศจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมอันจะนำไปสู่การประเมินอัตราส่วนความปลอดภัยของการใช้งานสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตลอดทั้งสายที่ระดับ Operating level เพื่อให้การประเมินสะพานในสายทางสะท้อนความปลอดภัยของการใช้งาน จึงทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่นของทั้งสองกรณีจากค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.4 (ผลของน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง) ดังนี้

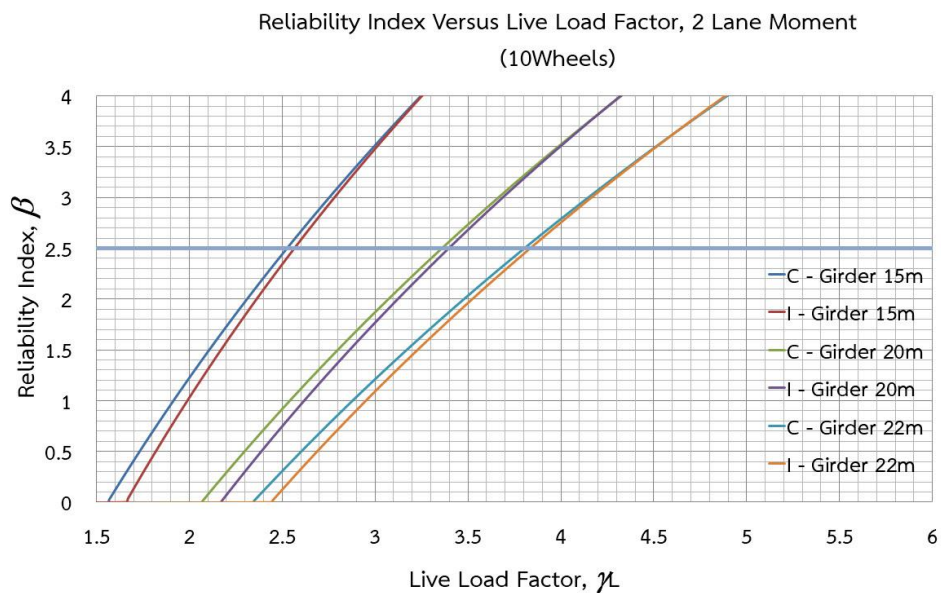
5.2.1 คำน้่านักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากเส้นความชันสูงสุดจากกรณีที่ 1  
 การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากรถบรรทุกสี่ล้อ



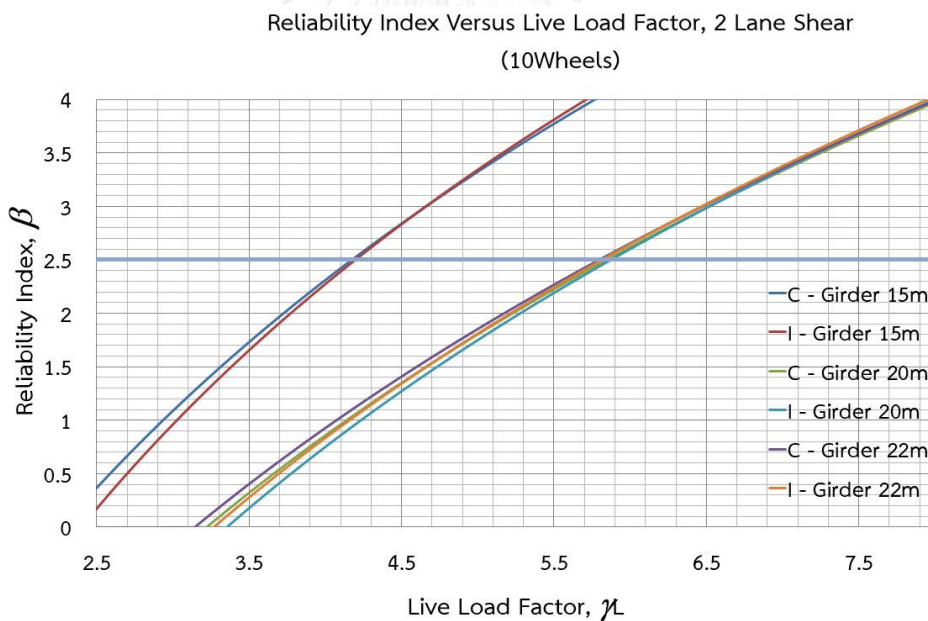
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์คัตที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกสี่ล้อ)



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกสี่ล้อ)



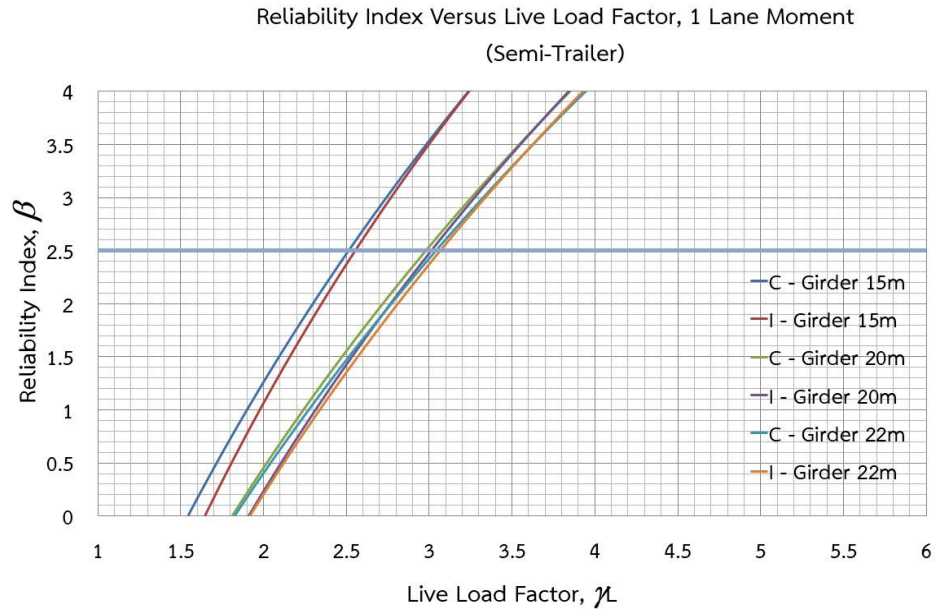
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่  
สองช่องจราจร (รถบรรทุกสี่ล้อ)



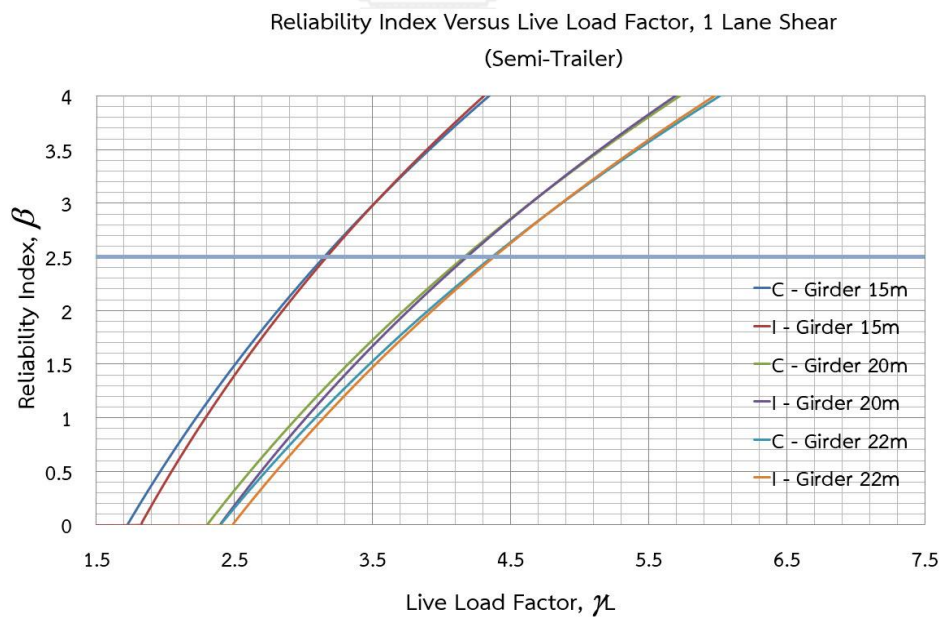
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่  
สองช่องจราจร (รถบรรทุกสี่ล้อ)



การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ได้อาจรถบรรทุกกึ่งพ่วง



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)

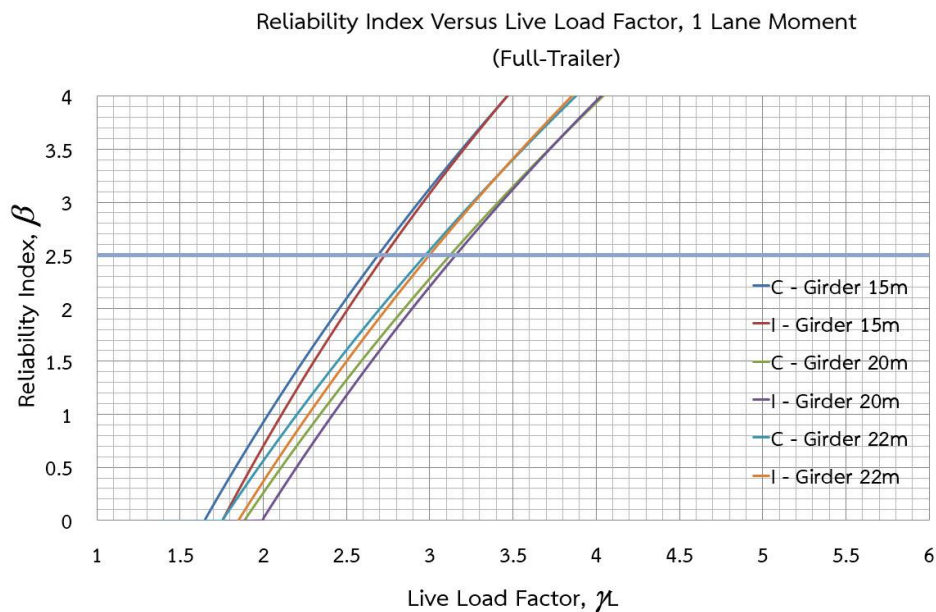


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่  
สองช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)

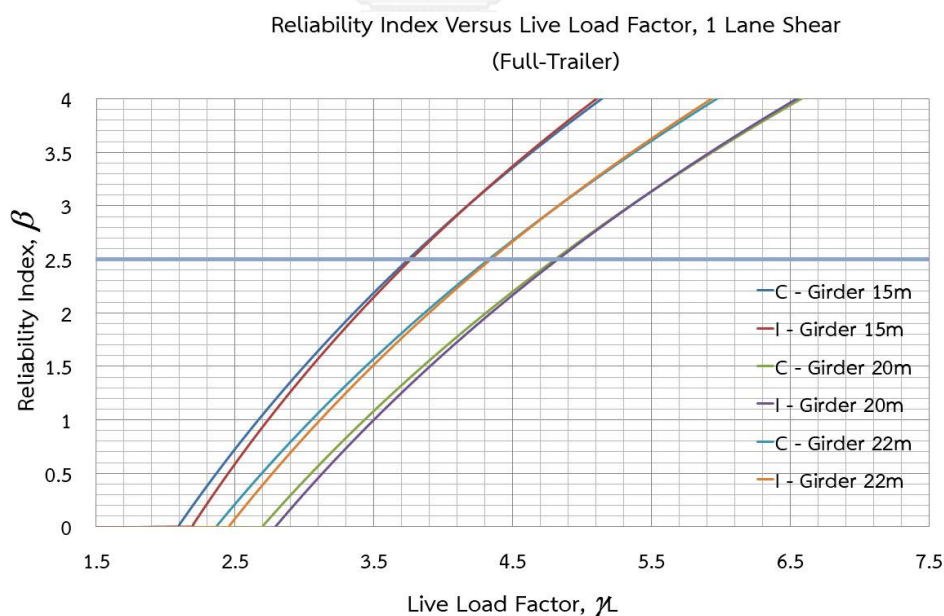


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่  
สองช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)

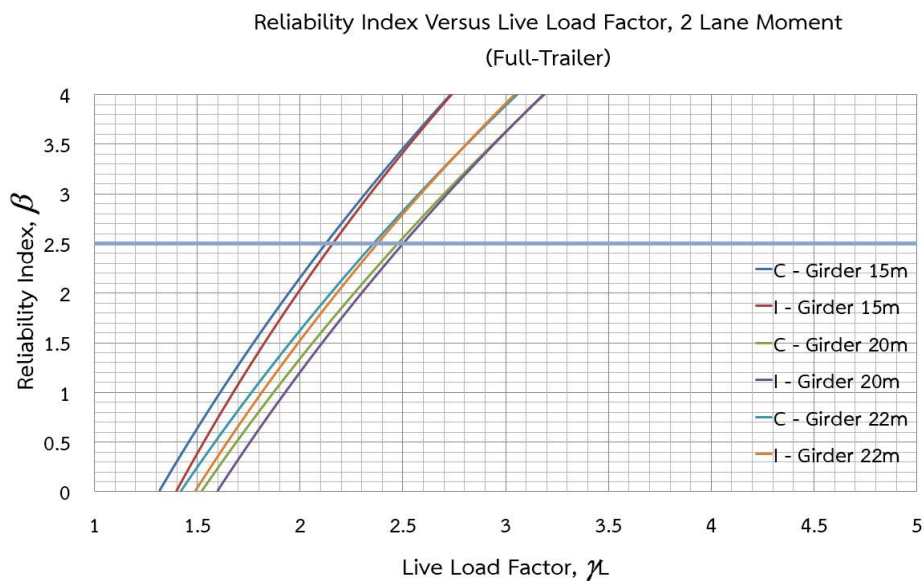
การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ได้อาจรถบรรทุกพ่วง



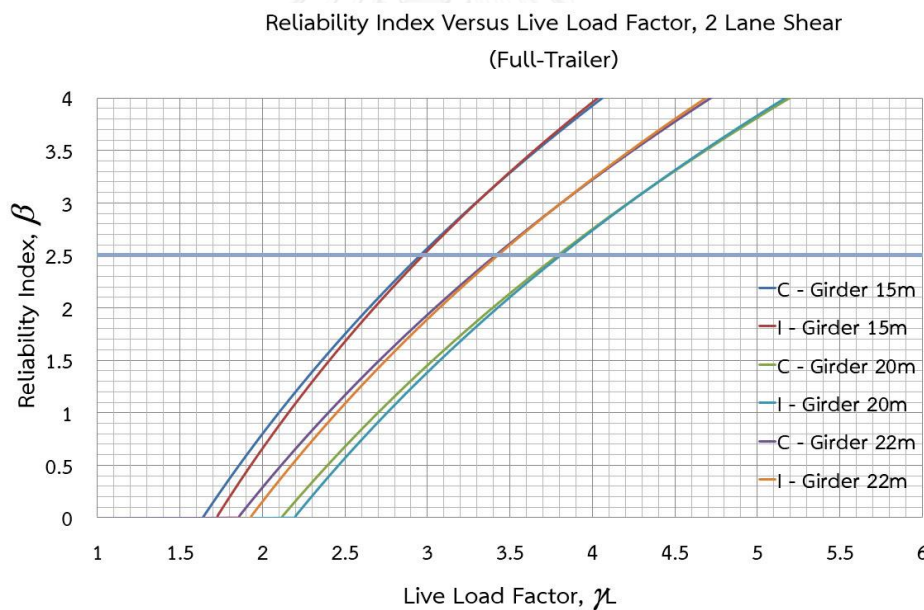
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)

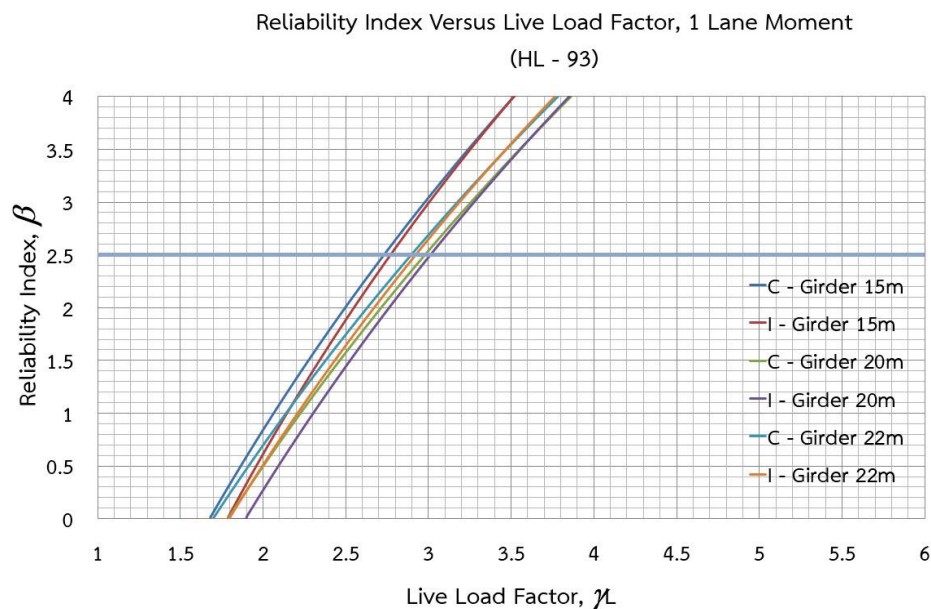


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)

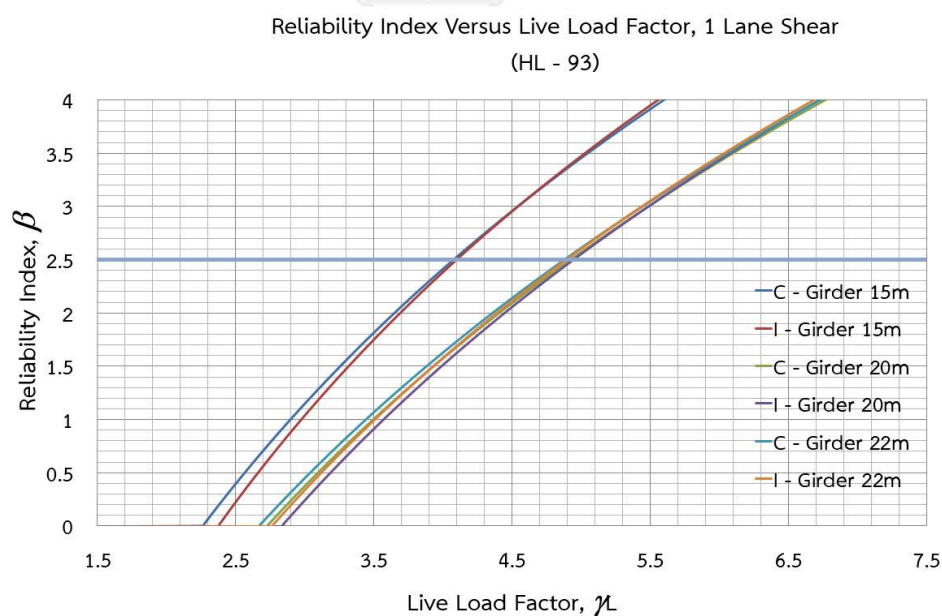


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)

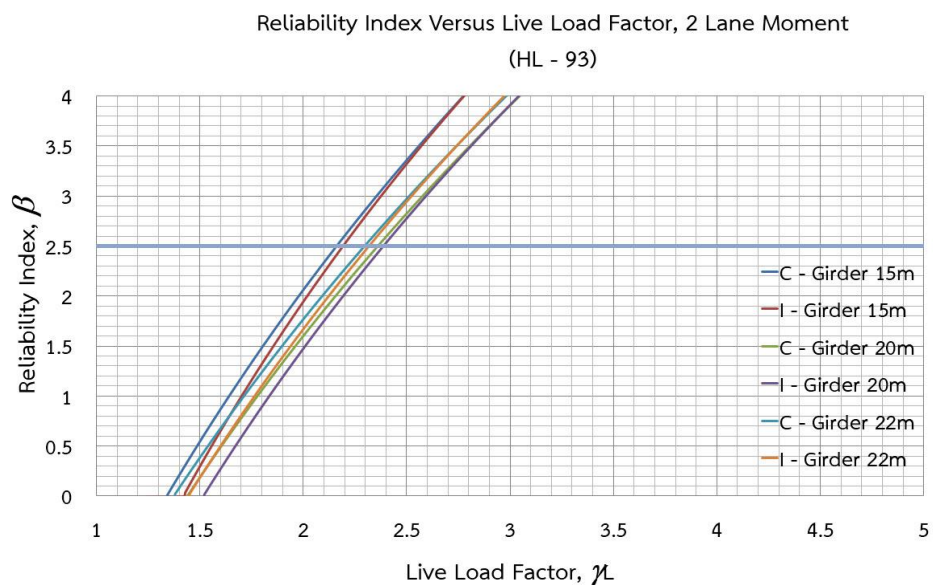
การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93



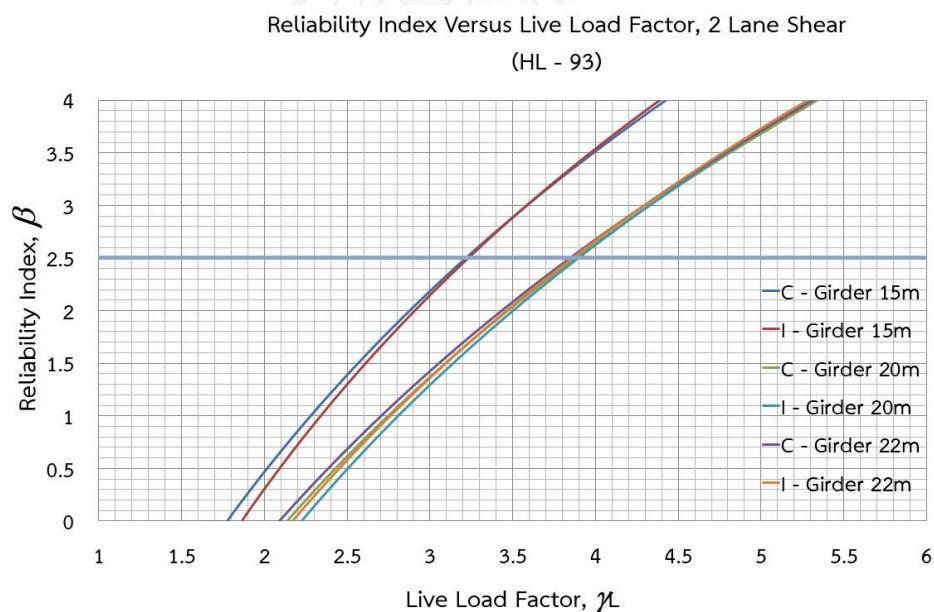
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่หนึ่งช่องจราจร (AASHTO HL - 93)



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (AASHTO HL - 93)



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่สองช่องจราจร (AASHTO HL - 93)



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่สองช่องจราจร (AASHTO HL - 93)

ผลจากการวิเคราะห์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกจรด้วยตัวแปรน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ( $L_{max}$ ) สำหรับกรณีที่ 1 ที่ได้จากการพิจารณาเส้นความชันสูงสุด โดยแบ่ง

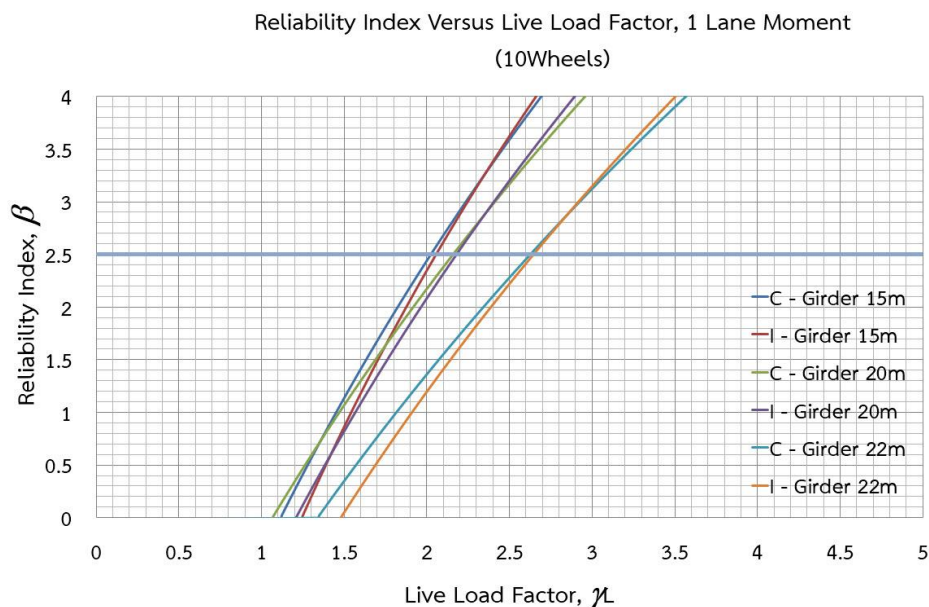
ออกเป็น 4 ส่วนหลักๆดังนี้คือ 1. รถบรรทุกสิบล้อ 2. รถบรรทุกกึ่งพ่วง 3. รถบรรทุกพ่วง และ 4. รถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93

สำหรับสะพานที่หนึ่งช่องจราจร ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรถที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อกำหนดค่าดัชนีความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ 2.50 (สำหรับการประเมินสะพาน) ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรถ ( $\gamma_L$ ) จะเกิดขึ้นมากที่สุด ในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยรถบรรทุกสิบล้อซึ่งมีค่า  $\gamma_L$  เท่ากับ 4.80 สำหรับโมเมนต์ดัด และ 7.40 สำหรับแรงเฉือน ในขณะที่รถบรรทุกกึ่งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง และรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 มีค่า  $\gamma_L$  สูงสุดที่ใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 3.00 - 3.20 สำหรับโมเมนต์ดัด และอยู่ในช่วงระหว่าง 4.40 - 4.70 สำหรับแรงเฉือน

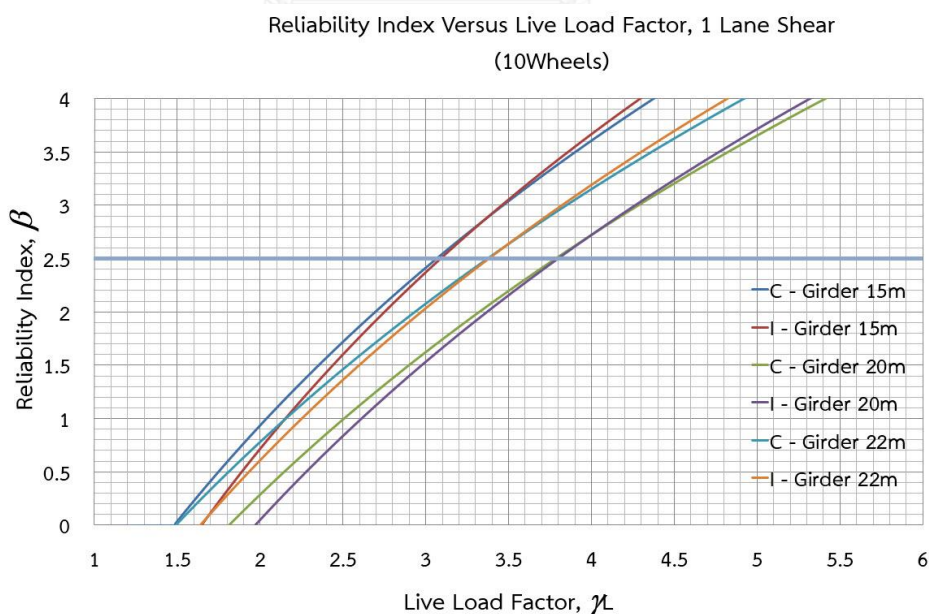
สำหรับสะพานที่สองช่องจราจร ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรถ ( $\gamma_L$ ) จะเกิดขึ้นมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ด้วยรถบรรทุกสิบล้อเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ที่หนึ่งช่องจราจรซึ่งมีค่า  $\gamma_L$  เท่ากับ 3.70 สำหรับโมเมนต์ดัด และ 5.90 สำหรับแรงเฉือน ในขณะที่รถบรรทุกกึ่งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง และรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 มีค่า  $\gamma_L$  สูงสุดที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ที่หนึ่งช่องจราจร โดยมีค่า  $\gamma_L$  สูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 2.40 - 2.50 สำหรับโมเมนต์ดัด และอยู่ในช่วงระหว่าง 3.50 - 3.90 สำหรับแรงเฉือน

ผลจากการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรถ ( $\gamma_L$ ) ทั้งหนึ่งช่องจราจรและสองช่องจราจร มีตัวแปรสำคัญที่กำหนดทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรถคือ ค่าตัวแปรน้ำหนักบรรทุกจรถสูงสุด ( $L_{max}$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีกัมเบล ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่า  $\gamma_L$  ที่ได้จากการรถบรรทุกกึ่งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง และรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน อันเนื่องมาจากผลของแรงลัพธ์ที่ได้ทั้ง 3กรณี ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนสูงสุด มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่รถบรรทุกสิบล้อถูกกำหนดการบรรทุกน้ำหนักสูงสุดที่ 25.00ตัน ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวง และผลจากการจำลองเหตุการณ์ทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์ เป็นผลจากน้ำหนักรถบรรทุกทั้งหมดซึ่งเป็นข้อมูลประกอบไปด้วยรถบรรทุกกึ่งพ่วง และรถบรรทุกพ่วงซึ่งมีขีดจำกัดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 50.50 ตัน ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวง จึงเป็นสาเหตุให้ค่า  $\gamma_L$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยรถบรรทุกสิบล้อมีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับรถบรรทุกทั้งสามกรณี

5.2.2 คำนวณน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่ได้จากข้อมูลถัดจากความชันสูงสุดจากกรณีที่ 2  
การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากรถบรรทุกสิบล้อ



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกสิบล้อ)

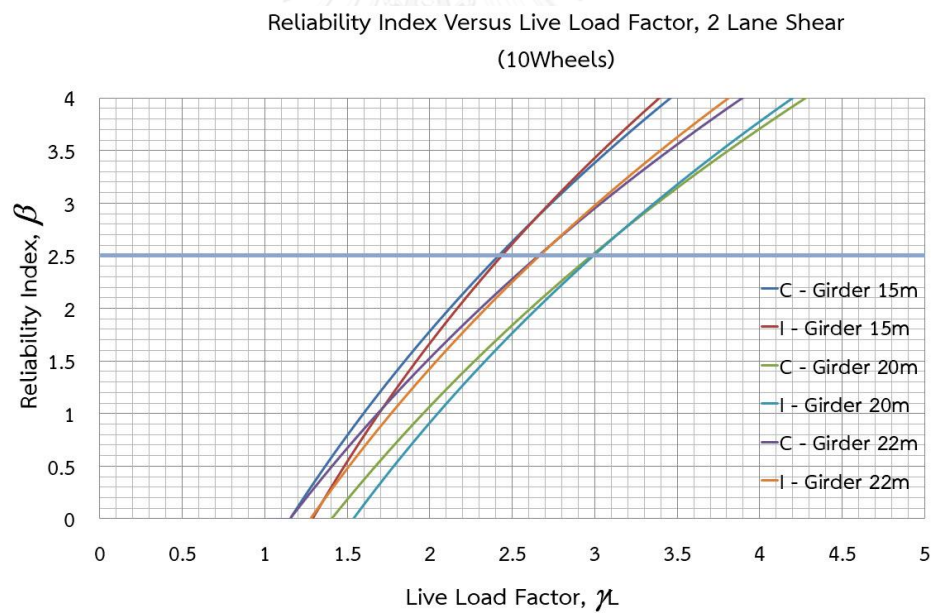


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกสิบล้อ)



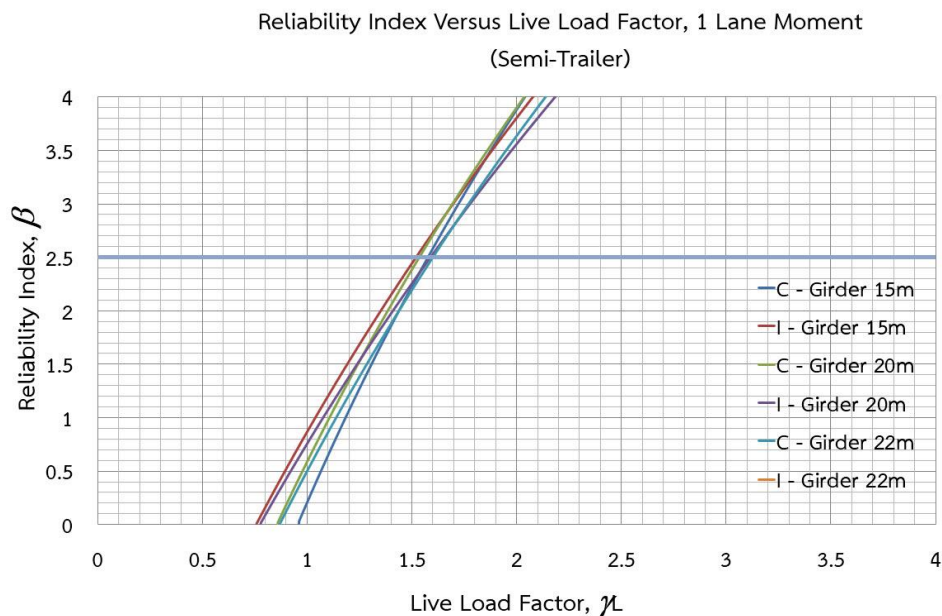


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกสิบล้อ)

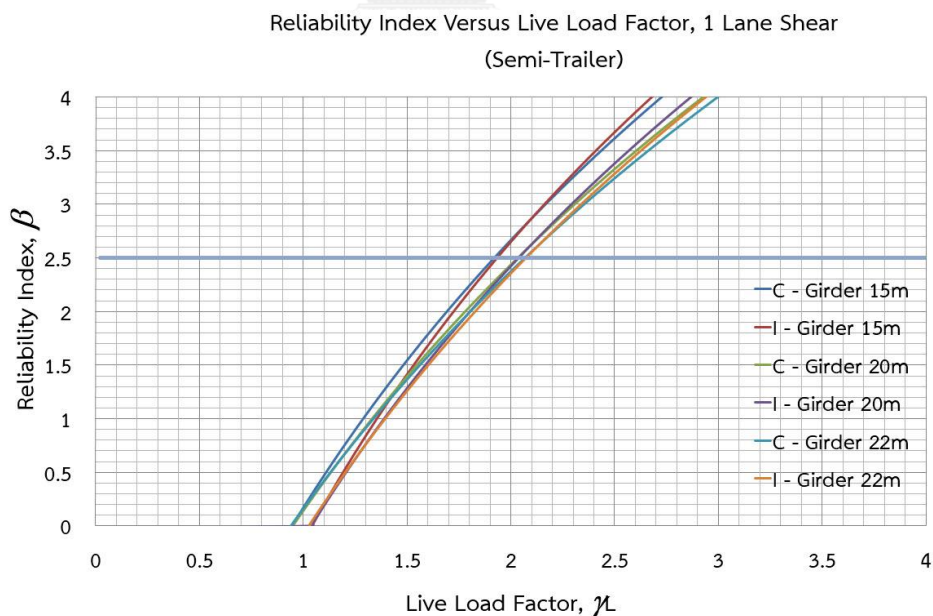


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกสิบล้อ)

การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากรถบรรทุกกึ่งพ่วง



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์คัตที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)

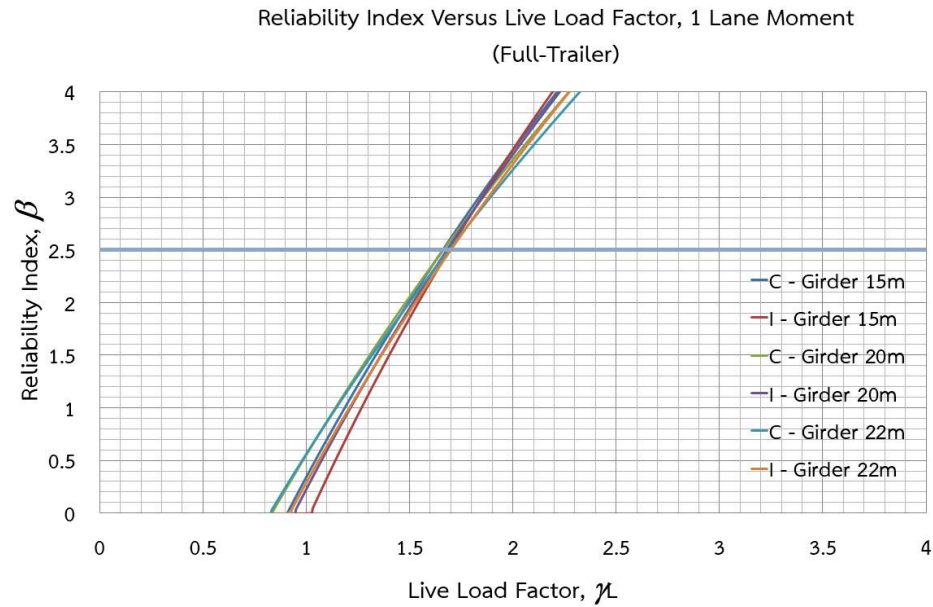


รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกกึ่งพ่วง)

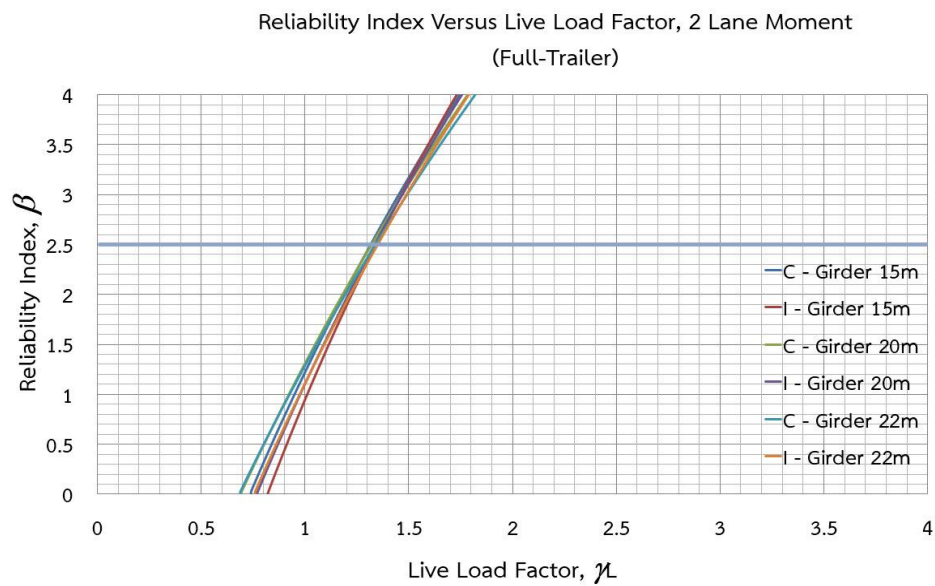
การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากรถบรรทุกพ่วง



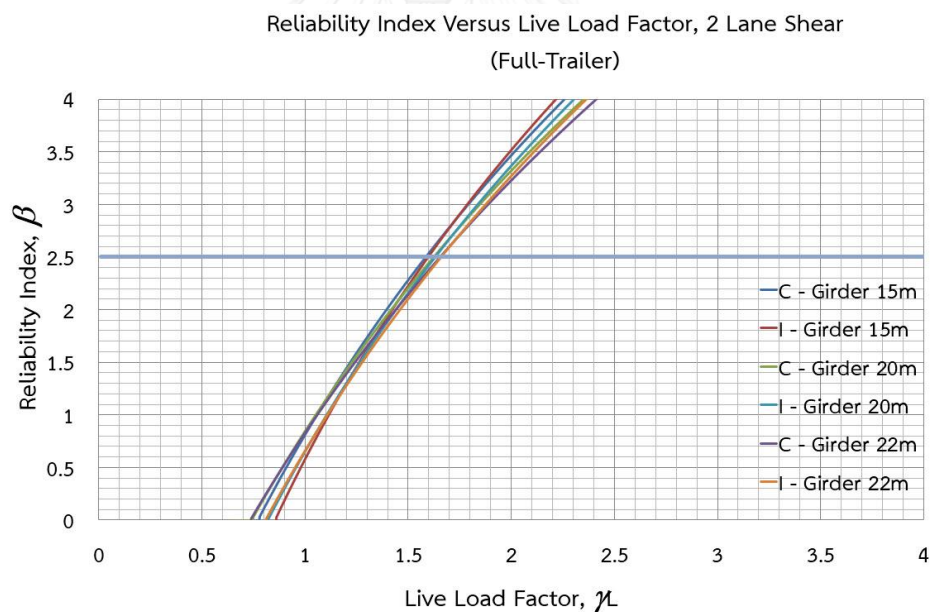
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)

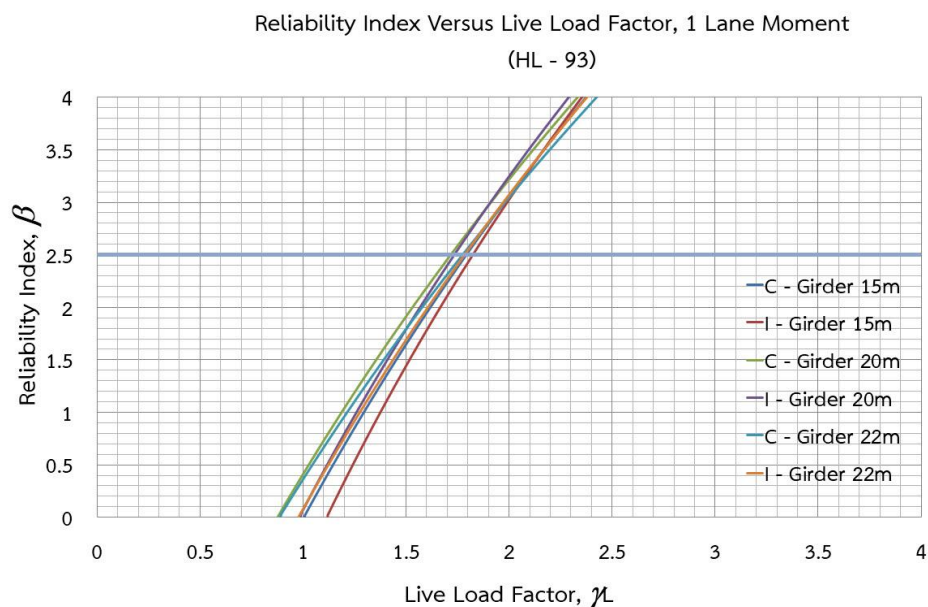


รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)

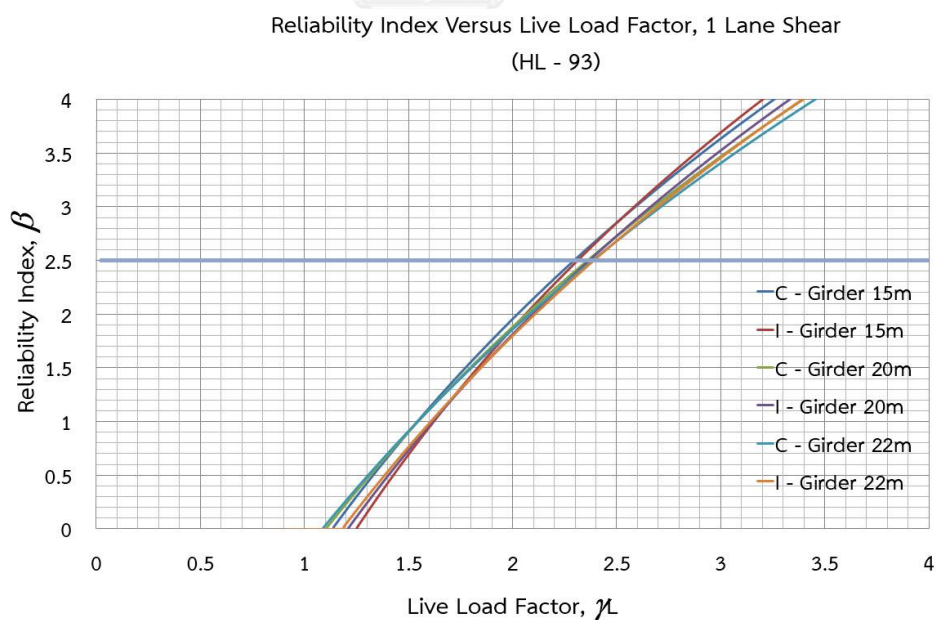


รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่สองช่องจราจร (รถบรรทุกพ่วง)

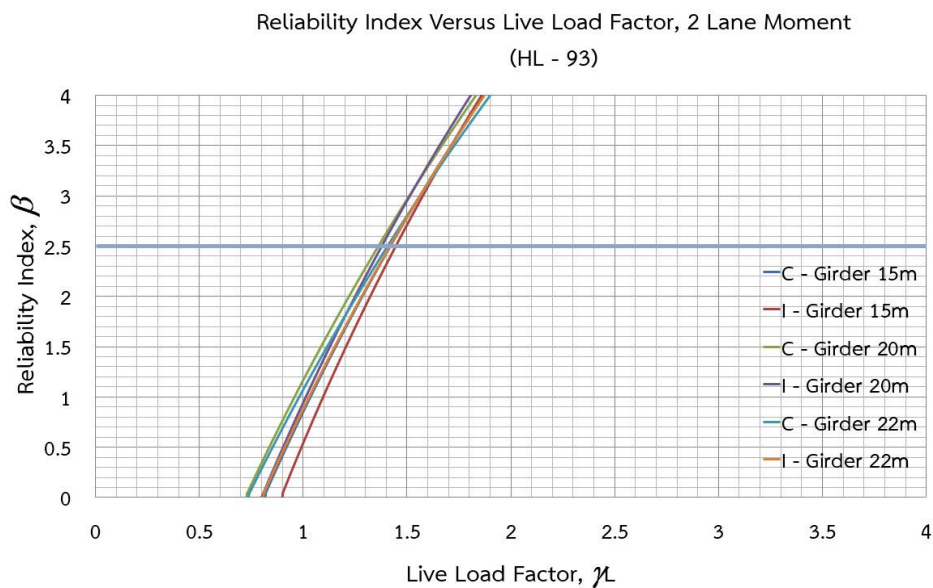
การวิเคราะห์ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO HL - 93



รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของโมเมนต์ดัดที่หนึ่งช่องจราจร (AASHTO HL - 93)



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรของแรงเฉือนที่หนึ่งช่องจราจร (AASHTO HL - 93)



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดที่สองช่องจราจร (AASHTO HL - 93)



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของแรงเฉือนที่สองช่องจราจร (AASHTO HL - 93)

ผลจากการวิเคราะห์ห้ระหว่างค่าดัชนีความเชื่อมั่นและตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกด้วยตัวแปรน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ( $L_{max}$ ) สำหรับกรณีที 2 ที่เป็นการพิจารณาเส้นความชันที่ถัดจากเส้น

ความชันสูงสุด โดยการพิจารณาในกรณีนี้ เป็นการพิจารณาที่คำนึงถึงค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์สูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักๆเช่นเดียวกับกรณีแรก

สำหรับสะพานที่หนึ่งช่องจราจร ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อกำหนดค่าดัชนีความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ 2.50 ค่า  $\gamma_L$  จะเกิดขึ้นมากที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยรถบรรทุกสิบล้อซึ่งมีค่า  $\gamma_L$  เท่ากับ 2.65 สำหรับโมเมนต์ดัด และ 3.80 สำหรับแรงเฉือน ในขณะที่รถบรรทุกกึ่งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง และรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 มีค่า  $\gamma_L$  สูงสุดที่ใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 1.60 - 1.80 สำหรับโมเมนต์ดัด และอยู่ในช่วงระหว่าง 2.10 - 2.40 สำหรับแรงเฉือน

สำหรับสะพานที่สองช่องจราจร ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร ( $\gamma_L$ ) จะเกิดขึ้นมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ด้วยรถบรรทุกสิบล้อเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ที่หนึ่งช่องจราจรซึ่งมีค่า  $\gamma_L$  เท่ากับ 2.10 สำหรับโมเมนต์ดัด และ 3.00 สำหรับแรงเฉือน ในขณะที่ รถบรรทุกกึ่งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง และรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 มีค่า  $\gamma_L$  สูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.30 - 1.45 สำหรับโมเมนต์ดัด และอยู่ในช่วงระหว่าง 1.65 - 1.90 สำหรับแรงเฉือน

### 5.3 ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง

จากการวิเคราะห์ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสะพานในสายทาง ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลจากเหตุการณ์จำลองการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์ที่อ้างอิงจากหัวข้อ 4.3 (การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจร) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่า  $L_{max}$  เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดทิศทางของการปรับเทียบตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้คือ

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ด้วยเส้นความชันสูงสุด เป็นการนำข้อมูลของกราฟ Normalized บริเวณส่วนปลายมาพิจารณา โดยข้อมูลในช่วงบริเวณส่วนปลายนี้ เป็นข้อมูลที่ได้จากรถบรรทุกส่วนน้อย และมีน้ำหนักเกินกว่ากฎหมายมากเป็นพิเศษจึงเป็นสาเหตุให้เกิดอัตราส่วนระหว่างผลของโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนที่ได้จากการจำลอง ส่วนด้วยผลของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ได้จากน้ำหนักพิกัดกฎหมาย โดยมีสัดส่วนเกือบเป็นสองเท่าของน้ำหนักพิกัดกฎหมาย และมีข้อสังเกตจากเส้นความชันบริเวณส่วนปลายที่ขาดความต่อเนื่อง มีข้อมูลของการถูกสุ่มในแบบจำลองที่น้อยกว่า 0.01เปอร์เซ็นต์ จากการจำลองรถบรรทุกทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์ ดังนั้นค่า  $\gamma_L$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ในกรณีนี้จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับประเมินสะพาน

กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ด้วยเส้นความชันถัดจากเส้นความชันแรก สำหรับกรณีนี้เป็นการพิจารณาเส้นความชันที่มีความถี่ของข้อมูลน้ำหนักบรรทุกกระยะยาว โดยมีช่วงค่าเฉลี่ยระหว่าง 40 ตัน ถึง 54 ตัน รวมถึงข้อมูลจากการสุ่มรถบรรทุกที่วิ่งเรียงกัน ผลจากการจำลองในบริเวณเส้นความชัน



สำหรับกรณีที่ 2 จึงเป็นค่าที่ได้จากน้ำหนักบรรทุกทุกส่วนใหญ่ที่บรรทุกน้ำหนักอยู่ในช่วงเข้าใกล้ น้ำหนักพิคกักฎหมายจนถึงเกินกว่าน้ำหนักพิคกักฎหมายตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ เล็กน้อย ผลของข้อมูลที่น่ามาพิจารณาจึงอยู่ในช่วงของอัตราส่วนโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนที่ได้จากการจำลอง ส่วนด้วยผลของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ได้จากน้ำหนักพิคกักฎหมาย อยู่ในช่วงระหว่าง 1.2 ถึง 1.4 และในกรณีนี้ได้คำนึงถึงผลของน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดซึ่งเป็นรถพ่วงที่มีน้ำหนัก 105 ตัน เคลื่อนผ่านสะพาน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ จึงมีความเหมาะสมที่นำไปใช้พิจารณาเลือกตัวคูณ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรรยาสำหรับการประเมินมากกว่ากรณีที่ 1

จากการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกจรรยาสำหรับทั้งสองกรณีสามารถอธิบายได้ว่า ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสะพานที่แท้จริง ควรใช้น้ำหนักบรรทุกทุกที่สูงสุด และเป็นมาตรฐานข้อกำหนดบรรทุกทุกที่ประกาศใช้ในประเทศไทย จึงเห็นสมควรเลือกใช้ประเภทของ รถบรรทุกทุกทั้งพ่วง, รถบรรทุกพ่วง มาเป็นมาตรฐานสำคัญในการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวง พิเศษหมายเลข 9 อีกทั้งงานวิจัยนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบผลของน้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า มาตรฐาน AASHTO HL - 93 เป็นอีกหนึ่งกรณีที่มีความใกล้เคียงกับรถบรรทุกทุกทั้งพ่วง และรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย

และเนื่องจากสะพานในสายทางเป็นสะพานที่รองรับการใช้งานมากกว่า 2 ช่องจราจร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรรยาสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวง พิเศษหมายเลข 9 ที่สองช่องจราจร ด้วยการคาดการณ์ในระยะเวลาที่ 5 ปี เท่ากับ 1.70 ซึ่งเป็นค่า ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน AASHTO LRFR สำหรับการประเมินสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกกฎหมาย (Legal load) ที่กำหนดไว้ที่ 1.80 สำหรับสะพานที่มี ADTT > 5,000 คัน/วัน

## CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 5.4 การประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating)

เมื่อทราบค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรรยาที่ได้จากการเปรียบเทียบสะพานในโครงข่ายสายทาง เท่ากับ 1.70 จึงนำค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรรยาดังกล่าวมาพิจารณาถึงความปลอดภัยของระบบ โครงสร้างส่วนบนของสะพานในโครงข่ายทุกช่วงพาดสะพานอันได้แก่ ช่วงพาดสะพานที่ 15 เมตร, 20 เมตร และ 22 เมตร อีกทั้งระบบของคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีทั้งระบบคานรูปตัวไอ (คานด้านใน) และคานรูปตัวซี (คานด้านริม) ประกอบกับปัจจัยการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานซึ่งสะพานถูกละ ความสามารถในการต้านทานแรงด้วยค่า  $\phi_c$  เท่ากับ 0.85 โดยมีรายละเอียดการคำนวณค่าอัตราส่วน ความปลอดภัยสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายที่อ้างอิงจากหัวข้อ 2.5 (อัตราส่วนความปลอดภัยในการประเมินโครงสร้างสะพาน) ตามมาตรฐาน AASHTO จากสมการที่ 2.41 ของทั้ง โมเมนต์ดัด และแรงเฉือนดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 อัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating) ด้านโมเมนต์ดัดที่ระดับ Operating level ของ สะพาน

ช่วงพาด สะพาน (เมตร)	ระบบโครงสร้าง ส่วนบน	รถบรรทุกสิบล้อ	รถบรรทุกกึ่งพ่วง	รถบรรทุกพ่วง	HL - 93
15	I - Girder	2.46	1.89	2.06	1.96
	C - Girder	2.60	1.99	2.18	2.07
20	I - Girder	3.04	2.10	2.27	2.12
	C - Girder	3.11	2.15	2.32	2.16
22	I - Girder	3.30	2.19	2.34	2.20
	C - Girder	3.18	2.12	2.26	2.13

ตารางที่ 5.4 อัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating) ด้านแรงเฉือนที่ระดับ Operating level ของ สะพาน

ช่วงพาด สะพาน (เมตร)	ระบบโครงสร้าง ส่วนบน	รถบรรทุกสิบล้อ	รถบรรทุกกึ่งพ่วง	รถบรรทุกพ่วง	HL - 93
15	I - Girder	2.19	1.29	1.35	1.46
	C - Girder	3.79	2.23	2.34	2.53
20	I - Girder	2.65	1.53	1.58	1.67
	C - Girder	4.15	2.40	2.48	2.62
22	I - Girder	2.43	1.40	1.44	1.51
	C - Girder	3.86	2.22	2.28	2.39

ดังนั้นจากผลการศึกษาอัตราส่วนความปลอดภัยของระบบโครงสร้างส่วนบนของสะพานด้วยการนำค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรรยาที่ได้จากการเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 5.3 ที่มีค่า  $\gamma_L = 1.70$  มาเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการประเมินโครงสร้างสะพาน พบว่า โครงสร้างสะพานในสายทางยังสามารถอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยตามมาตรฐานสากล

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการพัฒนาตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรแบบเฉพาะเจาะจงสำหรับการประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษ หมายเลข 9 เพื่อให้ผลการประเมินสะพานสะท้อนค่าระดับความปลอดภัยที่แท้จริง ตามลักษณะการบรรทุกน้ำหนักของยานยนต์จริงในสายทาง ด้วยหลักเกณฑ์และเงื่อนไขด้านความปลอดภัยตามมาตรฐาน AASHTO LRFR โดยอาศัยข้อมูลการตรวจชั่งน้ำหนักบรรทุกระยะยาวจากสะพานชั่งน้ำหนักแห่งหนึ่งโครงข่ายทางหลวง ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด อุปกรณ์ตรวจจับเพลลา และกล้อง แล้วทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ทำให้สามารถทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่แท้จริงที่ใช้งานในสายทาง อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์หาตัวคูณน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสม

ผลจากการตรวจวัดระยะยาวซึ่งพิจารณาเฉพาะรถบรรทุกตั้งแต่สี่ล้อขึ้นไป สามารถตรวจวัดข้อมูลยานยนต์ทั้งสิ้น 4,112 คัน แบ่งตามประเภทของยานยนต์เป็น รถบรรทุกสี่ล้อจำนวน 2,024 คัน (คิดเป็นสัดส่วน 49.22%) รถบรรทุกกึ่งพ่วง 5 เพลลา 18 ล้อจำนวน 636 คัน (คิดเป็นสัดส่วน 15.47%) รถบรรทุกกึ่งพ่วง 6 เพลลา 22 ล้อจำนวน 998 คัน (คิดเป็นสัดส่วน 24.27%) รถบรรทุกพ่วง 5 เพลลา 18 ล้อจำนวน 177 คัน (คิดเป็นสัดส่วน 4.30%) และรถบรรทุกพ่วง 6 เพลลา 22 ล้อจำนวน 277 คัน (คิดเป็นสัดส่วน 6.74%) ทั้งนี้ผลจากข้อมูลทั้งหมดพบว่ามีจำนวนยานยนต์ที่บรรทุกเกินพิกัดกฎหมายอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ยของยานยนต์เท่ากับ 30.99 ตัน น้ำหนักบรรทุกต่ำสุดที่ 9.90 ตัน และน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 105.33 ตัน ซึ่งเป็นกรณีของรถบรรทุกพ่วง 6 เพลลา

ข้อมูลน้ำหนักและลักษณะของยานยนต์จริงข้างต้น จะนำมาเก็บเป็นฐานข้อมูลยานยนต์ซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความน่าเชื่อถือของโครงสร้างสะพานในสายทาง ตามรูปแบบการก่อสร้างสะพานซึ่งอ้างอิงตามแบบรายละเอียด รวมถึงค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ได้จากข้อมูลการทดสอบวัสดุของกรมทางหลวง และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่ได้จากการเก็บข้อมูลของ Nowak (1999) สำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุกจร เช่น ค่าตัวคูณการกระจายน้ำหนัก ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน ความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกเคลื่อนผ่านสะพานพร้อมกันหลายคัน และตัวประกอบการกระจายทางพลศาสตร์ ได้อ้างอิงจากข้อมูลของกรมทางหลวง งานวิจัยภายในประเทศ และมาตรฐานต่างประเทศ

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด จากการจำลองเหตุการณ์การใช้งานสะพาน จะใช้คอมพิวเตอร์สุ่มเวลายานจากฐานข้อมูลเวลายานที่บันทึกได้จำลองการเคลื่อนที่ผ่านสะพานจำนวน 5,000,000 เหตุการณ์เป็นตัวแทน แล้วจึงทำการคาดการณ์ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด หากพิจารณาการใช้งานสะพานที่ยาวนาน 5-75 ปี วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาสะพานในสายทาง ซึ่งประกอบด้วยสะพานที่มีช่วงพาด 15.00 เมตร 20.00 เมตร และ 22.00 เมตร ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์ จะถูกนำไปสร้างกราฟ Normalized สำหรับการหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุด สามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็น 2 กรณี จากเส้นความชันที่ได้จากการแนวโน้มของกราฟ Normalized ที่มีพฤติกรรมที่น้ำหนักบรรทุกหนักมาก 2 แบบ โดยกรณีที่ 1 เป็นค่าความชันสูงสุดซึ่งเป็นผลที่ได้จากข้อมูลการ Normalized ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดซึ่งมีน้ำหนักมากเป็นพิเศษเคลื่อนที่ผ่านสะพานที่จำลอง โดยชุดข้อมูลของเส้นความชันช่วงสูงสุดนี้ เป็นผลจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักสูงที่สุด 105.33 ตันวิ่งเรียงกับรถบรรทุกหนักอื่น ทำให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ขาดความต่อเนื่อง โดยมีสัดส่วนค่าโมเมนต์และแรงเฉือนเกือบเป็นสองเท่าของค่าโมเมนต์และแรงเฉือนสูงสุดของสะพานที่เกิดจากน้ำหนักตามมาตรฐาน AASHTO HL - 93 และน้ำหนักบรรทุกทุกตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวง ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการเลือกใช้ค่าความชันที่ไม่พิจารณาผลของข้อมูลรถบรรทุกหนักมากเป็นพิเศษ ทำให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ โดยมีแนวโน้มของความชันที่เป็นลักษณะเส้นตรง

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในช่วงระยะเวลาใช้งานสะพานต่างๆ พบว่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าแตกต่างกันเพียง 2% สำหรับการเปรียบเทียบระยะเวลาใช้งาน 5 ปีกับ 10 ปี และมีค่าแตกต่างกันประมาณ 7% สำหรับการเปรียบเทียบระยะเวลาใช้งาน 5 ปีกับ 75 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการบรรทุกหนักของเวลายานในสายทางหลวงพิเศษนี้ในช่วงระยะเวลาใช้งานสะพาน 5-75 ปี จะไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในช่วงระยะเวลาใช้งานสะพาน 5 ปี สำหรับการประเมินสะพานในสายทาง ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน AASHTO LRFR ที่แนะนำช่วงระยะเวลาที่ควรพิจารณาไว้ที่ 5 ปีเช่นกัน

จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่น จากหัวข้อ 2.3.2 (ดัชนีความเชื่อมั่นและ การเลือกค่าเป้าหมาย) ตามสมการที่ 2.27 ซึ่งได้แบ่งการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่นตามผลของค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี ซึ่งพบว่า

กรณีที่ 1 ที่ระดับความชันสูงสุด ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก  $\gamma_L$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อมั่นสำหรับการประเมิน ( $\beta = 2.50$ ) เมื่อสะพานมีหนึ่งช่องจราจรมีคาระหว่าง 3.00 - 3.20 สำหรับค่าโมเมนต์ดัด และ 4.40 - 4.70 สำหรับค่าแรงเฉือน ในขณะที่  $\gamma_L$  เมื่อสะพานมีสองช่องจราจรมีคาระหว่าง 2.40 - 2.50 สำหรับค่าโมเมนต์ดัด และ 3.50 - 3.90 สำหรับค่าแรงเฉือน

กรณีที่ 2 ที่ระดับความชันที่ไม่พิจารณาผลของข้อมูลรถบรรทุกหนักมากเป็นพิเศษ พบว่า  $\gamma_L$  เมื่อสะพานมีหนึ่งช่องจราจรมีค่าระหว่าง 1.60 – 1.80 สำหรับค่าโมเมนต์ดัด และ 2.10 – 2.40 สำหรับค่าแรงเฉือน ในขณะที่  $\gamma_L$  เมื่อสะพานมีสองช่องจราจรมีค่าระหว่าง 1.30 – 1.45 สำหรับค่าโมเมนต์ดัด และ 1.65 – 1.90 สำหรับค่าแรงเฉือน

จากการวิเคราะห์ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกของทั้งสองกรณีนี้ พบว่า  $\gamma_L$  ที่ได้จากกรณีที่ 1 นั้นมีค่าสูงกว่ากรณีที่ 2 เป็นผลเนื่องจากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด ( $\bar{L}_{max}$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่า  $\gamma_L$  โดยในกรณีที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยทฤษฎีแกมเบล ที่ได้จากการสุ่มในแบบจำลองที่น้อยกว่า 0.01% จากเหตุการณ์จำลองรถบรรทุกทั้ง 5,000,000 เหตุการณ์ ในขณะที่  $\gamma_L$  ที่ได้จากกรณีที่ 2 เป็นการพิจารณาข้อมูลช่วงความถี่ของรถบรรทุกที่มีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 40-54 ตัน และเป็นช่วงที่ข้อมูลมีความถี่สูง

ดังนั้นผลจากการปรับเทียบค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสำหรับการประเมินที่เหมาะสมวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้ใช้ค่า  $\gamma_L$  ที่ 1.70 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ควบคุมด้วยผลของแรงเฉือนในสะพานที่ยึดตามผลการวิเคราะห์จากกรณีที่ 2 สำหรับใช้ประเมินสะพานในโครงข่ายทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ซึ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย (Load rating) ของโครงสร้างสะพานในโครงข่ายสายทางดังกล่าว พบว่าโครงสร้างสะพานมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ระดับ Operating level ต่ำสุดที่ 1.29 ผลการประเมินดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแม้สายทางจะมีจำนวนรถบรรทุกหนักเกินพิกัดกฎหมายอย่างมีนัยสำคัญ แต่โครงสร้างสะพานยังมีระดับความปลอดภัยในการใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐานสากล

อย่างไรก็ดี ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการวิจัย เป็นผลจากการพิจารณาเฉพาะเส้นทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ช่วงถนนกาญจนาภิเษกวงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานครฝั่งใต้เท่านั้น ดังนั้นการนำค่า  $\gamma_L$  ดังกล่าวไปใช้ประเมินความปลอดภัยสะพานในสายทางอื่น จะให้ผลการประเมินที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อยอดยานที่บรรทุกหนักในสายทางที่พิจารณามีพฤติกรรมการบรรทุกหนักที่ใกล้เคียงกับเส้นทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 แต่หากพฤติกรรมการบรรทุกหนักในสายทางที่พิจารณามีความแตกต่าง ก็ควรทำการสุ่มตรวจชั่งน้ำหนักยวดยานในระยะสั้น (อย่างน้อย 7 วัน) เพื่อให้ทราบถึงการกระจายของน้ำหนักบรรทุกที่แท้จริง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาค่า  $\gamma_L$  ที่เหมาะสม โดยการปรับเทียบค่ากับผลการศึกษานี้โดยตรง ทำให้สามารถประเมินสะพานในสายทางได้สะดวก โดยไม่จำเป็นต้องทำการจำลองเหตุการณ์ยวดยานจำนวนเป็นล้านเหตุการณ์อีก

## รายการอ้างอิง

American Association of State Highway and Transportation Officials" (1999). AASHTO LRFD Bridge Design Specification. Washington, D.C., AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials" (2007). AASHTO LRFD Bridge Design Specification. Washington, D.C., AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials" (2011). The Manual For Bridge Evaluation. Washington, D.C., AASHTO.

Ang, T. (2007). Probability Concepts in Engineering. New York, JohnWiley & Sons.

Federal Highway Administration" (1988). Revisions to the National Bridge Inspection Standard. Washington, D.C., US Department of Transportation.

Gongkang Fu, C. F. (2006). NCHRP Synthesis 359, Bridge Rating Practices and Policies for Overweight Vehicles. Washington, D.C., National Cooperative Highway Research Program.

Mark Mlynarski, W. G. W., Andrzej S. Nowak (2011). NCHRP Report 700, A Comparison of AASHTO Bridge Load Rating Methods, National Cooperative Highway Research Program.

Michel Ghosn, B. S., Feng Miao (2011). Final Report Load and Resistance Factor Ratingg (LRFR) in New York State, Department of Civil Engineering, The City College of The City University of New York. I.

Moses, F. (2001). NCHRP Report 454, Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation. Washington, D.C., National Cooperative Highway Research Program.

Neal Lake, H. N., Rudolph Kotze (2014). Review of AS 5100.7 Rating of Existing Bridges and the Bridge Assessment Group Guidelines. Australia.

Nowak, A. S. (1999). NCHRP Report 368, Calibration of LRFD Bridge Design Code. Washington, D.C., National Cooperative Highway Research Program.

กิตติ จิวโพธิ์เจริญ" (2009). การศึกษาการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยและอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานแบบแผ่นพื้น, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.

ธวัช อัครวิทยานุกูล" (2003). การเพิ่มความถูกต้องของการหาคำนวณน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.

ธีระชัย ดิสมสุข", ทศพล ปิ่นแก้ว," (2008). "ระดับความปลอดภัยในการใช้งานของสะพานภายใต้สภาพการบรรทุกน้ำหนักจริง." การสัมมนาทางครั้งที่ 3.

ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ (2014). ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือ น้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนด. ก. กระทรวงคมนาคม.

पालพิพัฒน์ แสงชูวงศ์" (2007). การหาคำนวณน้ำหนักบรรทุกจากโมเมนต์ดัดของสะพานโดยปราศจากการตรวจจับเพลา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.

พัชรพงษ์ อาสนจินดา" (2004). การหาคำนวณน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.

ภาณุ พุ่งสุข" (2005). การหาคำนวณน้ำหนักบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.

ราชวัลลภ กัมพูพงศ์" (2013). โครงการทดสอบสะพานกรรมทางหลวงภายใต้การกระตุ้นแบบพลวัต เนื่องจากการจราจรและแผ่นดินไหวเพื่อปรับปรุงการออกแบบและเสริมกำลัง, สำนักงานวิจัยและพัฒนา," กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

สมาวิษฐ์ พฤษ์จินดา" (2014). แบบจำลองน้ำหนักรถบรรทุกสำหรับการออกแบบสะพานของประเทศไทย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.

เอกวิทย์ ชันแก้ว", ทศพล ปิ่นแก้ว", (2012). ตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่างๆบนพื้นสะพานจากการตรวจวัดสะพานจริงด้วยผลการตรวจวัดการสั่นไหวของสะพานจริงภายใต้สภาพการจราจรปกติของรถบรรทุก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.







ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่

Dead load type	AASHTO LRFD	
	Bias factor	Coefficient of variation
Pre – fabricated member	<u>1.03</u>	<u>8%</u>
Cast in place member	<u>1.05</u>	<u>10%</u>
Wearing surface	<u>1.00</u>	<u>25%</u>

ตารางที่ ก.2 พารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับการต้านทานสะพานสำหรับโครงสร้างส่วนบนแบบ I - Girder

กรมทางหลวง				AASHTO LRFD			
Bias factor		Coefficient of variation		Bias factor		Coefficient of variation	
<u>1.05</u>	<u>1.19</u>	2.50%	9.00%	1.05	1.15	<u>7.5%</u>	<u>14%</u>

ตารางที่ ก.3 ตัวประกอบการกระแทกทางพลศาสตร์ ( $IM$ )

กรมทางหลวง		AASHTO LRFD	
Impact factor	Coefficient of variation	Impact factor	Coefficient of variation
<u>1.10</u>	7.00%	1.33	<u>9.00%</u>

ตารางที่ ก.4 ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (ADTT)

กรมทางหลวง	AASHTO LRFR
ADTT = 8,573	ADTT $\geq$ 5,000
ADTT = 8,573	ADTT = 1,000
ADTT = 8,573	ADTT $\leq$ 100

ตารางที่ ก.5 ความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกวิ่งบนสะพานพร้อมกันหลายคัน ( $P_{s \times s}$ )

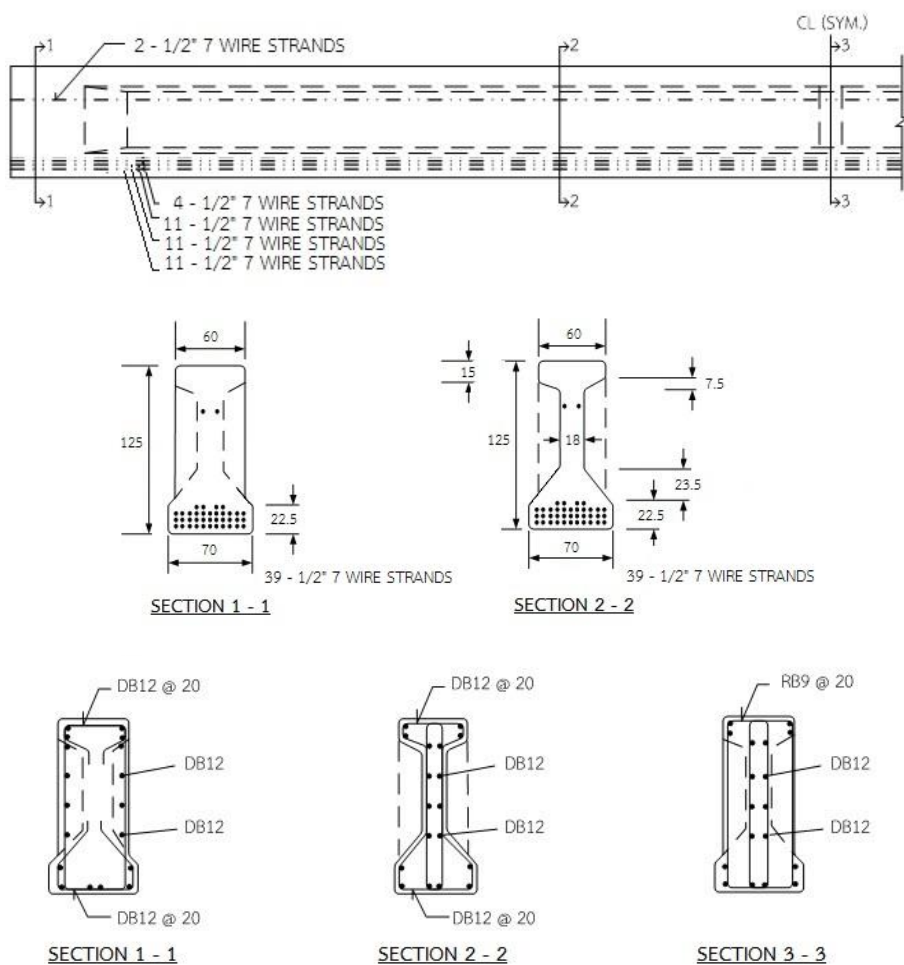
กรมทางหลวง	AASHTO LRFD
2.00%	6.67%



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการคำนวณสำหรับคานคอนกรีตอัดแรง

การคำนวณหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอสำหรับช่วงพาดสะพานที่ 22.00เมตร ตรวจสอบที่สภาวะประลัย (Investigate strength limit state)



รูปที่ ข.1 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่ช่วงพาดสะพาน 22เมตร

1. ตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัย (Ultimate Flexural Strength)

$$k = 2 \left( 1.04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) = 2(1.04 - 0.9) = 0.28$$

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05}{7}(30\text{Mpa} - 28\text{Mpa}) = 0.836$$

$$c = \frac{A_{ps}f_{pu} + A_s f_y - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_1 b + k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p}} = \frac{(3652)(1873) + (1130)(300) - (905)(300)}{0.85(0.836)(30)(2500)} = 129.7\text{mm}$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - k \frac{c}{d_p}\right) = 1873 \left(1 - 0.28 \frac{129.7}{1345.3}\right) = 1822\text{Mpa}$$

$$a = \beta_1 c = 0.836 \times 129.7 = 108.4\text{mm}$$

ดังนั้นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงจึงมีค่าเท่ากับ

$$M_n = \phi \left( A_{ps} f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_y \left( d'_s - \frac{a}{2} \right) + 0.85 f'_c (b - b_w) \beta_1 h_f \left( \frac{a}{2} - \frac{h_f}{2} \right) \right)$$

$$= 870\text{Ton} \cdot \text{m}$$

## 2. ตรวจสอบแรงเฉือน (Shear)

$$d_v = d_e - \frac{a}{2} = 1345 - \frac{108.4}{2} = 1290.8\text{mm}$$

$$\geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0.9d_e = 0.9(1345) = 1210\text{mm} \\ 0.72h = 0.72(1450) = 1044\text{mm} \end{array} \right\}$$

$$\text{use : } d_v = 1290.8\text{mm}$$

$$v = \frac{V_u}{\phi b_v d_v} = \frac{878 \times 10^3}{0.9(180)(1290.8)} = 4.19\text{Mpa}$$

$$\frac{v_u}{f'_c} = \frac{4.19}{45} = 0.093$$

$$P_e = 0.80 \times 0.80 \times 37 \times 0.18 = 4.26\text{MN}$$

$$e = 0.44\text{m}$$

$$f_{pe} = (0.80)(0.80)(1873) = 1198.7$$

$$f_{pc} = \frac{-P_e}{A_c} + \frac{P_e (y_{bc} - y_b)}{I_g} + \frac{M_{DC1} (y_{bc} - y_b)}{I_g} = 2.15 \text{ Mpa}$$

$$f_{po} = f_{pe} + \frac{f_{pc} E_p}{E_c} = 1212.4 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{M_u}{d_v} + 0.5V_u \cot \theta - A_{ps} f_{po}}{E_s A_s + E_p A_{ps}} = -0.0003 \text{ (Compression)}$$

ในกรณีที่  $\varepsilon_x$  เป็นค่าลบ(แรงอัด) ให้คูณปรับแก้ด้วย  $F_\varepsilon$

$$F_\varepsilon = \frac{E_s A_s + E_p A_{ps}}{E_c A_c + E_s A_s + E_p A_{ps}} = 0.43$$

$$\varepsilon_x = F_\varepsilon \times \varepsilon_x = (0.43)(-0.0003) = -0.000142$$

หาค่า  $\beta$  จากการปรับเทียบค่าระหว่าง  $\varepsilon_x$  และ  $\frac{v}{f_c}$  ตามรูปที่ 2.10 และแทนค่าลงใน

ตารางปรับเทียบ

ตารางที่ ข.1 วิธีการปรับเทียบค่า  $\beta$  (LRFD 5.8.3.4.2-1)

$\frac{v_u}{f_c}$	$\varepsilon_x \times 1000$		
	-1.500	-0.143	-0.100
0.075	6.170	5.647	5.630
0.093	5.950	5.413	5.396
0.100	5.870	5.327	5.310

$$V_c = 0.083\beta\sqrt{f_c}b_v d_v = 0.083(5.41)(\sqrt{45})(180)(1291) \times 10^{-3} = 700 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v}{s} = \frac{2(2 \times 113)(300)(1091.1)}{200 \times 1000} = 740 \text{ kN}$$

$$V_n = V_c + V_s = 1440 \text{ kN}$$

3. ตรวจสอบอัตราส่วนความปลอดภัยในการประเมินโครงสร้างสะพาน

$$RF = \frac{(\phi_c \phi_s R_n) - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL + IM)(DF)}$$

จากสมการที่ (4.11) และ (4.13) สำหรับการหาค่าตัวคูณการกระจายน้ำหนัก  $DF$  (Distribution factor) สำหรับทั้งโมเมนต์ตัดที่สองช่องจราจรคือ

$$\overline{DF} = 0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} = 0.075 + \left(\frac{2500}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{2500}{22000}\right)^{0.2} (1)^{0.1} = 0.66$$

และแรงเฉือนที่สองช่องจราจรคือ

$$\overline{DF} = 0.2 + \frac{S}{3600} - \left(\frac{S}{10700}\right)^2 = 0.2 + \frac{2500}{3600} - \left(\frac{2500}{10700}\right)^2 = 0.84$$

ดังนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยในการประเมินโครงสร้างสะพานคือ

$$RF_{moment} = \frac{(0.85 \times 870) - (1.25)(70 + 72.6) - (1.5)(18.15)}{(1.70)(195.25 \times 1.10)(0.66)} = 2.19$$

$$RF_{shear} = \frac{(0.85 \times 144) - (1.25)(12.72 + 13.20) - (1.5)(3.30)}{(1.70)(38.77 \times 1.10)(0.84)} = 1.40$$

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เอกชาติ เพ็ชรอัฐขาว เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม พ.ศ.2532 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอัสสัมชัญ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2555

