

ตัวประกอบการกระทำแตกต่างกันตามตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นสะพานจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม

นายเอกวิทย์ ชันแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย



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 Graduate School.

IMPACT FACTOR AT DIFFERENT LOCATIONS ON BRIDGE SLABS
FROM FIELD TEST DATA

Mr. Ekgawit Khunkaew

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นสะพาน
	จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม
โดย	นายเอกวิทย์ ชันแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ชีรพงศ์ เสนอจันทร์ฉิมไชย)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา)

เอกวิทย์ ชันแก้ว : ตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นสะพานจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม. (IMPACT FACTOR AT DIFFERENT LOCATIONS ON BRIDGE SLABS FROM FIELD TEST DATA) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 156 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพานจากผลการตรวจวัดการสั่นไหวของสะพานจริงภายใต้การจราจรปกติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานกับตำแหน่งอื่น ๆ เพราะงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตรวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องพิจารณาตัวประกอบการกระแทกของสะพานเป็นค่าคงที่ตลอดความยาวสะพานเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน โดยคำนึงเฉพาะตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ด้วยอาจมีสมมติฐานว่าตำแหน่งดังกล่าวมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุด ซึ่งอาจไม่ถูกต้องและนำไปสู่การวิเคราะห์ออกแบบสะพานที่ไม่สอดคล้องความเป็นจริงและไม่ปลอดภัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน โดยมีการตรวจวัดค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ของสะพาน ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดสะพานได้ สะพานที่ศึกษาเป็นสะพานช่วงเดียวยาวประมาณ 10 เมตร มีรูปแบบโครงสร้างเป็นระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูป การตรวจวัดกระทำภายใต้สภาพการจราจรปกติ ซึ่งเน้นการพิจารณาเฉพาะรถบรรทุกสิบล้อเพราะเป็นรถที่มีน้ำหนักต่อเพลามาก ผลการตรวจวัดค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานอย่างมีนัยสำคัญ โดยสอดคล้องกับผลการศึกษาดูด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อีกทั้งยังพบว่าค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งอาจทำให้การวิเคราะห์ออกแบบสะพานไม่ถูกต้องและปลอดภัยเท่าที่ควร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงแนวทางในการพิจารณาและกำหนดค่าตัวประกอบการกระแทกให้เหมาะสมยิ่งขึ้นต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2554.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5370590021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : IMPACT FACTOR /BRIDGES /FIELD TEST

EKGAWIT KHUNKAEW : IMPACT FACTOR AT DIFFERENT LOCATIONS ON BRIDGE SLABS FROM FIELD TEST DATA. ADVISOR : ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, D.Eng., 156 pp.

This research studies the impact factor at different locations on a bridge slab from monitoring of actual bridge responses under normal traffic condition. The main objective is to compare the impact factors at mid-span with other bridge locations because, for convenience, the existing research studies as well as relevant design standards treat the impact factor as a constant value throughout the bridge length. The impact factors were commonly considered only at bridge's mid-span assuming the value is higher than other locations. However, this assumption might be incorrect and possibly leads to an unsafe bridge design. Therefore, this research studies the impact factors at different locations on bridge slabs from field test data. The bridge strain histories are measured at $L/3$, $L/2$ and $2L/3$. Then the corresponding bridge moments at those sections can be obtained. The bridge is pre-stressed concrete slab with a simply supported span having length of 10 meters. The bridge responses under normal traffic condition are monitored. The impact factors induced by the passing 10-wheel trucks are of interest. Similar to the analytical study, the measured results show that the impact factors at other locations can significantly higher than those obtained at bridge's mid-span. In addition, the obtained values indicate the possibility of having the values higher than that specified in the design standards. This may lead to the under-design of the bridge deck. Therefore, the modification or improvement of the bridge's impact factor should be addressed.

Department :Civil Engineering..... Student's Signature

Field of Study :Civil Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year :2011.....

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณปู่ และคุณย่า รวมทั้งครูบาอาจารย์ ที่ให้การอุปถัมภ์และอบรมสั่งสอนเป็นอย่างดี จนทำให้กระผมได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงานตามที่มุ่งหวังได้มาจนถึงบัดนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ รวมถึงการให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการทำวิจัยและการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้อย่างยิ่งมาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี และศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนอจันทร์ชัย ที่ให้ความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี และอาจารย์ ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา ที่ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งคณาจารย์ทุกท่านได้ให้ความกรุณาตรวจแก้และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างยิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้

ขอขอบคุณคณะทำงานของหน่วยงานบัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน รวมทั้งคุณวรรณภา ช้างเกิด อธิการภาคส่วนประสานงานบัณฑิตศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือประสานงานด้านระเบียบการและเอกสารต่าง ๆ เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตที่อยู่ในความดูแลของ รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.ธีระชัย ดีสมสุข คุณไพโรจน์ วัชมานันท์ และคุณปานนท์ ลาขโรจน์ ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างยิ่งตลอดงานวิจัยนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงตามเป้าหมายด้วยดี รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างทุกท่าน

ท้ายที่สุดนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่มีความสนใจศึกษา และเป็นข้อมูลการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ เพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	2
1.2.2 การศึกษาแบบทดสอบจริงภาคสนาม.....	12
1.2.3 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบทดสอบจริงภาคสนาม.....	14
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	20
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	20
1.4.1 การศึกษาแบบจำลองสะพานทางคณิตศาสตร์.....	20
1.4.2 การศึกษาแบบทดสอบสะพานจริงภาคสนาม.....	20
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย.....	21
1.6 การดำเนินงานวิจัย	21
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.1 ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน.....	23
2.1.1 การจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23
2.1.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน.....	24
2.1.3 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก.....	31
2.1.4 การจำลองความขรุขระของผิวทาง	36
2.1.5 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน	38

2.2	ตัวประกอบการกระแทก	42
2.2.1	นิยาม.....	43
2.2.2	มาตรฐานเกี่ยวกับตัวประกอบการกระแทก	43
2.3	การคำนวณค่าตัวประกอบการกระแทก.....	45
2.3.1	ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน	46
2.3.2	ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติของสะพาน.....	48
2.3.3	ค่าตัวประกอบการกระแทก	49
บทที่ 3	วิธีการศึกษา.....	50
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	51
3.1.1	คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองสะพานและแบบจำลอง รถบรรทุก	51
3.1.2	ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	53
3.1.3	ขั้นตอนการทำงานในคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์	54
3.2	การทดสอบภาคสนาม.....	56
3.2.1	คุณสมบัติของสะพานทดสอบ	56
3.2.2	การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดสำหรับสะพาน	59
3.2.3	สัญญาณค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	62
3.2.4	คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม	63
3.2.5	การจำแนกข้อมูลรถบรรทุกตามตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์	68
3.3	การหาค่าตัวประกอบการกระแทก	74
3.3.1	การประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์ของหน้าตัด.....	74
3.3.2	การประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติของหน้าตัด	76
3.3.3	การหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	78
บทที่ 4	ผลการศึกษา.....	82
4.1	ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	82
4.1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ	82

4.1.2	ตัวประกอบการกระแทกจากผลตอบสนองในรูปแบบของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน.....	99
4.1.3	ผลเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน.....	100
4.2	ผลการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม.....	104
4.2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ	104
4.2.2	ตัวประกอบการกระแทกจากโมเมนต์ดัดของสะพานที่ตำแหน่งต่าง ๆ	114
4.2.3	ผลเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน.....	115
4.3	การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม.....	118
4.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก	118
4.3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุก	121
4.3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก	124
4.3.4	พฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ	128
4.4	ผลเปรียบเทียบระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามกับค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO.....	129
4.5	ความเป็นได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน.....	131
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	134
5.1	สรุปผล.....	134
5.1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ	134
5.1.2	พฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ	135

5.1.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม.....	136
5.1.4 ผลเปรียบเทียบระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามกับค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO	138
5.1.5 ความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน.....	138
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	156

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองสะพาน	51
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองรถบรรทุก	52
ตารางที่ 3.3	ค่าสติฟเนสของล้อและระบบกันสะเทือนของแบบจำลองรถบรรทุก	53
ตารางที่ 3.4	ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..	54
ตารางที่ 3.5	คุณสมบัติของสะพานทดสอบ	58
ตารางที่ 3.6	คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม	63
ตารางที่ 3.7	ตัวอย่างข้อมูลของรถบรรทุกสิบล้อ (B-WIM) จากจำนวน 4,975 คัน	67
ตารางที่ 3.8	คุณสมบัติของสะพานและค่าขอบเขตของข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากการ ทดสอบภาคสนาม.....	68
ตารางที่ 3.9	พฤติกรรมของรถบรรทุกในกรณีวิ่งช่องทางต่าง ๆ	74
ตารางที่ 3.10	ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดของแบบทดสอบสะพาน,	75
ตารางที่ 4.1	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับน้ำหนักรวม ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน.....	88
ตารางที่ 4.2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็ว ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน.....	93
ตารางที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่าง เพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน	98
ตารางที่ 4.4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับน้ำหนักรวม ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน.....	106
ตารางที่ 4.5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับน้ำหนักรวม ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน โดยพิจารณาแบ่งแยกตามช่วง ของน้ำหนักรวม	107
ตารางที่ 4.6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็ว ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน.....	110
ตารางที่ 4.7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่าง เพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน	113

ตารางที่ 4.8	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการระแทกกับน้ำหนักรวม ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม	121
ตารางที่ 4.9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการระแทกกับความเร็ว ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์และการทดสอบภาคสนาม.....	124
ตารางที่ 4.10	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการระแทกกับระยะห่าง เพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์และการทดสอบภาคสนาม.....	127
ตารางที่ ผ.1	ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน	144
ตารางที่ ผ.2	ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามความเร็วของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน	146
ตารางที่ ผ.3	ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน	148
ตารางที่ ผ.4	ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามน้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบ ภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน	150
ตารางที่ ผ.5	ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามความเร็วเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน	152
ตารางที่ ผ.6	ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามระยะห่างเพลลาเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบ ภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	154

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	ขึ้นส่วนคานสี่ดื่กรี่อิสระ..... 24
ภาพที่ 2.2	แรงกระทำที่ขั้วซึ่งแปลงจากแรงกระทำภายนอก..... 29
ภาพที่ 2.3	แบบจำลองรถบรรทุก 31
ภาพที่ 2.4	แผนภาพอิสระของรถบรรทุกกับสะพาน..... 33
ภาพที่ 2.5	ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน..... 38
ภาพที่ 2.6	ตัวประกอบการกระทำตามมาตรฐานการออกแบบสะพานต่าง ๆ จำแนกตามความยาวช่วงของสะพาน (Moghimi, 2008) 45
ภาพที่ 2.7	ตำแหน่งตรวจวัดผลตอบสนองในขึ้นส่วนของคาน..... 46
ภาพที่ 2.8	ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน 47
ภาพที่ 2.9	น้ำหนักรกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ไปบนสะพาน 48
ภาพที่ 2.10	ผลตอบสนองทางด้านสถิตินในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน 49
ภาพที่ 3.1	แผนผังการทำงานในคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์..... 55
ภาพที่ 3.2	สะพานข้ามคลองบางน้อย (กม. 28+170.31 ถนนวงแหวนรอบนอกตะวันตก) 57
ภาพที่ 3.3	ลักษณะทางกายภาพของสะพานทดสอบ (ก) รูปแปลนของสะพาน (ข) รูปด้านข้างของสะพาน และ (ค) รูปตัดตามขวางของสะพาน..... 59
ภาพที่ 3.4	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน 60
ภาพที่ 3.5	ตัวอย่างภาพตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน..... 61
ภาพที่ 3.6	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพานเข้ากับแผ่นพื้นคอนกรีต 61
ภาพที่ 3.7	ลักษณะการวางพาดของแผ่นพื้นคอนกรีตกับคานขวางบนหัวตอม่อสะพาน 62
ภาพที่ 3.8	ตัวอย่างสัญญาณค่าความเครียดของกรณีรถที่มีน้ำหนักบรรทุกเบา (Light) 62

ภาพที่ 3.9	ตัวอย่างสัญญาณค่าความเครียดของกรณีรถที่มีน้ำหนักบรรทุกหนัก (Heavy).....	63
ภาพที่ 3.10	ตัวอย่างภาพของรถบรรทุกขณะแล่นไปบนสะพานจากกล้อง CCTV (ก) ช่วงเวลากลางวัน และ (ข) ช่วงเวลากลางคืน.....	64
ภาพที่ 3.11	แสดงแผนผังการทำงานของระบบตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008)	65
ภาพที่ 3.12	ลักษณะเซนเซอร์บอกตำแหน่ง (ก) ลักษณะทั่วไป (ข) ตัวรับสัญญาณ (ค) ตัวส่งสัญญาณ.....	66
ภาพที่ 3.13	ลักษณะการติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถเข้าและออก.....	66
ภาพที่ 3.14	ภาพร่างแสดงการกระจายน้ำหนักของรถบรรทุก (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008) ..	69
ภาพที่ 3.15	กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่น้ำหนักต่าง ๆ ของเพลาน้ำหนักบรรทุก.....	70
ภาพที่ 3.16	กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่น้ำหนักต่าง ๆ ของเพลากลางและเพลาลังรถบรรทุก	70
ภาพที่ 3.17	กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก	71
ภาพที่ 3.18	กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก	72
ภาพที่ 3.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุก	72
ภาพที่ 3.20	กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่ระยะห่างเพลาดังต่าง ๆ ของรถบรรทุก.....	73
ภาพที่ 3.21	ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน.....	75
ภาพที่ 3.22	ขั้นตอนการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเทคนิค Update Static Component (USC).....	76
ภาพที่ 3.23	ตำแหน่งของน้ำหนักเพลารถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน สำหรับหาอินฟลูเอนไลน์ของโมเมนต์ดัดเชิงสถิตของหน้าตัดที่ตำแหน่ง j บนพื้นสะพาน เนื่องจากน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ	77
ภาพที่ 3.24	ผลตอบสนองเชิงสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน.....	78
ภาพที่ 3.25	ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์และสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $L/3$	79

ภาพที่ 4.13	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 3L/4 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน	91
ภาพที่ 4.14	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 7L/8 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน	92
ภาพที่ 4.15	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน	94
ภาพที่ 4.16	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/4 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน .	94
ภาพที่ 4.17	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 3L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน .	95
ภาพที่ 4.18	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน .	95
ภาพที่ 4.19	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 5L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน .	96
ภาพที่ 4.20	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 3L/4 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน .	96
ภาพที่ 4.21	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 7L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน .	97
ภาพที่ 4.22	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล	99
ภาพที่ 4.23	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล	101
ภาพที่ 4.24	อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล	103
ภาพที่ 4.25	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน	104

ภาพที่ 4.26	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	105
ภาพที่ 4.27	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	105
ภาพที่ 4.28	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	108
ภาพที่ 4.29	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	109
ภาพที่ 4.30	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	109
ภาพที่ 4.31	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	111
ภาพที่ 4.32	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	112
ภาพที่ 4.33	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	112
ภาพที่ 4.34	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามจำนวน 4,975 คัน.....	114
ภาพที่ 4.35	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	116
ภาพที่ 4.36	อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน.....	117
ภาพที่ 4.37	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ตามน้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม.....	119

ภาพที่ 4.38	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ตาม น้ำหนักรวมต่างๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการ ทดสอบภาคสนาม.....	119
ภาพที่ 4.39	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ตาม น้ำหนักรวมต่างๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการ ทดสอบภาคสนาม.....	120
ภาพที่ 4.40	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ตาม ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการ ทดสอบภาคสนาม.....	122
ภาพที่ 4.41	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ตาม ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการ ทดสอบภาคสนาม.....	122
ภาพที่ 4.42	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ตาม ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการ ทดสอบภาคสนาม.....	123
ภาพที่ 4.43	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ตาม ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ การทดสอบภาคสนาม.....	125
ภาพที่ 4.44	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ตาม ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ การทดสอบภาคสนาม.....	125
ภาพที่ 4.45	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ตาม ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ การทดสอบภาคสนาม.....	126
ภาพที่ 4.46	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ รถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม.....	128
ภาพที่ 4.47	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก ตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 คัน.....	130

<p>ภาพที่ 4.48</p>	<p>ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับที่ตำแหน่ง กึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 ชุดข้อมูล</p>	<p>131</p>
<p>ภาพที่ 4.49</p>	<p>กราฟแท่งแสดงการกระจายตัวของจำนวนข้อมูลตามค่าผลต่างระหว่างตัว ประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง $2L/3$ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จาก ข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 คัน.....</p>	<p>132</p>

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย

ปัจจุบันการคมนาคมและขนส่งทางรถยนต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี สืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้ปริมาณการจราจรบนท้องถนนหลายสายมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย สะพานจึงเป็นสิ่งจำเป็นตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันและมีส่วนช่วยในการพัฒนาความเจริญเติบโตทางสังคมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น สะพานที่สร้างขึ้นในเมืองใหญ่เพื่อใช้เป็นเส้นทางคมนาคมขนส่งช่วยให้การติดต่อระหว่างกันสะดวกยิ่งขึ้น ทำให้สินค้าหรือผลผลิตกระจายสู่ตลาดได้รวดเร็ว และช่วยระบายการจราจรบนท้องถนนที่มีความหนาแน่นในช่วงโมงเร่งด่วน ดังนั้น การวิเคราะห์และออกแบบสะพานจึงต้องมีความถูกต้องและปลอดภัยสูง

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสะพาน คือ ผลตอบสนองของทางด้านพลศาสตร์ของสะพานอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก ทั้งในแง่ของความปลอดภัยและความคงทน ปกติการออกแบบสะพานจะสมมติให้แรงกระทำจากรถบรรทุกเป็นค่าคงที่เคลื่อนไปบนสะพานอย่างช้า ๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ด้วยวิธีเชิงสถิตแล้วจึงพิจารณาผลขยายทางด้านพลศาสตร์ด้วยการคูณตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) โดยตัวประกอบการกระแทกเป็นผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นมาจากผลตอบสนองทางด้านสถิต ซึ่งมาจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่วิศวกรต้องประเมินผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกและกำหนดค่าตัวประกอบการกระแทกให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ออกแบบสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

มาตรฐานการออกแบบสะพานโดยส่วนใหญ่เสนอสูตรการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระแทกให้มีค่าขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพาน เช่น มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO) หรือขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของความถี่ธรรมชาติของสะพาน เช่น มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศแคนาดา (OHBCD) แต่ดูเหมือนว่าวิธีการนี้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงนัก เนื่องจากหลาย ๆ กรณีจะมีความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยตัวแปรอื่น ๆ ที่อาจจะเกี่ยวข้องกับค่าตัวประกอบการกระแทก คือ ความเร็วของรถบรรทุก ความถี่ในการสั่นของเพลลา ความหน่วงในระบบกันสะเทือน ความขรุขระของผิวทาง รอยต่อระหว่างแผ่นพื้น ความถี่ธรรมชาติและความหน่วงของสะพาน จากงานวิจัยที่

ผ่านมา ทั้งจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือการทดสอบจริงภาคสนาม พบว่า ตัวประกอบการกระทบที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐานการออกแบบอาจจะไม่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงในหลาย ๆ กรณี เหตุผลหนึ่งที่เป็นเช่นนั้นก็คือ ค่าตัวประกอบการกระทบที่กำหนดตามมาตรฐานจะเหมาะสำหรับการออกแบบสะพานใหม่ที่มีลักษณะพื้นผิวจราจรอยู่ในสภาพดี อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนึงถึงอายุการใช้งานของสะพาน สภาพพื้นผิวจราจรที่ถูกทำลาย การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก หรือจากปัจจัยอื่น ๆ ทำให้ต้องปรับใช้ตัวประกอบการกระทบให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งที่ผ่านมานักวิจัยหลายท่านมีความพยายามที่จะนำเสนอตัวประกอบการกระทบเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และความขรุขระของผิวทาง เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตรวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องพิจารณาตัวประกอบการกระทบของสะพานเป็นค่าคงที่ตลอดความยาวสะพานเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน โดยคำนึงเฉพาะตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ด้วยอาจมีสมมติฐานว่าตำแหน่งดังกล่าวมีค่าตัวประกอบการกระทบสูงสุด ซึ่งอาจไม่ถูกต้องอันอาจนำไปสู่การวิเคราะห์หรือออกแบบสะพานที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงและไม่ปลอดภัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน โดยการเก็บข้อมูลจากการทดสอบจริง ซึ่งจะทำกรเก็บข้อมูลทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามความยาวสะพาน ซึ่งสะพานเป็นคานช่วงเดียวที่มีรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติ โดยรถบรรทุกที่พิจารณามีค่าความเร็วในการเคลื่อนที่และน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนสะพานจะนำมาเปรียบเทียบกันและจะอภิปรายผลตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระทบ

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Chang และ Lee (1994) ได้ศึกษาพฤติกรรมการสั่นของสะพาน เนื่องมาจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานที่ผิวทางมีความขรุขระ เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วงสะพาน โดยพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ คือ ความเร็วของรถบรรทุก ความขรุขระของผิวทาง และความยาวช่วงสะพาน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วน โดยมีแรงจากรถบรรทุกกระทำที่ข้อของชิ้นส่วน ผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ในขอบเขตความสัมพันธ์ของเวลา หรือความถี่ โดยทำการ

จำลองรถบรรทุกเป็น 4 แบบ ได้แก่ การจำลองเป็นแรงกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ การจำลองเป็นมวลเคลื่อนที่ การจำลองเป็นระบบหนึ่งดีกรีอิสระเคลื่อนที่ และการจำลองระบบสองดีกรีอิสระเคลื่อนที่ จากผลการศึกษาพบว่า ผลตอบสนองไม่ต่างกันมากในกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่บนผิวทางของสะพานที่ไม่มีความขรุขระ แต่ผลตอบสนองจะต่างกันในแต่ละแบบจำลองในกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่บนผิวทางของสะพานที่มีความขรุขระ งานวิจัยนี้ใช้การจำลองรถบรรทุกแบบสองดีกรีอิสระ เพื่อพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก ซึ่งพบว่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วของรถและความขรุขระของผิวทาง แต่ความยาวช่วงของสะพานมีผลต่อตัวประกอบการกระแทกที่ไม่ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบสะพานของอังกฤษ (BS) แคนาดา (OHBC) และเกาหลี (KOREA)

Yang, Liao และ Lin (1995) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองรถบรรทุกประเภท 5 เพลาเป็นมวลเคลื่อนที่และจำลองสะพานเป็นชิ้นส่วนของคาน เพื่อศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจมีต่อค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) ตามมาตรฐานของ AASHTO และ OHBC ซึ่งเสนอสูตรที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบให้ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของสะพานหรือความถี่ธรรมชาติของการสั่นเท่านั้น โดยการสร้างสมการการเคลื่อนที่แสดงถึงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถบรรทุก แต่ยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่ต้องนำมาพิจารณาเช่น ความเร็วและลักษณะเชิงพลศาสตร์ของรถบรรทุก ลักษณะเชิงสะพานและความขรุขระของผิวทาง เนื่องจากมีตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องมากมายทำให้การหาค่าตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานข้างต้นอาจมีค่าต่ำเกินไปในหลายๆ กรณี

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่สามารถนำเสนอสูตรการหาตัวประกอบการกระแทกที่ง่ายพอที่จะนำมาใช้ และเนื่องจากการพัฒนาสูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกจะต้องทับซ้อนกันกับสถานการณ์ในปัจจุบันทั้งในเรื่องของปริมาณการจราจรและลักษณะของรถบรรทุก งานวิจัยดังกล่าวได้จำลองรถบรรทุกเป็นมวลที่รองรับโดยระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) ซึ่งประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง ในการจำลองสะพานจะมีทั้งเป็นแบบคานช่วงเดียว (Simple beam) และคานต่อเนื่อง (Continuous beam) ซึ่งมีสามช่วง โดยความยาวของคานช่วงเดียวและช่วงกลางของคานหลายช่วงเท่ากับ 30, 60, 90 เมตร ความยาวช่วงริมเท่ากับ 10, 30, 60 เมตร ใช้วิธีสติฟเฟิสโดยตรง (Direct stiffness method) สร้างสมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถและหาผลตอบสนองโดยวิธี Direct integration ซึ่งทำการศึกษา

ทั้งลักษณะการเคลื่อนที่ของรถหนึ่งคันที่มาช่องทางเดียวและรถสองคันสวนกันในสองช่องทาง นำไปหาตัวประกอบการกระแทกสำหรับการโก่งตัว โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน และหาตัวประกอบการกระแทกสำหรับแรงเฉือนที่ฐานเนื่องมาจากตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาผลเนื่องจากแต่ละตัวแปร ซึ่งไม่มีผลจากหลายตัวแปรร่วมกัน แต่ในงานวิจัยนี้จะมีตัวแปรที่เรียกว่าตัวแปรความเร็ว (Speed parameter) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ($\pi V / L$) ต่อความถี่ธรรมชาติของสะพาน (ω) โดย V คือความเร็วของรถบรรทุก และ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน ทำการศึกษาตัวประกอบการกระแทกเนื่องจากตัวแปรความเร็วโดยการให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่และมีลักษณะพื้นผิวจราจรราบเรียบ แล้วแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรความเร็ว สำหรับการโก่งตัว โมเมนต์ดัด แรงเฉือนที่กึ่งกลางคานและแรงเฉือนที่ฐานจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ทั้งสองกรณี สร้างเส้นตรงครอบคลุมผลทั้งหมดทำให้ได้สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรความเร็วในกรณีต่าง ๆ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกจะส่งผลที่แตกต่างกันไม่มากนัก ยกเว้นตัวประกอบการกระแทกสำหรับแรงเฉือนที่ฐาน ทั้งนี้ผลสรุปจากการศึกษาพบว่า

1. ตัวประกอบการกระแทกอาจเกิน 0.30 ได้ (ASTHO กำหนดว่ามีค่าไม่เกิน 0.30) โดยเฉพาะกรณีที่ตัวแปรความเร็วเกิน 0.2 หรือความถี่การเคลื่อนที่ของรถ ($\pi V / L$) มากกว่า 20% ของความถี่ธรรมชาติของสะพาน (ω)
2. ตัวประกอบการกระแทกของสะพานช่วงเดียวจะมีค่าสูงกว่าค่าจากสะพานหลายช่วง ประมาณสามเท่า
3. ตัวประกอบการกระแทกสำหรับการโก่งตัวจะสูงกว่าค่าจากโมเมนต์ดัด
4. ตัวประกอบการกระแทกสำหรับแรงเฉือนที่ฐานรองรับจะมีค่าสูงกว่าค่าที่กึ่งกลางสะพานประมาณ 2.5 เท่า

ทั้งนี้ยังพบว่าผลจากอัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกกับความถี่ธรรมชาติของสะพานจะน้อยมาก หมายความว่าระบบกันสะเทือนของรถและลักษณะของสะพานแทบจะไม่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก และจากการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับลักษณะพื้นผิวจราจรต่าง ๆ เช่น คอนกรีต แอสฟัลท์ ซึ่งจำลองจากฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ซึ่งจะมีผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกน้อยมากเช่นกัน ดังนั้น สิ่งที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกคือ ความเร็วรถบรรทุกและความยาวช่วงของสะพาน โดยตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วรถบรรทุก แต่จะแปรผกผันกับความยาวช่วงของสะพาน

Liu, Huang และ Wang (2002) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นสามมิติ เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานเนื่องจากความขรุขระของผิวทางและศึกษาสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวทางกับตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) งานวิจัยนี้ทำการจำลองสะพานเป็นสะพานคอนกรีตช่วงเดี่ยวที่ออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO และมีความยาวช่วงตั้งแต่ 9.14 เมตร ถึง 42.67 เมตร สำหรับการจำลองรถบรรทุกจะจำลองจากข้อมูลที่วัดได้ในภาคสนาม (Weigh-in-motion) ซึ่งเป็นรถบรรทุกประเภท HS20-44 โดยเก็บมาทั้งหมด 21,444 ข้อมูล การจำลองความขรุขระของผิวทางจะใช้กระบวนการสุ่มจากฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มของฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ในการสร้างรูปแบบของความขรุขระของผิวทาง ทำการศึกษาโดยให้รถบรรทุกคันเดียวเคลื่อนที่ผ่านสะพานเนื่องจากโอกาสที่รถบรรทุกสองคันขึ้นไปเคลื่อนที่ผ่านสะพานในเวลาเดียวกันเป็นไปได้ได้น้อย จำลองให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยไม่มีการกระจัดและความเร็วเริ่มต้น โดยมีความเร็วของรถบรรทุกตั้งแต่ 24 ถึง 121 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำลองความขรุขระของผิวทางในสภาพดี ทำการศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานโดยสนใจคานที่รับแรงมากที่สุด ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของรถบรรทุกและความยาวสะพาน แต่ละความเร็วจะหาตัวประกอบการกระแทกจากค่าเฉลี่ยของการจำลอง 20 ครั้ง พบว่าสำหรับรถบรรทุกขนาดใหญ่จะได้ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ต่ำกว่ามาตรฐาน AASHTO และสำหรับรถบรรทุกขนาดเล็กจะได้ค่าตัวประกอบการกระแทกที่สูงกว่ามาตรฐาน AASHTO อยู่มาก แต่เนื่องจากน้ำหนักของรถที่น้อยทำให้ไม่มีผลต่อโครงสร้างสะพานมากนัก จากนั้นเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวทางกับตัวประกอบการกระแทก ซึ่งความสัมพันธ์แต่ละรูปแบบจะกระตุ้นการสั่นของรถบรรทุกในรูปแบบที่ต่างกัน (Pitch mode และ Roll mode) ทำการหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ความเร็วและความขรุขระของผิวทางรูปแบบต่าง ๆ โดยให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ในช่องทางเดียวและสองช่องทางและมีสมมติฐานว่าความขรุขระเหมือนกันทั้งสองช่องทาง จากการศึกษาพบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความขรุขระของผิวทาง เพราะฉะนั้นความขรุขระของผิวทางจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลทางด้านพลศาสตร์ในระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานเพื่อหาค่าตัวประกอบการกระแทก

Zhang, Sennah และ Kennedy (2003) ได้ทำการศึกษาว่าความเร็วของรถบรรทุก ความถี่ธรรมชาติของสะพาน และความยาวช่วงของสะพาน มีผลต่อตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) อย่างไร โดยใช้แบบจำลองสามมิติเพื่อหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากโมเมนต์

ตัด แรงปฏิกิริยาที่ฐาน และระยะโค้งตัวของสะพาน เริ่มจากการจำลองสะพาน 120 ตัวอย่าง มีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว แผ่นพื้นคอนกรีตวางอยู่บนคานเหล็ก (Girder) นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS จะทำการศึกษาทั้งแบบกรณีที่รถบรรทุกมาพร้อมกันทั้งสองช่องทางและแบบที่รถบรรทุกมาช่องทางเดียว ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ตัวประกอบการกระแทกที่มีค่าสูงสุดสำหรับโมเมนต์ตัดและระยะโค้งตัวของสะพานเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง อีกทั้งตัวประกอบการกระแทกที่มีค่าสูงสุดสำหรับแรงปฏิกิริยาที่ฐานจะเกิดขึ้นเมื่อรถบรรทุกอยู่ใกล้ ๆ กับฐานรองรับสะพาน ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันกับความเร็วของรถบรรทุก และเมื่อรถบรรทุกมาพร้อมกันทั้งสองช่องทางในทิศทางเคลื่อนที่เดียวกันจะให้ตัวประกอบการกระแทกที่มีค่ามากที่สุด โดยตัวประกอบการกระแทกสำหรับแรงปฏิกิริยาที่ฐานจะมากกว่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับโมเมนต์ตัดและระยะโค้งตัวของสะพานอยู่มาก ความถี่ธรรมชาติของสะพานเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสะพาน โดยความถี่ธรรมชาติของสะพานจะแปรผันกับค่าตัวประกอบการกระแทก และผลเนื่องจากความยาวช่วงของสะพานที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระแทกมากขึ้น ซึ่งขัดแย้งกับมาตรฐาน AASHTO และงานวิจัยอื่น ๆ

Law และ Zhu (2005) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) เช่น ตำแหน่งที่รถเบรค ขนาดของแรงเบรค ระยะเวลาเบรค อัตราเร็วเริ่มต้นของรถ ลักษณะผิวทางแต่ละประเภทตามมาตรฐาน ISO โดยการพิจารณาผลกระทบของผิวทางที่มีความขรุขระและการเบรคของรถ ในการวิเคราะห์จะจำลองรถบรรทุกสามเพลลาและสะพานหลายช่วงที่มีหน้าตัดไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้ยังมีการทดลองในภาคสนามเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วย ทำการสร้างแบบจำลองสองมิติของรถบรรทุกสามเพลลามี 7 องศาอิสระ โดยที่แต่ละเพลลาจะมีระบบกันสะเทือน (Suspension system) ที่ประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองของสะพานเป็นคานสามช่วงที่มีหน้าตัดไม่คงที่ ทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ค่าตัวประกอบการกระแทกจะคำนวณจากการโค้งตัวและโมเมนต์ตัดของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วง จากการศึกษพบว่า

1. เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำผ่านผิวทางที่มีความขรุขระมาก จะทำให้เกิดการกระตุ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน นำไปสู่การเกิดผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์เพิ่มมากขึ้นต่อโครงสร้างสะพาน

2. ระบบกันสะเทือนของรถบรรทุกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อผลตอบแทนทางด้านผลศาสตร์ของสะพาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรถบรรทุกเบรกบนสะพาน จะทำให้ผลตอบแทนของสะพานทางด้านผลศาสตร์เพิ่มมากขึ้น
3. ผลตอบแทนทางด้านผลศาสตร์จะแตกต่างกันในแต่ละช่วงของสะพาน โดยความแตกต่างจะน้อยที่สุดในช่วงที่สองของสะพานสามช่วง ซึ่งความแตกต่างนี้จะมีมากขึ้นเมื่อมีการเบรกของรถบรรทุก ดังนั้นการหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ถูกต้องควรมาจากผลตอบแทนสูงสุดทางด้านผลศาสตร์และทางด้านสถิติที่ช่วงสะพานเดียวกันกับการเบรกเกิดขึ้น
4. ผลตอบแทนในสะพานช่วงแรกจะต่ำกว่าช่วงอื่น ๆ เพราะสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกขณะเข้าสู่สะพานยังมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอื่น ๆ
5. การเบรกของรถบรรทุกจะทำให้เกิดแรงกระแทกเทียบเท่าในช่วงความถี่ที่กว้างมาก ดังนั้น โหมดของการสั่นหลาย ๆ โหมดจึงต้องนำมาพิจารณาเพื่อความถูกต้องของผลตอบแทนทางด้านผลศาสตร์

Shi (2006) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านผลศาสตร์ของสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น โดยการสร้างแบบจำลองสะพานและรถบรรทุกที่เป็นระบบปฏิสัมพันธ์กัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านผลศาสตร์ของสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น โดยศึกษาผลตอบแทนทางด้านผลศาสตร์ของสะพานเนื่องจากความยาวช่วงที่ต่างกัน ภายใต้ความเร็วของรถบรรทุกและสภาพพื้นผิวจราจรต่าง ๆ โดยจะหาความเร็วที่จะทำให้เกิดผลตอบแทนสูงสุด ทั้งยังมีการพิจารณารอยแยกระหว่างแผ่นพื้นว่าจะมีผลต่อสะพานอย่างไร ซึ่งพบว่าจะมีผลอย่างมากในสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น

รถบรรทุกสามเพลารถูกจำลองให้ล้อรถและระบบกันสะเทือน (Suspension system) เป็นสปริงและตัวหน่วงที่มี 11 องศาอิสระ จากนั้นจึงจำลองสะพานเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของรถบรรทุกและการกระจัดของสะพาน ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่แสดงระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ในการวิเคราะห์จะแยกเป็นแต่ละโหมดตามความถี่ธรรมชาติของสะพาน การจำลองสภาพพื้นผิวจะใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ทั้งยังมีการพิจารณารอยแยกแผ่นพื้นจากการศึกษาผลของความเร็วรถบรรทุกที่มีต่อการกระจัดที่กึ่งกลางสะพานความยาวช่วง 8 เมตร พบว่า ความเร็วที่สูงขึ้นอาจจะไม่ได้ทำให้การกระจัดมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในกรณีนี้การกระจัดจะสูงสุดที่ความเร็วเท่ากับ 40 เมตรต่อวินาที โดยส่วนใหญ่จะถูกกระตุ้นในโหมดแรกของสะพาน แต่ถ้าสะพานมีความ

ยาวช่วงที่ต่างกันทำให้ความถี่ธรรมชาติต่างกัน เพราะฉะนั้นความเร็วที่ทำให้เกิดการกระจัดสูงสุด จึงต่างกันซึ่งความเร็วนี้อาจจะไม่ได้ทำให้เกิดความเร่งสูงสุดที่กึ่งกลางสะพาน โดยความเร่งของ สะพานจะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก จากนั้นทำการศึกษาผลของรอยแยกระหว่างแผ่น พื้นที่มีต่อการกระจัดและความเร่งที่กึ่งกลางสะพานความยาวช่วง 8 เมตร พบว่า ถ้าความต่าง ระดับที่รอยแยกระหว่างแผ่นพื้นมากขึ้นจะส่งผลให้การกระจัดและความเร่งของสะพานมากขึ้น ทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้นด้วย จากนั้นทำการศึกษาผลของความขรุขระของผิวทาง พบว่า ยิ่งผิวทางมีความขรุขระมากจะทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้นไปด้วย ทั้งยัง พบว่า ยิ่งสะพานมีความยาวช่วงมากจะทำให้ค่าตัวประกอบการกระแทกลดลง ซึ่งตัวประกอบการ กระแทกในงานวิจัยนี้พบว่า มีหลายกรณีจะมากกว่าค่าตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

Rattigan, Obrien และ Gonzalez (2008) ได้ทำการสร้างแบบจำลองของการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน เพื่อหาตัวประกอบคูณขยายเนื่องจากผลตอบสนองทางด้าน พลศาสตร์ (Dynamic amplification factor) หรือเรียกว่า DAF งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลอง ของรถบรรทุก แบบจำลองของสภาพพื้นผิวสะพาน และแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่แสดง การปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยมีการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมายที่อาจจะ ส่งผลต่อค่า DAF เพื่อให้ได้ค่าที่นำไปใช้ในการออกแบบมีความถูกต้องยิ่งขึ้น สะพานที่นำมา จำลองเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสะพานช่วงเดียวที่มีความยาว 32 เมตร มี 2 ช่องทาง จราจร ซึ่งมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการติดตั้งเครื่องวัดความเครียดไว้ที่ สะพานจริงแล้วนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแบบจำลอง โดยจำลองรถบรรทุกให้ล้อ และระบบกันสะเทือน (Suspension system) เป็นสปริงและตัวหน่วง (Spring dashpot system) ซึ่งจะมีทั้งรถบรรทุกประเภท 2, 3 และ 5 เพลา วิเคราะห์ผลตอบสนองของสะพานภายใต้รูปแบบ การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกที่ต่างกันไปรวมทั้งรูปแบบของการเคลื่อนที่ซึ่งน่าจะทำให้เกิดผล ตอบสนองสูงสุด เช่น รถบรรทุกสวนกันที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยต้องหาผลตอบสนองที่ เป็นไปได้ทั้งหมดในทุก ๆ ตำแหน่งทั้งตามขวางและตามยาวของสะพานและหาความสำคัญของ ตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็วของรถบรรทุก น้ำหนักของรถบรรทุกที่มีผลต่อค่า DAF จากนั้นจำลอง ความขรุขระของผิวทางตามฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) แล้วสร้างระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ รถบรรทุกคันเดียวไปบนสะพาน พบว่า ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระยะ 21 เมตรจากตำแหน่งเริ่มต้นของสะพานและค่า DAF ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจากรถบรรทุก

ประเภท 3 เพลา จะมีค่าสูงกว่าค่าจากรถบรรทุกประเภท 5 เพลา โดยทั้งสองกรณีจะเกิดค่า DAF สูงสุดที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนผลการวิเคราะห์ของรถบรรทุก 5 เพลาเคลื่อนที่สวนกันบริเวณกึ่งกลางสะพาน พบว่า ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานที่มีความขรุขระของผิวทางอยู่ในสภาพดีจะมีค่า DAF มากกว่าค่าที่ได้กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบสำหรับสะพานช่วงเดียวที่มีความยาว 32 เมตร

Shi, Cai และ Chen (2008) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสะพานและรถบรรทุก โดยทำการสร้างแบบจำลองที่เป็นระบบปฏิสัมพันธ์กัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น โดยศึกษาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานเนื่องจากความยาวช่วงที่ต่างกัน ภายใต้ความเร็วและสภาพพื้นผิวต่าง ๆ โดยจะหาความเร็วที่จะทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุด ทั้งยังมีการพิจารณารอยแยกระหว่างแผ่นพื้นว่าจะมีผลต่อสะพานอย่างไร ซึ่งพบว่าจะมีผลอย่างมากในสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น รถบรรทุกสามเพลากลูกจาลองให้ล้อรถบรรทุกและระบบกันสะเทือน (Suspension system) เป็นสปริงและตัวหน่วงที่มี 11 องศาอิสระ จากนั้นทำการจำลองสะพานเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของรถบรรทุกและการกระจัดของสะพาน ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่แสดงระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ในการวิเคราะห์จะแยกเป็นแต่ละโหมดตามความถี่ธรรมชาติของสะพาน การจำลองสภาพพื้นผิวทางจะใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ทั้งยังมีการพิจารณารอยแยกระหว่างแผ่นพื้น จากการศึกษาผลของความเร็วรถบรรทุกที่มีต่อการกระจัดที่กึ่งกลางสะพานความยาวช่วง 8 เมตร พบว่า ความเร็วที่สูงขึ้นอาจจะไม่ได้ทำให้การกระจัดมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในกรณีนี้การกระจัดจะมากที่สุดที่ความเร็วเท่ากับ 40 เมตรต่อวินาที โดยส่วนใหญ่จะถูกกระตุ้นในโหมดที่ 1 ของสะพาน แต่ถ้าสะพานมีความยาวช่วงที่ต่างกันทำให้ความถี่ธรรมชาติต่างกันเพราะฉะนั้นความเร็วที่ทำให้เกิดการกระจัดสูงสุดจึงต่างกันซึ่งความเร็วนี้ อาจจะไม่ทำให้เกิดความเร่งสูงสุดที่กึ่งกลางสะพาน โดยความเร่งของสะพานจะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก จากนั้นทำการศึกษาผลของรอยแยกระหว่างแผ่นพื้นที่มีต่อการกระจัดและความเร่งที่กึ่งกลางสะพานความยาวช่วง 8 เมตร พบว่า ถ้าความต่างระดับที่รอยแยกระหว่างแผ่นพื้นมากขึ้นจะส่งผลให้การกระจัดและความเร่งของสะพานมากขึ้น ทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้นด้วย จากนั้นทำการศึกษาผลของความขรุขระของผิวทาง พบว่า ยิ่งผิวทางมีความขรุขระมากจะทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้นไปด้วย ทั้งยังได้ว่ายิ่งสะพานมีความยาวช่วงมากจะทำให้

ค่าตัวประกอบการกระแทกลดลง ซึ่งตัวประกอบการกระแทกในงานวิจัยนี้พบว่ามียหลายกรณีที่จะมากกว่าค่าที่ได้กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ

Moghimi และ Ronagh (2008) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ายอมให้ของน้ำหนักพลศาสตร์ (Dynamics load allowance) หรือ DLA ซึ่งคล้ายกับค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) โดยการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นแบบสามมิติ แล้วใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาวิเคราะห์ งานวิจัยนี้เริ่มด้วยการหาค่า DLA ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วงด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยตรงจากการจำลองอย่างง่าย โดยให้สะพานเป็นคานช่วงเดียว และมีน้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ไปตามคานด้วยความเร็วคงที่ จะได้ว่าค่า DLA จะแปรผันตามความเร็ว แต่ในกรณีที่มีการคิดมวลของรถบรรทุกจะได้ว่า ค่า DLA จะขึ้นอยู่กับความเร็ว มวลของรถบรรทุก และสะพาน ความถี่ และระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) จากนั้นทำการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นแบบสามมิติ โดยเป็นสะพานช่วงเดียวที่ตั้งอยู่ในประเทศอิหร่าน ซึ่งประกอบด้วยคาน (Girder) 5 ตัว พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของรถบรรทุกจะมี 2 ส่วนคือ การสั่นของมวลเหนือระบบกันสะเทือนของรถและการสั่นของเพลานี้เนื่องมาจากความขรุขระของผิวทาง ความขรุขระนี้ได้สร้างมาจากวิธีความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) แก่สมการการเคลื่อนที่โดยวิธี Direct integration ได้ผลตอบสนองที่คาน นำไปใช้ในการหาค่า DLA ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วงสะพาน จากผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่า DLA เป็นดังนี้

1. ความเร็วของรถบรรทุกมีผลต่อค่า DLA ขณะที่รถบรรทุกอยู่บนสะพาน นอกจากนั้น ความเร่งของสะพานยังแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก และพบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงปฏิกิริยาระหว่างล้อรถและสะพานเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่โหมดต่าง ๆ จะถูกกระตุ้นที่ความเร็วต่างกัน จึงสรุปได้ว่าค่า DLA จะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก
2. ความยาวช่วงของสะพานจะแปรผกผันกับค่า DLA
3. มวลของรถบรรทุกจะแปรผกผันกับค่า DLA เนื่องจากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ไม่เกี่ยวข้องกับมวลของรถบรรทุก แต่ผลตอบสนองทางสถิตจะแปรผันตามมวลของรถบรรทุก
4. ถ้ารถบรรทุกเคลื่อนที่ไปตามกึ่งกลางตามความกว้างสะพาน จะทำให้ได้ค่า DLA สูงสุด

5. ความขรุขระของผิวถนนที่เชื่อมต่อกับสะพาน ทำให้รถเกิดการสั่นเริ่มต้นก่อนที่จะเข้าสู่สะพาน แต่พลังงานส่วนนี้ก็จะถูกสลายไปในเวลาอันสั้น จึงมีผลต่อสะพานในช่วงเวลาอันสั้นเช่นเดียวกัน อาจทำให้เกิดค่า DLA ที่สูงบริเวณใกล้ ๆ ทางเข้าสู่สะพาน

Deng และ Cai (2010) ได้ทำการจำลองโครงสร้างสะพานเป็นแบบสามมิติ เพื่อจะหาค่าตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) และศึกษาผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการกระทบอันเนื่องมาจากความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และสภาพพื้นผิวของสะพาน ซึ่งที่ผ่านมาพบว่าตัวประกอบการกระทบที่ได้โดยวัดจากสะพานจริง จะมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐานของ AASHTO โดยสาเหตุหลักมาจากการเสื่อมสภาพของสะพานโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวจราจรของสะพาน งานวิจัยนี้จึงต้องการหาค่าตัวประกอบการกระทบที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างสะพานทั้งเก่าและใหม่ เริ่มต้นด้วยการจำลองโครงสร้างสะพานโดยใช้โปรแกรม ANSYS เป็นแบบสามมิติ 5 ตัวอย่างที่มีความยาวช่วงต่างกัน มีลักษณะเป็น 2 ช่องทางจราจร ซึ่งประกอบด้วยคานจำนวน 5 ตัว และมีลักษณะเหมือนสะพานที่มีอยู่จริงในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ก็ได้ทำการจำลองรถบรรทุกเป็นแบบสามเพลลา โดยแต่ละเพลลาประกอบด้วยระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) จากนั้นใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถ โดยสิ่งที่สัมพันธ์กันก็คือแรงคู่ปฏิกริยาระหว่างสะพานกับรถบรรทุก และการกระจัดของสะพานกับล้อรถ จากนั้นทำการจำลองสภาพพื้นผิวของสะพานตามมาตรฐาน ISO เป็น 5 รูปแบบคือ very poor, poor, average, good, very good โดยที่ความเร็วของรถบรรทุกมี 7 ค่า คือ 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การเคลื่อนที่ของรถมี 2 กรณีคือ กรณีที่รถเคลื่อนที่มาช่องทางเดียวและกรณีที่รถมาพร้อมกันสองช่องทาง ใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ตัวอย่างละ 20 ครั้ง ทำการบันทึกผลตอบสนองสูงสุดจากแต่ละตัวอย่างด้วยวิธีการทางสถิติ นำผลที่ได้ไปหาค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง โดยงานวิจัยนี้จะหาค่าตัวประกอบการกระทบจากระยะโค้งตัว เนื่องจากจะทำให้ได้ตัวประกอบการกระทบที่มีค่ามากที่สุด ผลจากการวิจัยพบว่า สะพานที่มีความยาวช่วงสั้น และสะพานที่มีอายุมากที่มีสภาพพื้นผิวแย่ จะได้ตัวประกอบการกระทบสูงกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน AASHTO โดยพบว่าสภาพพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระทบ ซึ่งปัจจุบันมาตรฐาน AASHTO ได้กำหนดค่าตัวประกอบการกระทบให้ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของสะพานเท่านั้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึง เช่น สภาพของผิวทาง ลักษณะของรถ และสภาพการจราจร เป็นต้น

ปานนท์ ลาขโรจน์ (2010) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน แล้วทำการจำลองเหตุการณ์การแล่นผ่านสะพานของรถบรรทุกภายใต้เงื่อนไขแบบต่าง ๆ ในคอมพิวเตอร์ อาทิเช่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วของรถบรรทุก ความยาวช่วงสะพาน ระดับความขรุขระของผิวทาง การศึกษาได้ครอบคลุมถึงตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนสะพาน ทั้งยังต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทบกับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความยาวช่วงและความถี่ธรรมชาติของสะพาน ความเร็วและน้ำหนักรถบรรทุก รวมทั้งพิจารณาผลจากสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ซึ่งผลการศึกษากับกลุ่มตัวอย่างพบว่า การพิจารณาสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ทำให้ตัวประกอบการกระทบมีค่าสูงขึ้นจากที่ไม่มี การพิจารณา และตัวประกอบการกระทบที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะแปรผันตามความเร็ว แต่จะแปรผกผันกับน้ำหนักรถบรรทุก นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของสะพาน คือ มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบการกระทบจากมาตรฐานแคนาดาด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ตัวประกอบการกระทบสูงสุดของสะพานนั้นอาจไม่ได้เกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงสะพาน โดยตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งอื่น ๆ อาจมีโอกาสสูงกว่าตัวประกอบการกระทบที่กึ่งกลางสะพานได้ทุกตำแหน่งโดยเฉพาะบริเวณปลายสะพาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องปรับปรุงแนวทางในการพิจารณาตัวประกอบการกระทบในการวิเคราะห์ออกแบบสะพานเพื่อให้ความถูกต้องและปลอดภัยต่อไป

1.2.2 การศึกษาแบบทดสอบจริงภาคสนาม

Chan และ O'Connor (1990) ได้ทำการศึกษาแบบทดสอบจริงภาคสนามของสะพาน Six Mile Creek เพื่อจะหาตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) โดยทำการเก็บค่าความเครียดจากช่วงเดี่ยวยของสะพานที่มีหลายช่วง ซึ่งได้ติดตั้งเครื่องมือเก็บค่าความเครียดที่ได้สะพานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดความยาวช่วงของสะพาน ทำการเก็บค่าความเครียดจากสะพานที่มีรถบรรทุกวิ่งผ่านภายใต้สภาพการจราจรปกติ ซึ่งความถี่ในการเก็บข้อมูลจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ความเครียดสูงสุดอยู่ในข้อมูลที่เก็บมา จากการใช้เครื่องมือเก็บค่าความเครียดทำให้ได้ข้อมูลความเครียดจากตัวอย่างรถบรรทุกที่แล่นผ่านสะพานจำนวน 130 คัน นำข้อมูลเหล่านี้ไปหาค่าตัวประกอบการกระทบ นอกจากนี้ยังทำการหาค่าน้ำหนักล้อของรถบรรทุกของแต่ละคัน โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่อ่านได้จากรถบรรทุกมาตรฐาน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรืออ้างอิงข้อมูลความเครียดที่ได้จากสภาพจราจรปกติ ค่าความเครียดที่ได้นี้เป็นค่าที่ได้จากพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน เมื่อนำตัวกรองสัญญาณ (Filter) มาใช้กับข้อมูลชุดนี้ทำ

ให้ได้ค่าความเครียดจากพฤติกรรมทางด้านสถิตเทียบเท่าของสะพาน นำข้อมูลเหล่านี้ไปหาค่าตัวประกอบการกระแทก โดยพิจารณาเฉพาะตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงสะพาน พบว่า ตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตรงกับน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกและมีค่าอยู่ระหว่าง -0.2 ถึง +1.25 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.51 ซึ่งตัวประกอบการกระแทกที่ได้จะมากกว่าค่าที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานที่มีช่วงความยาวของสะพานสั้น ๆ

Kim และ Nowak (1997) ได้ทำการเก็บค่าความเครียดจากสะพานที่มีรถบรรทุกวิ่งผ่านภายใต้สภาพการจราจรปกติที่ไม่มีการควบคุมการจราจร เพื่อจะหาค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) โดยจะนำไปใช้ประเมินสภาพการใช้งานของสะพานและนำไปปรับปรุงหลักการออกแบบสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติ งานวิจัยนี้เริ่มด้วยการทบทวนการหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐาน AASHTO ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของสะพานเท่านั้น จากนั้นทำการเก็บค่าความเครียดจากสะพานช่วงเดียวสองสะพานที่มีลักษณะของสะพานและสภาพการจราจรต่างกันมาก โดยติดตั้งเครื่องมือเก็บค่าความเครียดที่ได้สะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วงของสะพาน ทำการเก็บค่าความเครียดภายใต้สภาพการจราจรปกติซึ่งความถี่ในการเก็บข้อมูลจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ความเครียดสูงสุดอยู่ในข้อมูลที่เก็บมา จากการใช้เครื่องมือเก็บค่าความเครียดทำให้ได้ข้อมูลความเครียดจากรถบรรทุกที่แล่นผ่านสะพานมา 900 คัน นำข้อมูลเหล่านี้มาหาค่าตัวประกอบการกระแทก นอกจากนี้ยังทำการเก็บค่าความเครียดที่ได้จากรถบรรทุกที่ทราบน้ำหนักและลักษณะของรถ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรืออ้างอิงข้อมูลความเครียดที่ได้จากสภาพจราจรปกติ ค่าความเครียดที่ได้นี้เป็นค่าที่ได้จากพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน เมื่อนำตัวกรองสัญญาณความเครียด (Filter) มาใช้กับข้อมูลชุดนี้ทำให้ได้ค่าความเครียดจากพฤติกรรมทางด้านสถิตเทียบเท่าของสะพาน นำข้อมูลเหล่านี้ไปหาค่าตัวประกอบการกระแทกพบว่า ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งของคานริมบนอกสุด (Exterior girder) จะมีค่าสูงมาก เนื่องจากว่าผลตอบสนองทางสถิตที่ต่ำ โดยส่วนใหญ่ตัวประกอบการกระแทกที่ได้จะต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลความเครียดจากสภาพการจราจรปกติจะสามารถใช้ในการสังเกตพฤติกรรมของสะพานภายใต้สภาพน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริง ค่าความเครียดที่ต่ำสามารถบ่งบอกได้ว่าสะพานสามารถรับน้ำหนักไว้ได้เพียงพอ

Li (2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านพลศาสตร์จากการทดสอบจริงภาคสนามของสะพานหมายเลข 500133 ข้ามคลอง Mosquito เพื่อหาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อตัวประกอบภาระกระแทกและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นกับตัวประกอบภาระกระแทกที่ควรจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบ โดยทำการทดสอบด้วยรถบรรทุกประเภทที่มีจำนวนเพลลา 5 เพลลา จำนวน 2 คัน ซึ่งแต่ละคันบรรทุกคอนกรีตบล็อคจำนวน 12 ก้อน ซึ่งใกล้เคียงกับรถบรรทุกประเภท HS20-44 ตามมาตรฐานการออกแบบ AASHTO เคลื่อนที่ไปบนสะพานมี 3 ช่วง ซึ่งมีความยาวในแต่ละช่วงเท่ากับ 21.7 เมตร รวมความยาวของสะพานทั้งหมดเท่ากับ 65.1 เมตรและรองรับ 2 ช่องทางจราจร หลังจากนั้นนำผลตอบสนองที่ได้ไปหาตัวประกอบภาระกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานและหาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวประกอบภาระกระแทก เช่น ความเร็ว น้ำหนัก และระบบกันสะเทือน (Suspension system) ของรถบรรทุก รวมถึงความขรุขระของผิวทาง รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก จำนวนคัน ระยะห่างและความยาวช่วงของสะพานและตัวประกอบภาระกระแทกจะแปรผันตามความเร็วและสภาพผิวทางที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ค่าตัวคูณภาระกระแทกสูงขึ้น ตัวประกอบภาระกระแทกของคันที่ตำแหน่งขอบของสะพานมีค่าสูงมาก แต่เนื่องจากผลตอบสนองทั้งทางด้านสถิตและพลศาสตร์ที่ต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงตัวประกอบภาระกระแทกที่ตำแหน่งนี้จากการทดสอบภาคสนาม ข้อเสนอแนะเพื่อลดผลกระทบจากการกระแทก เช่น การจำกัดความเร็วของรถบรรทุก การห้ามรถบรรทุกเคลื่อนที่ข้ามช่องทางและการซ่อมแซมสภาพของผิวทาง

1.2.3 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบทดสอบจริงภาคสนาม

Senthilvasan, Thambiratnam และ Brameld (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สำหรับสะพานที่มีรัศมีความโค้งภายใต้น้ำหนักกระทำของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบถึงผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สำหรับสะพานที่มีรัศมีความโค้งและเปรียบเทียบค่าที่ยอมรับได้สำหรับแรงพลศาสตร์/ตัวประกอบภาระกระแทก (Dynamic load allowance/Impact factor หรือ DLA/IF) ที่ได้จากการทดสอบจริงกับค่าที่หาได้จากหลายมาตรฐานการออกแบบ โดยทำการทดสอบด้วยรถบรรทุกประเภทที่มีจำนวนเพลลา 5 เพลลา โดยมีน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งสิ้น 37 ตัน และมีระยะห่างระหว่างฐานล้อมากที่สุดเท่ากับ 3.8 เมตร เคลื่อนที่ไปบนสะพานต่อเนื่อง 4 ช่วง ซึ่งมีความยาวในแต่ละช่วงเท่ากับ 19.84, 28.96, 33.53 และ 27.89 เมตร ตามลำดับมีความรัศมีความโค้งไม่คงที่ โดยเริ่มตั้งแต่ 42 เมตรขึ้นไปและรองรับ 2 ช่องทางจราจร จากนั้นนำผลตอบสนองที่ได้ไปหาค่าที่ยอมรับได้สำหรับแรงพลศาสตร์/ตัวประกอบภาระกระแทก (DLA/IF) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน

1. ตัวประกอบการกระแทกของความเครียดจะมีค่าสูงกว่าของการโก่งตัว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการวิเคราะห์แบบจำลอง
2. ค่าผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ สำหรับสะพานที่มีรัศมีความโค้งจะไม่แปรผันตามความเร็วของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบเสมอไป แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนช่วงเวลาในการสั้นกับเวลา
3. การเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่หาได้จากการทดสอบจริงภาคสนามและค่าที่หาได้จากมาตรฐานต่าง ๆ จะพบว่า ค่า DAF ของมาตรฐาน AUSTRROADS ต่ำกว่าค่าที่หาได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม ส่วนค่า DAF ของมาตรฐาน AASHTO สูงกว่าค่าที่หาได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม
4. การวิเคราะห์หาค่าผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ภายในน้ำหนักกระทำของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับอัตราส่วนมวลระหว่างรถบรรทุกและสะพานที่มีความน้อยกว่า 0.35
5. ค่าผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สำหรับสะพาน จะขึ้นอยู่กับการสั้นในโหมดของการบิดด้วย
6. ค่าผลการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของการโก่งตัว, โมเมนต์ดัด, แรงเฉือน และแรงปฏิกิริยาที่ฐานจะมีค่าไม่เท่ากัน

Ashebo (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สำหรับสะพานที่มีช่วงต่อเนื่องภายใต้น้ำหนักกระทำของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยการทดสอบจริงภาคสนาม การทดสอบในห้องทดสอบและการสร้างแบบจำลอง จุดประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อให้มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของน้ำหนักกระทำของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่บนสะพานที่มีช่วงต่อเนื่อง ผลการศึกษาพบว่า ตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันกับน้ำหนักของรถบรรทุก แต่มีความสัมพันธ์กับความเร็วเพียงเล็กน้อยและไม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนเพลลาของรถบรรทุก ตัวประกอบการกระแทกที่หาได้จากการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกคันเดียวมีค่าสูงกว่าการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกหลายคันหรือเคลื่อนที่สวนทางกัน ตัวประกอบการกระแทกที่หาได้มีค่าเท่ากับ 1.30 และ 1.24 สำหรับสะพานที่มีช่วงเดียวและมีช่วงต่อเนื่อง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน SDM (Hong Kong) ที่ได้กำหนดไว้คงที่เท่ากับ 1.80

Brady, O'Brien และ Znidaric (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความเร็วที่มีผลต่อค่าตัวคูณขยายเนื่องจากผลทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic amplification factor) ของรถที่เคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียว (Simply support bridge) DAF คือค่าอัตราส่วนระหว่างผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์กับผลตอบสนองทางด้านสถิต ดังนั้นค่า DAF จึงมีลักษณะเช่นเดียวกับตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) โดยทำการทดลองภาคสนาม ซึ่งจะให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน และทำการจำลองสะพานกับรถในรูปแบบสามมิติ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วรถบรรทุกที่มีต่องานวิจัยนี้ การจำลองเป็นรูปแบบอย่างง่ายโดยให้น้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ผ่านสะพานช่วงเดียว (Simply support bridge) ด้วยความเร็วคงที่ เพื่อทำการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า DAF ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง เช่น ความเร็วของรถบรรทุก ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ค่าความหน่วง ผลการศึกษาพบว่า แต่ละสะพานที่มีความถี่ธรรมชาติต่างกันจะเกิดค่า DAF สูงสุดที่ความเร็วต่างกัน อีกทั้งยังพบว่าความเร็วของรถบรรทุกที่สูงมาก ทำให้ช่วงเวลาที่น้ำหนักกระทำอยู่บนสะพานเป็นช่วงเวลาที่สั้นกว่าช่วงเวลาที่จะทำให้สะพานเกิดการสั่น ดังนั้น จะได้ค่า DAF ที่ต่ำ และค่าความหน่วงของสะพานที่น้อยจะทำให้เกิดค่า DAF ที่สูง หลังจากนั้นทำการทดสอบภาคสนามโดยให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน โดยใช้รถบรรทุกสองเพลาและสามเพลา ทำการติดตั้งเครื่องวัดค่าความเครียดบริเวณใต้สะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงความยาว

1. จากการทดสอบจริง พบว่า ค่า DAF ที่ได้จากรถบรรทุกสองเพลาจะมากกว่ารถบรรทุกสามเพลาเนื่องมาจากมวลของรถที่น้อย ทำให้ผลตอบสนองทางด้านสถิตน้อยกว่าผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์อยู่มาก แต่เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีน้อยเกินไป จึงทำให้ไม่เพียงพอที่สรุปอะไรได้มากนัก
2. ค่า DAF ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง พบว่าขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ค่า DAF มีทั้งต่ำและสูง โดยค่า DAF สูงสุดสำหรับรถสองเพลาจะมีค่าเท่ากับ 1.40 ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และค่า DAF สูงสุดสำหรับรถสามเพลาจะมีค่าเท่ากับ 1.30 ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
3. จากเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองเป็นรูปแบบสามมิติขึ้นมาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงพบว่ามีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถหาค่า DAF ของสะพานจริงได้จากแบบจำลองสามมิติ

Kwasniewski และ คณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านพลศาสตร์สำหรับสะพานทั่วไปจากการทดสอบจริง โดยมีจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ การหาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อตัวประกอบการกระแทก และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นต่อตัวประกอบการกระแทกที่ควรจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบ โดยทำการทดสอบด้วยรถบรรทุกประเภทที่มีจำนวนเพลลา 5 เพลลา จำนวน 2 คัน ซึ่งแต่ละคันบรรทุกคอนกรีตบล็อคน้ำหนักจำนวน 12 ก้อน ซึ่งใกล้เคียงกับรถบรรทุกประเภท HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO เคลื่อนที่ไปบนสะพานมี 3 ช่วง ซึ่งมีความยาวในแต่ละช่วงเท่ากับ 21.7 เมตร รวมความยาวทั้งหมดเท่ากับ 65.1 เมตรและรองรับสองช่องทางจราจร จากนั้นนำผลตอบสนองที่ได้ไปหาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน พร้อมทั้งทำการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในภาคสนามและหาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวประกอบการกระแทก

1. จากการทดสอบจริงภาคสนามและการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก คือ ความเร็ว น้ำหนัก และระบบกันสะเทือน (Suspension system) ของรถบรรทุก รวมถึงความขรุขระของผิวทาง รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก จำนวนคัน ระยะห่างและความยาวของสะพาน
2. ตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วและสภาพผิวทางที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ค่าตัวคูณการกระแทกสูงขึ้น
3. ตัวประกอบการกระแทกของคันที่ตำแหน่งขอบของสะพานมีค่าสูงมาก แต่เนื่องจากผลตอบสนองทั้งทางด้านสถิตและพลศาสตร์ที่ค่อนข้างต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งนี้
4. จากการทดสอบภาคสนาม ชี้แนะในการลดผลกระทบจากการกระแทก เช่น การจำกัดความเร็วและบังคับการเคลื่อนที่ในช่องทางเดิมของรถบรรทุก และการซ่อมแซมสภาพของผิวทาง

Li, Wekezer และ Kwasniewski (2008) ได้ทำการทดลองต่อจากงานวิจัยในปี 2006 โดยการทดลองภาคสนามจะให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานแล้วบันทึกค่าความเครียด ความเร่ง และการกระจัดของสะพาน ในการทดลองจะมีทั้งการทดลองทางด้านสถิตและการทดลองทางด้านพลศาสตร์ เพื่อประเมินค่าการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานและสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งแสดงระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานและใช้วิธีการเชิงเลขหาผลตอบสนองของสะพานจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก นำผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองไป

เปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการทดลองภาคสนามทั้งในโดเมนของความถี่และโดเมนของเวลาพบว่ามีความสอดคล้องกัน จึงสามารถหาค่าตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) จากแบบจำลองนี้ได้ สะพานที่ใช้ในการทดลองเป็นสะพานเดียวกันกับปี 2006 โดยเป็นสะพานสามช่วงมีความยาวช่วงละ 21.7 เมตร มีสองช่องทาง ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดบริเวณใต้คานที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน เครื่องมือวัดการโก่งตัวของคานตัวกลางที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน และเครื่องมือวัดความเร่งที่แผ่นพื้นของสะพานและเพลารถ ลักษณะของรถบรรทุกเป็นรถเทรลเลอร์สามเพลลา แต่ละเพลลามีน้ำหนัก 50, 100 และ 169 กิโลนิวตัน การทดลองทางด้านสถิติจะเพื่อหาผลตอบสนองที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานแล้วนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระทบ และการทดลองทางด้านพลศาสตร์จะใช้รถบรรทุก 1 และ 2 คัน เคลื่อนที่มาตามช่องทางที่ความเร็วและลักษณะผิวทางที่ต่างกันไป ลักษณะผิวทางที่ไม่ดีจะใช้แผ่นไม้มาวางผิวทางไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน ในแต่ละครั้งของการทดลองจะเก็บค่าความเครียด ความเร่งและการกระจัดของสะพานตามช่วงเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน ทำให้สามารถหาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าตัวประกอบการกระทบ นอกจากนี้ค่าความถี่ธรรมชาติ รูปร่างโหมด และความหน่วงของสะพานจะสามารถหาได้จากค่าความเร่งที่เก็บข้อมูลมาได้ จากนั้นเป็นส่วนของการสร้างแบบจำลองแสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน เพื่อศึกษาผลจากตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าตัวประกอบการกระทบ โดยทำการจำลองรถบรรทุกเป็นสามมิติประกอบด้วยมวล สปริงและตัวหน่วงซึ่งมี 11 องศาอิสระ เพื่อสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก และจำลองสะพานเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน เนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานทำให้สามารถสร้างสมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ทำการแก้สมการหาผลตอบสนองโดยใช้วิธีเชิงเลข พบว่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดที่ได้จากการทดลองในภาคสนามกับแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน ผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองในภาคสนามกับแบบจำลองที่ความเร็วรถบรรทุก 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมงมีความสอดคล้องกันดี แต่ที่ความเร็วรถบรรทุก 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากในการทดลองภาคสนามล้อรถจะไม่ได้สัมผัสกับผิวทางตลอดเวลาที่ความเร็วสูงและเนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่ายจึงไม่ได้คำนึงถึงเรื่องนี้ อย่างไรก็ตามผลตอบสนองสูงสุดยังมีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบการกระทบได้ซึ่งจะหาจากผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติและผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ การจำลองสภาพของผิวทางจะใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) จากการศึกษาค่าตัวประกอบการกระทบจาก

การโค้งตัวของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วงสะพาน พบว่า ความเร็วของรถบรรทุกมีผลต่อตัวประกอบ การกระแทกอยู่มากในสภาพผิวทางที่แยะโดยจะแปรผันตามกัน ตัวประกอบการกระแทกที่ได้ในหลายกรณีโดยเฉพาะเมื่อผิวทางไม่ได้จัดอยู่ในสภาพที่ดีจะมีค่าเกิน 0.30 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน AASHTO และตัวประกอบการกระแทกจากการโค้งตัวจะสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกจากโมเมนต์ดัดซึ่งความแตกต่างนี้จะน้อยลงเมื่อน้ำหนักของรถบรรทุกมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งการทดสอบจริงภาคสนามและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพบว่า ตัวประกอบการกระแทกจากหลาย ๆ กรณีในงานวิจัยที่ผ่านมาจะมากกว่าค่าที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะจำกัดความสนใจเฉพาะตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานเท่านั้น แต่อย่างไรก็ดี งานวิจัยของปานนท์ ลาซโรจน์ (2010) ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น พบว่า ตัวประกอบการกระแทกสูงสุดของสะพานนั้นอาจไม่ได้เกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงสะพาน โดยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ อาจมีโอกาสสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานได้ทุกตำแหน่งโดยเฉพาะบริเวณปลายสะพาน ส่วนปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก คือ ความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และความขรุขระของผิวทาง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะแสดงให้เห็นว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุกและความขรุขระของผิวทาง และค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันกับกับความยาวช่วงของสะพาน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่อาจส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกได้แก่ ลักษณะของรถบรรทุกคือ ระบบกันสะเทือน จำนวนเพลาน้ำหนัก ความถี่ธรรมชาติ การสั่นเริ่มต้น และลักษณะของสะพานคือ สติฟเนส ความถี่ธรรมชาติ ความหน่วง ดังนั้นการศึกษาค่าตัวประกอบการกระแทกโดยใช้แบบจำลอง จึงไม่อาจพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องใกล้เคียงความจริง การทดสอบหาค่าตัวประกอบการกระแทกในสะพานจริง จึงเป็นการได้ค่าที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือมากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าการทดสอบจริงภาคสนามที่ศึกษาในอดีตพิจารณาข้อมูลรถบรรทุกเพียงจำนวนน้อย และบางงานวิจัยใช้แนวทางในการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกที่อาจจะทำให้ผลที่ได้รับมีความคลาดเคลื่อนสูง การศึกษานี้จึงจะทำการศึกษาดังกล่าวซึ่งให้ค่าที่มีความถูกต้องสูงและพิจารณากรณีของการวิ่งผ่านของรถบรรทุกจำนวนมาก เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ครอบคลุมและสะท้อนสภาพการจราจรจริงมากที่สุด

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพานจากผลการทดสอบสะพานจริง
- 2) เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อตัวประกอบการกระแทกของสะพาน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การศึกษาแบบจำลองสะพานทางคณิตศาสตร์

- 1) พิจารณาสะพานที่มีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว (Simply supported bridge) ที่มีการกระจายของมวลและความแข็งเกร็งอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของสะพาน
- 2) พิจารณาการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานและรถบรรทุกในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น
- 3) สมมติฐานว่าล้อรถบรรทุกสัมผัสกับพื้นผิวของสะพานตลอดเวลา
- 4) รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานในช่องทางเดิมและมีความเร็วคงที่ตลอดความยาวของสะพาน
- 5) รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานมีเพียงคันเดียวและมีความเร็วคงที่
- 6) ศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน

1.4.2 การศึกษาแบบทดสอบสะพานจริงภาคสนาม

- 1) พิจารณาสะพานที่มีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว (Simply supported bridge) ที่มีการกระจายของมวลและความแข็งเกร็งอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของสะพาน
- 2) พิจารณาพฤติกรรมของสะพาน เนื่องจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติ
- 3) สมมติฐานว่าล้อรถบรรทุกสัมผัสกับพื้นผิวของสะพานตลอดเวลาในระหว่างการเก็บข้อมูล
- 4) รถบรรทุกที่พิจารณามีค่าความเร็วในการเคลื่อนที่และน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ กัน
- 5) รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานในช่องทางเดิมและมีความเร็วคงที่ตลอดความยาวของสะพาน

- 6) ทำการเก็บข้อมูลทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามความยาวสะพาน
- 7) ศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน
- 8) ศึกษาผลการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนสะพาน โดยนำมาเปรียบเทียบกันและจะอภิปรายผลตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

- 1) ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพานจากการเคลื่อนที่ไปบนสะพานของรถบรรทุก
- 2) เพื่อเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน
- 3) เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวประกอบการกระแทกของสะพาน
- 4) สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ การออกแบบและปรับปรุงซ่อมแซมสะพาน เพื่อให้มีความถูกต้องและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

1.6 การดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อในงานวิจัย ด้วยการรวบรวมข้อมูลและทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต รวมถึงศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้
- 2) ทำการเก็บข้อมูลทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกจากการทดสอบจริงภาคสนาม
- 3) ทำการจำแนก คัดกรองและจัดเก็บข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม
- 4) สร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์และตรวจสอบความถูกต้อง
- 5) จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 6) ทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกจากข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม

- 7) ทำการหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม และแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพานภายใต้ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 8) อภิปรายผลการศึกษา โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบจริงประกอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์
- 9) สรุปผลการศึกษา
- 10) จัดทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน และตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) ตามลำดับ โดยส่วนแรกจะนำข้อมูลลักษณะของรถบรรทุกและสะพานไปสร้างแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของระบบรถบรรทุกและระบบสะพาน จากนั้นรวมผลของสองระบบทำให้ได้ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์หาค่าตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปหาค่าตัวประกอบการกระทบได้ตามส่วนที่สอง ซึ่งจะกล่าวถึงนิยามของตัวประกอบการกระทบ มาตรฐานที่เกี่ยวข้องและการหาค่าตัวประกอบการกระทบ

2.1 ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

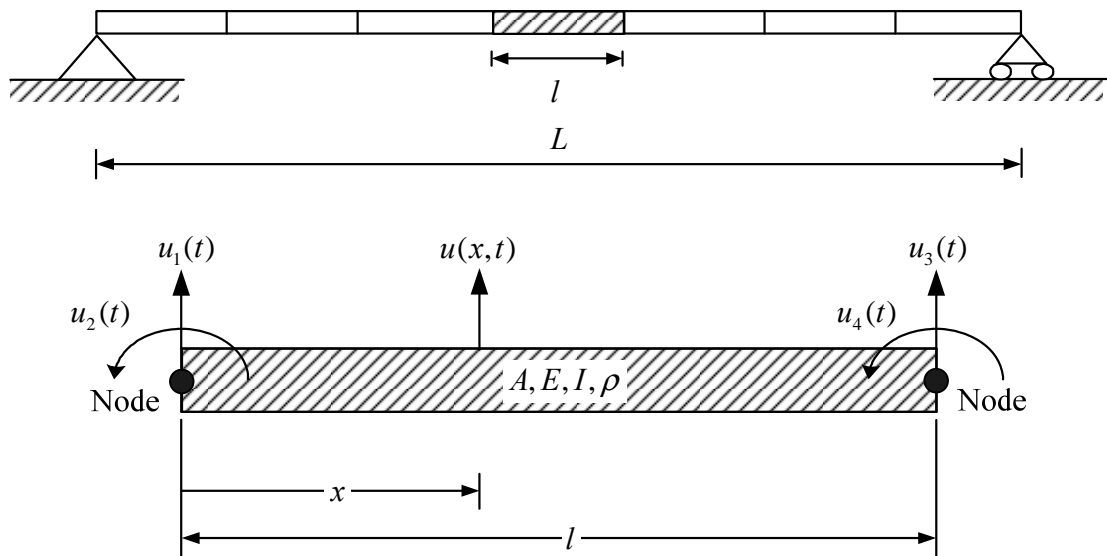
ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบสะพาน โดยทั่วไปแล้วจะมีสองวิธีในการจำลองระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน วิธีแรกคือวิธีวนซ้ำแบบแยกจากกัน (Uncoupled iteration method) โดยรถบรรทุกและสะพานจะถูกแก้ปัญหโดยแยกออกจากกันแล้วใช้กระบวนการทำซ้ำในแต่ละช่วงเวลา เพื่อที่จะหาสมดุลของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกและสะพาน อีกวิธีก็คือจำลองการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยที่การจำลองดังกล่าวจะแก้ปัญหารถบรรทุกกับสะพานไปพร้อมกัน ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถรวมสะพานและรถบรรทุกให้เป็นระบบควบคุมระบบเดียว ซึ่งสามารถแก้ปัญหได้พร้อมกันในแต่ละช่วงเวลาโดยไม่ต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ

2.1.1 การจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถบรรทุก สามารถถูกจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบแยกโหมด (Modal decomposition) ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสมในผลตอบสนองทางพลศาสตร์ นอกจากนั้นวิธีนี้ใช้พื้นฐานจากระบบต่อเนื่อง (Continuous system) และเทคนิคการรวมโหมด (Mode superposition technique) ซึ่งยากแก่การนำมาประยุกต์ใช้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ด้วยระบบแยกส่วน (Discrete system) ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้

2.1.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน

โครงสร้างสะพานถูกพิจารณาเป็นสะพานช่วงเดียวและแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นชิ้นส่วนคาน 2 ขั้ว (Node) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 แต่ละขั้วของชิ้นส่วนคานจะมี 2 องศาอิสระ (Degree of freedom) คือ การกระจัดในแนวดิ่งและเชิงหมุน



ภาพที่ 2.1 ชิ้นส่วนคานสี่ดีกรีอิสระ

- โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนคาน
 E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนคาน
 I คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนคาน
 ρ คือ มวลต่อหน่วยความยาวของคาน
 l คือ ความยาวของชิ้นส่วนคาน

ซึ่ง $u(x,t)$ คือการกระจัดในแนวดิ่งของชิ้นส่วนคานที่ระยะ x (Local coordinate) และเวลา t โดยที่จะต้องสอดคล้องกับสมการของคานที่ตำแหน่ง x และที่เวลา t ดังแสดงในสมการที่ 2.1

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

สำหรับในกรณี EI มีค่าคงที่ สมการที่ 2.1 จะสามารถเขียนได้เป็น

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

ซึ่งสามารถหาปริพันธ์ (Integrate) ได้เป็น

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

โดยที่ $c_i(t)$ คือ ค่าคงที่ของการหาปริพันธ์

สมการที่ 2.3 สามารถใช้ในการประมาณค่าการกระจัดในแนวดิ่งของชิ้นส่วนคานาได้ ซึ่งมีเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary condition) ดังนี้

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

จากความสัมพันธ์ข้างต้นเมื่อแทนลงในสมการที่ 2.3 จะสามารถหาค่าคงที่ของการหาปริพันธ์ได้ คือ

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

แทนสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.3 และทำการจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของการกระจัดเชิงขั้ว (Nodal displacement) จะได้สมการการกระจัดในแนวดิ่งของชิ้นส่วนคานาที่ระยะ x และเวลา t ใดๆ ดังนี้

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

โดยที่สัมประสิทธิ์ที่อยู่ข้างหน้า $u_i(t)$ คือ ฟังก์ชันพื้นฐาน (Shape function) สำหรับการกระจัดในแนวตั้งของชิ้นส่วนคาน

เมทริกซ์มวล (Mass matrix) ของชิ้นส่วนคานสามารถคำนวณได้จากการแทนสมการที่ 2.6 ลงไปในสมการของพลังงานจลน์ (Kinetic energy)

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

และสมการที่ 2.7 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของการกระจัดเชิงขั้วคือ

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

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

โดยที่ \mathbf{M} คือ เมทริกซ์มวล (Mass matrix) เวกเตอร์ $\mathbf{u}(t)$ เป็นเวกเตอร์ของการกระจัดเชิงขั้วดังภาพที่ 2.2 และเวกเตอร์ $\dot{\mathbf{u}}$ คือ อนุพันธ์ของเวกเตอร์ $\mathbf{u}(t)$ เทียบกับเวลา

หลังจากทำการหาปริพันธ์และจัดรูปแบบเวกเตอร์ของการกระจัดเชิงขั้ว (Nodal displacement) จะได้เมทริกซ์มวลสำหรับชิ้นส่วนคานดังนี้

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

ในการทำงานเดียวกัน สามารถหาเมทริกซ์สติฟเนส (Stiffness matrix) ได้จากการแทนสมการที่ 2.6 ลงในสมการพลังงานความเครียด (Strain energy)

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

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของการจัดเชิงขั้วได้เป็น

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

โดยที่ \mathbf{u} ได้กำหนดไว้ในสมการที่ 2.9 ดังนั้นเมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนคาน คือ

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

เมื่อได้เมทริกซ์มวลและเมทริกซ์สติฟเนสของแต่ละชิ้นส่วนคานแล้ว จึงรวมชิ้นส่วนคานแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันตามองศาอิสระที่ตรงกัน ซึ่งจะได้เมทริกซ์มวลและเมทริกซ์สติฟเนสของระบบ

เมทริกซ์ความหน่วงของสะพานสามารถสังเคราะห์ได้โดยพิจารณาการสั่นอิสระของระบบดังสมการ 2.14

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

เมื่อคูณ \mathbf{M}^{-1} ตลอดสมการที่ (2.22) จะได้

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

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

แปลงเวกเตอร์การเคลื่อนที่ขั้ว \mathbf{u} ให้เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนที่ในพิกัดเชิงโหมด

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

โดยที่ \mathbf{V} คือ เวกเตอร์ (Eigen vector) ของเมทริกซ์ $\bar{\mathbf{K}}$

\mathbf{q} คือ เวกเตอร์การเคลื่อนที่ในพิกัดเชิงโหมด

แทนสมการที่ 2.16 ลงในสมการที่ 2.17 และคูณตลอดด้วย \mathbf{V}^{-1} จะได้

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

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

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

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

สมมติให้เมทริกซ์ \mathbf{C}^* มีคุณสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonality) เช่นเดียวกับ \mathbf{K}^* จะได้ $\mathbf{C}^* = \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{C}}\mathbf{V}$

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

โดยที่ ξ_i คือ สัดส่วนความหน่วง (Damping ratio) ของโหมดที่ i

ω_i คือ ความถี่ธรรมชาติเชิงมุม (Angular natural frequency) ของโหมดที่ i

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

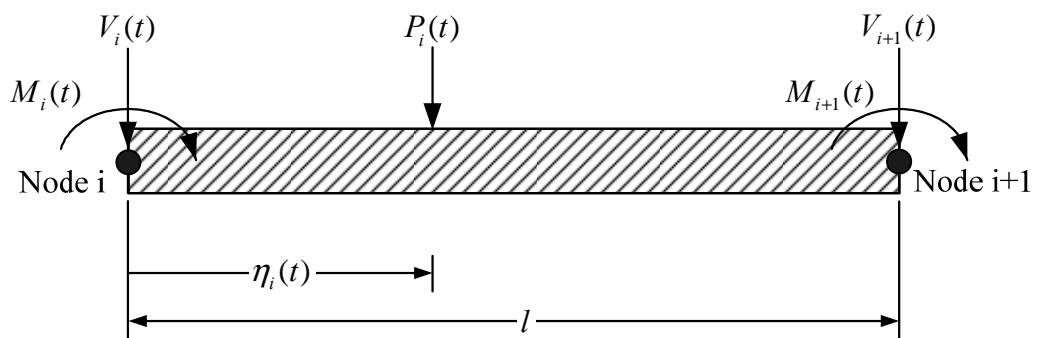
$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{V}\mathbf{C}^*\mathbf{V}^{-1} \quad (2.21)$$

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

จากสมการข้างต้นหากกำหนดให้ระบบสมการอธิบายเฉพาะส่วนการเคลื่อนที่ของสะพานก็จะสามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ได้เป็น

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

- โดยที่ \mathbf{M}_b คือ เมทริกซ์มวลรวมทุกชิ้นส่วนของสะพาน
 \mathbf{C}_b คือ เมทริกซ์ความหน่วงรวมทุกชิ้นส่วนของสะพาน
 \mathbf{K}_b คือ เมทริกซ์สติฟเนสรวมทุกชิ้นส่วนของสะพาน
 $\mathbf{U}(t)$ คือ เวกเตอร์ตอบสนองในพิกัดครอบคลุม (Global) ของสะพาน
 $\mathbf{P}_b(t)$ คือ เวกเตอร์แรงกระทำภายนอกของสะพาน



ภาพที่ 2.2 แรงกระทำที่ขั้วซึ่งแปลงจากแรงกระทำภายนอก

จากภาพที่ 2.2 แรงกระทำภายนอกของสะพานคือแรงปฏิกิริยาที่ถูกแปลงเป็นแรงกระทำที่ขั้วขององศาอิสระของสะพานโดยที่ $\eta_i(t)$ คือ ระยะจากขั้วซ้ายของชิ้นส่วนคานถึงตำแหน่งของแรงกระทำ $P_i(t)$ ดังนั้นแรงกระทำที่ขั้วสามารถเขียนได้ดังนี้

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

โดยที่ $V_i(t)$ คือ แรงกระทำในแนวตั้งของขั้วที่ i^{th} ของชิ้นส่วน

$V_{i+1}(t)$ คือ แรงกระทำในแนวดิ่งของข้อที่ $i+1^{th}$ ของชิ้นส่วน

$M_i(t)$ คือ โมเมนต์ดัดของข้อที่ i^{th} ของชิ้นส่วน

$M_{i+1}(t)$ คือ โมเมนต์ดัดของข้อที่ $i+1^{th}$ ของชิ้นส่วน

จากสมการข้างต้นฟังก์ชันพื้นฐาน (Shape function) ของชิ้นส่วนที่ i^{th} ซึ่งเปลี่ยนแรงกระทำภายนอกเป็นแรงกระทำที่ข้อสามารถเขียนได้ดังนี้

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

โดยที่ฟังก์ชันพื้นฐานของแรงกระทำภายนอกในพิกัดครอบคลุม (Global external load shape function) สมการที่ 2.25 สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$\mathbf{H}_c = \left\{ \begin{array}{cccccc} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{H}_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{H}_i & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \mathbf{H}_M & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{array} \right\}^T \quad (2.26)$$

โดยที่ \mathbf{H}_c คือ เมทริกซ์ขนาด $N \times M$ โดยที่สมาชิกในเมทริกซ์เป็นศูนย์ ยกเว้นที่ตำแหน่งองศาอิสระซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของข้อในชิ้นส่วนคานที่มีแรงกระทำ

N คือ จำนวนขององศาอิสระของสะพานภายหลังจากการพิจารณาสภาวะเงื่อนไขขอบเขต

M คือ จำนวนของแรงกระทำภายนอก

จากสมการที่ 2.26 แรงปฏิกริยาระหว่างสะพานกับรถบรรทุกสามารถแปลงเป็นแรงกระทำที่ข้อ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ข้อ (Nodal load) และแรงกระทำในพิกัดครอบคลุม (Global load) ดังนี้

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

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

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

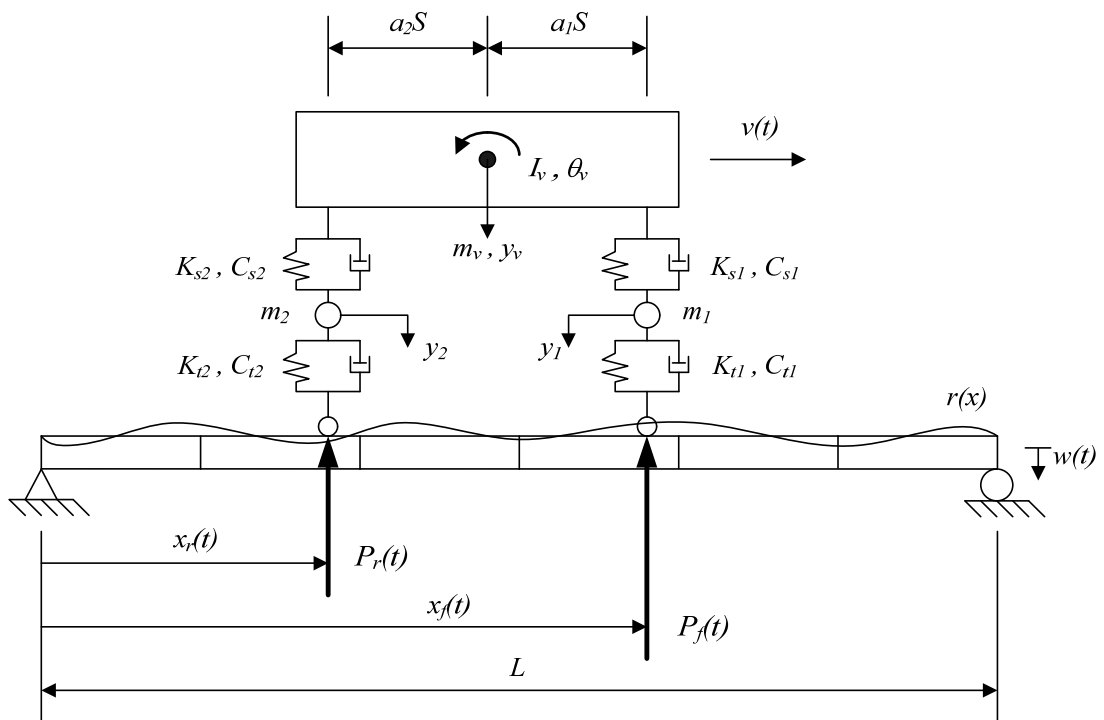
$\mathbf{H}_c(x(t))$ คือ เวกเตอร์แปลงแรงภายนอกเป็นแรงที่ข้อ

$\mathbf{P}_{int}(t)$ คือ เวกเตอร์แรงปฏิกริยาระหว่างสะพานกับรถบรรทุก ที่สอดคล้องกับจำนวนเพลารถบรรทุก

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของสะพานสามารถเขียนได้ดังนี้

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

2.1.3 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก

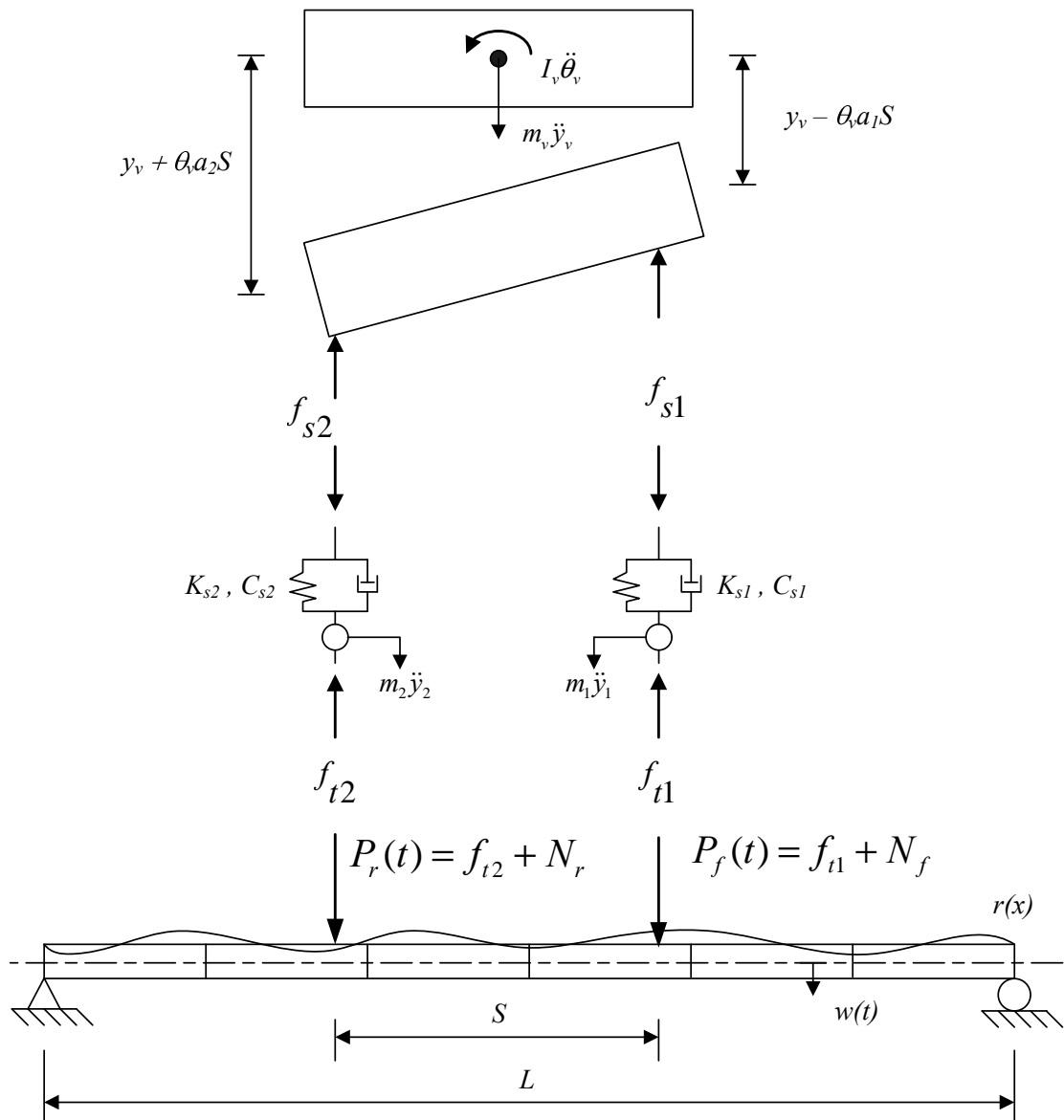


ภาพที่ 2.3 แบบจำลองรถบรรทุก

โดยที่	m_v	คือ	มวลของรถบรรทุก
	I_v	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยมวลหมุนของรถบรรทุก
	m_1	คือ	มวลของระบบกันสะเทือนเพลาน้ำ
	m_2	คือ	มวลของระบบกันสะเทือนเพลาลัง
	K_{s1}	คือ	สติฟเนสของระบบกันสะเทือนเพลาน้ำ
	K_{s2}	คือ	สติฟเนสของระบบกันสะเทือนเพลาลัง

C_{s1}	คือ	ความหน่วงของระบบกันสะเทือนเพลาน้ำ
C_{s2}	คือ	ความหน่วงของระบบกันสะเทือนเพลาลัง
K_{r1}	คือ	สติเฟนสของล้อหน้า
K_{r2}	คือ	สติเฟนสของล้อหลัง
C_{t1}	คือ	ความหน่วงของล้อหน้า
C_{t2}	คือ	ความหน่วงของล้อหลัง
S	คือ	ระยะระหว่างเพล
L	คือ	ความยาวช่วงของสะพาน
$x_f(t)$	คือ	ตำแหน่งของเพลาน้ำที่เวลา t ใดๆ
$x_r(t)$	คือ	ตำแหน่งของเพลาลังที่เวลา t ใดๆ
$P_f(t)$	คือ	แรงของเพลาน้ำที่เวลา t ใดๆ
$P_r(t)$	คือ	แรงของเพลาลังที่เวลา t ใดๆ
v	คือ	ความเร็วรถบรรทุก
θ_v	คือ	การหมุนของมวลรถบรรทุก
y_v	คือ	การกระจัดในแนวดิ่งของรถบรรทุก
y_1	คือ	การกระจัดในแนวดิ่งของเพลาน้ำและหลัง
y_2	คือ	การกระจัดในแนวดิ่งของเพลาน้ำและหลัง
$w(t)$	คือ	การแอ่นตัวพลศาสตร์ในแนวดิ่งของสะพาน
$r(x)$	คือ	ความขรุขระของพื้นถนนที่ตำแหน่ง x
a_1	คือ	อัตราส่วนระหว่างระยะจากศูนย์กลางถึงเพลาน้ำกับระยะระหว่างเพล
a_2	คือ	อัตราส่วนระหว่างระยะจากศูนย์กลางถึงเพลาลังกับระยะระหว่างเพล

ภาพที่ 2.3 แสดงแบบจำลองรถบรรทุกกับสะพาน ซึ่งรถบรรทุกแล่นข้ามสะพานด้วยความเร็ว $v(t)$ แบบจำลองรถบรรทุกมี 4 องศาอิสระประกอบด้วย 3 องศาอิสระสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งคือ การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเพลาน้ำ การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเพลาลัง การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวลรถ และ 1 องศาอิสระ สำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุนของมวลรถ โดยสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ระบบสมการทางด้านพลศาสตร์ของรถบรรทุกในแต่ละองศาอิสระดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แผนภาพอิสระของรถบรรทุกกับสะพาน

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวตั้งที่มวลรถบรรทุก

$$\sum F = m_v \ddot{y}_v \quad ; \quad -f_{s1} - f_{s2} = m_v \ddot{y}_v \quad (2.30)$$

โดยที่

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

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

แทนค่า f_{s1}, f_{s2} ลงในสมการที่ 2.31 ได้สมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของรถบรรทุก

$$\begin{aligned} & m_v \ddot{y}_v + (C_{s1} + C_{s2}) \dot{y}_v + (K_{s1} + K_{s2}) y_v \\ & + (-C_{s1} a_1 S + C_{s2} a_2 S) \dot{\theta}_v + (-K_{s1} a_1 S + K_{s2} a_2 S) \theta_v \\ & + (-C_{s1}) \dot{y}_1 + (-K_{s1}) y_1 + (-C_{s2}) \dot{y}_2 + (-K_{s2}) y_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.31)$$

พิจารณาการหมุนของมวลที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง

$$\sum M_c = I_v \ddot{\theta}_v \quad ; \quad f_{s1} a_1 S - f_{s2} a_2 S = I_v \ddot{\theta}_v \quad (2.32)$$

แทนค่า f_{s1}, f_{s2} ลงในสมการที่ 2.33 ได้สมการการเคลื่อนที่แบบหมุนของรถบรรทุก

$$\begin{aligned} & I_v \ddot{\theta}_v + (-C_{s1} a_1 S + C_{s2} a_2 S) \dot{y}_v + (-K_{s1} a_1 S + K_{s2} a_2 S) y_v \\ & + (C_{s1} a_1^2 S^2 + C_{s2} a_2^2 S^2) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1^2 S^2 + K_{s2} a_2^2 S^2) \theta_v \\ & + (C_{s1} a_1 S) \dot{y}_1 + (K_{s1} a_1 S) y_1 + (-C_{s2} a_2 S) \dot{y}_2 + (-K_{s2} a_2 S) y_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวตั้งของมวล m_1 (ส่วนของล้อหน้า)

$$\sum F = m_1 \ddot{y}_1 \quad ; \quad f_{s1} - f_{t1} = m_1 \ddot{y}_1 \quad (2.34)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} f_{t1} &= K_{t1} (y_1 - \Delta_1) + C_{t1} (\dot{y}_1 - \dot{\Delta}_1) \\ \Delta_1 &= (w_1(x_f(t), t) + r(x_f(t))) \\ \dot{\Delta}_1 &= (\dot{w}_1(x_f(t), t) + \dot{r}(x_f(t))) \end{aligned} \quad (2.35)$$

แทนค่า f_{s1}, f_{t1} ลงในสมการที่ 2.34 ได้สมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของมวล m_1

$$\begin{aligned} & m_1 \ddot{y}_1 + (-C_{s1}) \dot{y}_v + (-K_{s1}) y_v + (C_{s1} a_1 S) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1 S) \theta_v \\ & + (C_{s1}) \dot{y}_1 + (K_{s1}) y_1 = -f_{t1} \end{aligned} \quad (2.36)$$

พิจารณาสมมูลของแรงในแนวดิ่งของมวล m_2 (ส่วนของล้อหลัง)

$$\sum F = m_2 \ddot{y}_2 \quad ; \quad f_{s2} - f_{t2} = m_2 \ddot{y}_2 \quad (2.37)$$

โดยที่

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

$$\Delta_2 = (w_2(x_r(t), t) + r(x_r(t))) \quad (2.38)$$

$$\dot{\Delta}_2 = (\dot{w}_1(x_r(t), t) + \dot{r}(x_r(t)))$$

แทนค่า f_{s2}, f_{t2} ลงในสมการที่ 2.29 ได้สมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวล m_2

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{y}_2 + (-C_{s2})\dot{y}_v + (-K_{s2})y_v + (-C_{s2}a_2S)\dot{\theta}_v + (-K_{s2}a_2S)\theta_v \\ + (C_{s2})\dot{y}_2 + (K_{s2})y_2 = -f_{t2} \end{aligned} \quad (2.39)$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ โดยใช้สมการที่ 2.22, 2.33, 2.36 และ 2.39 ดังนี้

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}(t) = \mathbf{P}_v(t) \quad (2.40)$$

โดยที่

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

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

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

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

\mathbf{P}_v คือ พจน์ของแรงประกอบด้วยเวกเตอร์ของแรงปฏิกิริยาและเวกเตอร์ของแรงทางสถิติ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$\mathbf{P}_v(t) = - \left\{ \begin{matrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{int}(t) \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s \end{matrix} \right\} = - \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ P_f(t) \\ P_r(t) \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ N_f \\ N_r \end{matrix} \right\} \quad (2.41)$$

โดยที่

$$P_f(t) = (f_{11}(t) + N_f) = K_{11}(y_1(t) - \Delta_1(t)) + C_{11}(\dot{y}_1(t) - \dot{\Delta}_1(t)) + N_f$$

$$P_r(t) = (f_{12}(t) + N_r) = K_{12}(y_2(t) - \Delta_2(t)) + C_{12}(\dot{y}_2(t) - \dot{\Delta}_2(t)) + N_r$$

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

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

2.1.4 การจำลองความขรุขระของผิวทาง

ความขรุขระของพื้นผิวสะพานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน จากผลการศึกษาในอดีตแสดงให้เห็นว่ามีผลต่อการสั่นไหวของสะพานเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้สมการตามมาตรฐาน ISO 8608 (1995) โดยอธิบายในรูปของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ของการกระจัด (Displacement power spectral density) เป็นตัวบ่งบอกระดับความขรุขระ ดังสมการที่ 2.42

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (2.42)$$

โดยที่ $G_d(n)$ คือ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ความถี่ของความขรุขระใดๆ ของการกระจัด (m^3)

$G_d(n_0)$ คือ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ความถี่อ้างอิงของการกระจัด (m^3)

n_0 คือ ความถี่อ้างอิง (Reference spatial frequency, Cycle/m)

n คือ ความถี่ของความขรุขระ (Spatial frequency, Cycle/m)

w คือ เลขยกกำลังของ PSD ซึ่งเป็นค่าคงที่

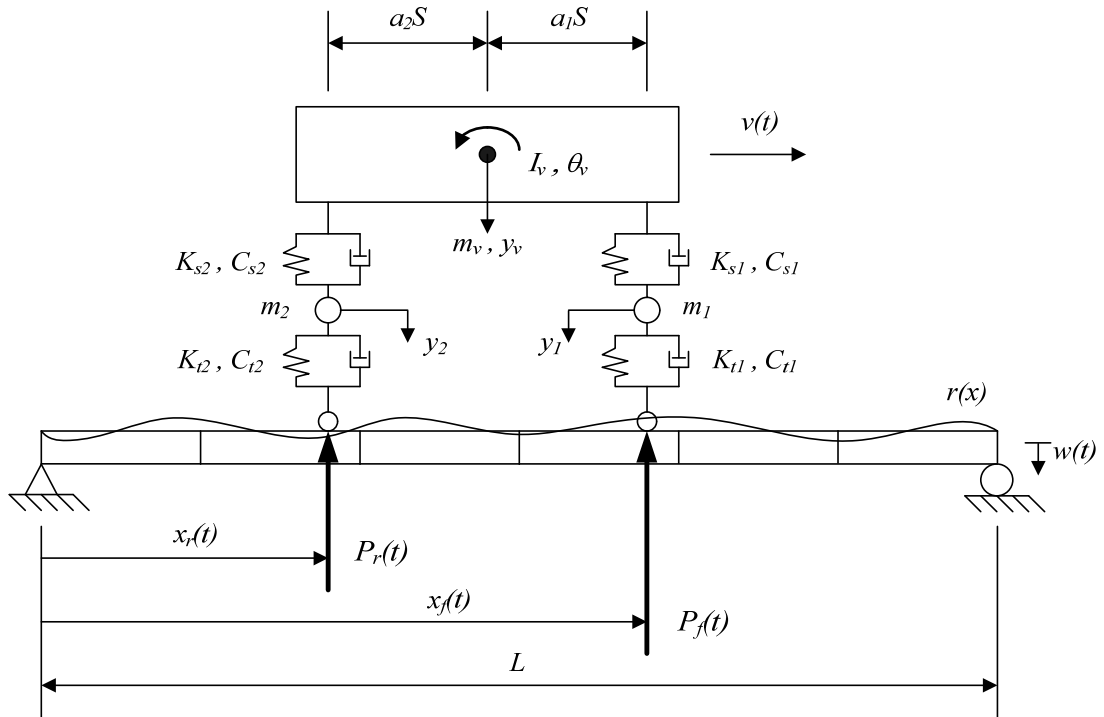
การจัดแบ่งประเภทของพื้นผิวตามระดับของความขรุขระ จะมีการประมาณระดับของความขรุขระจากค่า $G_d(n_0)$ โดยตามมาตรฐานของ ISO จะให้กราฟและตารางความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมกับความถี่ของความขรุขระสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ ซึ่งจะใช้ค่า $n_0 = 0.1$ รอบต่อเมตร และ $w = 2$ โดยมีการสมมติว่าความเร็วของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมมีค่าคงที่ (Constant velocity power spectral density)

จากทฤษฎีความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม สามารถนำมาจำลองรูปแบบของความขรุขระตามความยาวสะพานที่ตำแหน่งต่างๆโดยประยุกต์ใช้การแปลงผกผันฟูเรียร์ (Inverse fast Fourier transformation) ที่ความถี่อ้างอิง จากงานวิจัยของ Deng (2010) และ Silva (2004) ดังสมการที่ 2.43

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_d(n_i)\Delta n} \cos(2\pi n_i x + \theta_i) \quad (2.43)$$

- โดยที่ $y(x)$ คือ ระดับของความขรุขระบนสะพานที่ระยะ x ใดๆ
- n_i คือ ค่าความถี่ที่จุดกึ่งกลางของช่วงที่ i
- Δ คือ ระยะห่างช่วงระหว่างพิกัดของแนวพื้นผิว และ $\Delta n = 1/N\Delta$
- N คือ จำนวนชุดข้อมูล
- θ_i คือ ค่ามุมเฟสสุ่มอิสระระหว่าง 0 ถึง 2π

2.1.5 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน



ภาพที่ 2.5 ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

จากการจำลองสะพานในหัวข้อ 2.1.2 การจำลองรถบรรทุกในหัวข้อ 2.1.3 และการจำลองความขรุขระของผิวทางในหัวข้อ 2.1.4 นำไปสร้างการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานให้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุกกับสะพาน ทุกๆองศาอิสระทั้งของรถบรรทุกและสะพานจะต้องถูกแก้สมการพร้อมๆกัน ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุกกับสะพานคือ การรวมมวล, ความหน่วง, สติฟเนสและพจน์ของแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับทุกๆองศาอิสระเข้าด้วยกัน

จากสมการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุกกับสะพาน ในกรณีที่จำนวนเพลลา (M) เท่ากับ 2 สามารถเขียนเวกเตอร์แรงปฏิสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_{int}(t) &= \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} \\
&= \begin{Bmatrix} K_{t1}(y_1(t) - w_1(x_f(t), t) - r(x_f(t))) + C_{t1}(\dot{y}_1(t) - \dot{w}_1(x_f(t), t) - \dot{r}(x_f(t))) \\ K_{t2}(y_2(t) - w_2(x_r(t), t) - r(x_r(t))) + C_{t2}(\dot{y}_2(t) - \dot{w}_2(x_r(t), t) - \dot{r}(x_r(t))) \end{Bmatrix} \\
&\quad + \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) g \\ (m_2 + a_1 m_v) g \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.44}$$

สามารถสังเกตได้ว่าพจน์ของแรงปฏิกิริยาของสมการที่ 2.44 ประกอบด้วยองศาอิสระทั้งของรถบรรทุกและสะพาน ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและสะพานจะถูกจัดเรียงใหม่ได้ดังนี้

ถ้าค่าผลตอบสนองของสะพาน $\mathbf{R}(t)$ สามารถหามาได้การแอนตัวของสะพานที่ตำแหน่ง x และเวลา t สามารถคำนวณได้จาก

$$w(x, t) = \mathbf{H}_c^T(x(t)) \cdot \mathbf{U}(t) \tag{2.45}$$

ทำการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของการแอนตัวของสะพานเทียบกับเวลาได้

$$\dot{w}(x, t) = \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{U}(t) \cdot \dot{x}(t) + \mathbf{H}_c^T(x(t)) \cdot \dot{\mathbf{U}}(t) \tag{2.46}$$

แทนค่าสมการที่ 2.45 และ 2.46 ลงในสมการที่ 2.42 ได้

$$\begin{aligned}
P_f(t) &= K_{t1}(y_1(t) - \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \cdot \mathbf{U}(t) - r(x_f(t))) \\
&\quad + C_{t1} \left(\dot{y}_1(t) - \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_f(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{U}(t) \cdot v(t) - \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \cdot \dot{\mathbf{U}}(t) \right) \\
&\quad + (m_1 + a_2 m_v) g
\end{aligned} \tag{2.47}$$

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

สมการที่ 2.47 สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังแสดง

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \end{Bmatrix} \\
 &\quad - \begin{bmatrix} K_{t1} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) + C_{t1} \cdot v(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_f(t))}{\partial x} \\ K_{t2} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) + C_{t2} \cdot v(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_r(t))}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \{\mathbf{U}(t)\} \\
 &\quad - \begin{bmatrix} C_{t1} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \\ C_{t2} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \end{bmatrix} \cdot \{\dot{\mathbf{U}}(t)\} - \begin{Bmatrix} K_{t1} \cdot r(x_f(t)) \\ K_{t2} \cdot r(x_r(t)) \end{Bmatrix} \\
 &\quad + \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) \cdot g \\ (m_2 + a_1 m_v) \cdot g \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

นำสมการที่ 2.48 ไปแทนในสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2.41 จะได้สมการสำหรับองศาอิสระของรถบรรทุก

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) - \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_{v1} &= \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & I_v \end{bmatrix} \\
 \mathbf{M}_{v2} &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}_{v11} &= \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & (-C_{s1}a_1 + C_{s2}a_2)S \\ (-C_{s1}a_1 + C_{s2}a_2)S & (C_{s1}a_1^2 + C_{s2}a_2^2)S^2 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}_{v12} &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & -C_{s2} \\ C_{s1}a_1S & -C_{s2}a_2S \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

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

ทำการแทนสมการที่ 2.47 ลงในสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน 2.34 เหมือนในสมการที่ 2.48 จะได้สมการสำหรับองศาอิสระของสะพาน

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} \\
& = \begin{Bmatrix} -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{M}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.50}$$

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

ทำการรวมสมการที่ 2.49 และ 2.50 สมการเคลื่อนที่ในพิกัดครอบคลุมของระบบ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) - \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} \quad (2.51) \\ & = \begin{Bmatrix} -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{M}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

สมการที่ 2.40 คือสมการแสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานและสมการที่ 2.37 คือสมการของน้ำหนักที่เพลาหน้าและหลัง ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักทางสถิติของรถบรรทุก และแรงปฏิกริยาระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน การปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานสามารถแก้ปัญหาได้ที่ละขั้นๆ โดยวิธีการหาปริพันธ์โดยตรง (The direct integration method) ซึ่งได้แก่ วิธีการของนิวมาร์คเบต้า (The Newmark's β method) หรือ วิธีการแบบแยกโดยการสร้างสเตต-สเปซ (The state-space formulation)

2.2 ตัวประกอบการกระแทก

โดยทั่วไปในการออกแบบสะพานจะต้องคำนึงถึงผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์จากรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่าน โดยผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์จะถูกพิจารณาให้เป็นผลตอบสนองทางด้านสถิติที่เพิ่มขึ้นจากการคูณด้วยค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) ซึ่งค่าตัวประกอบการกระแทกสามารถคำนวณได้จากผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติของสะพาน ซึ่งนำเสนอการเพิ่มขึ้นของผลตอบสนองจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

2.2.1 นิยาม

ตัวประกอบการกระแทกสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิต จากงานวิจัยของ Deng และ Cai (2010) ดังสมการที่ 2.52

$$I(x) = \frac{R_d(x) - R_s(x)}{R_s(x)} \quad (2.52)$$

โดยที่ $I(x)$ คือ ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใดๆ บนพื้นสะพาน

$R_d(x)$ คือ ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ที่ตำแหน่ง x ใดๆ บนพื้นสะพาน

$R_s(x)$ คือ ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิตที่ตำแหน่ง x ใดๆ บนพื้นสะพาน

2.2.2 มาตรฐานเกี่ยวกับตัวประกอบการกระแทก

มาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบสะพานได้กำหนดค่าตัวประกอบการกระแทกขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของสะพาน (L) และความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f) ตามสมการดังต่อไปนี้

1) มาตรฐานการทางสหรัฐอเมริกา (AASHTO)

$$I = \frac{50}{L(ft)+125} = \frac{15.24}{L(m)+38.1} \leq 0.3 \quad (2.53)$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน หน่วยฟุตหรือเมตร

2) มาตรฐานการออกแบบของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Specification for Highway Bridge)

$$I = \frac{20}{L(m)+50} \quad (2.54)$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน หน่วยเมตร

3) มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศเยอรมัน (West German Code)

$$I = 0.4 - 0.008L(m) \quad (2.55)$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน หน่วยเมตร

4) มาตรฐานการออกแบบสะพานของฝรั่งเศส (French Cahier des Prescription)

$$I = \frac{0.64}{0.2L(m)+1} \leq 0.4 \quad (\text{Concrete bridge})$$

$$I = \frac{0.80}{0.2L(m)+1} \leq 0.4 \quad (\text{Steel and composite bridge}) \quad (2.56)$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน หน่วยเมตร

5) มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศอิตาลี (Italian code)

$$I = \frac{(100-L(m))^2}{100(250-L(m))} \geq 0 \quad (2.57)$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน หน่วยเมตร

6) มาตรฐานของประเทศแคนาดา (Ontario Highway Bridge Design code)

$$\begin{aligned} I &= 0.2 & f &\leq 1 \text{ Hz} \\ &= 0.4 & 2.5 \text{ Hz} &\leq f \leq 4.5 \text{ Hz} \\ &= 0.25 & f &\geq 6 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2.58)$$

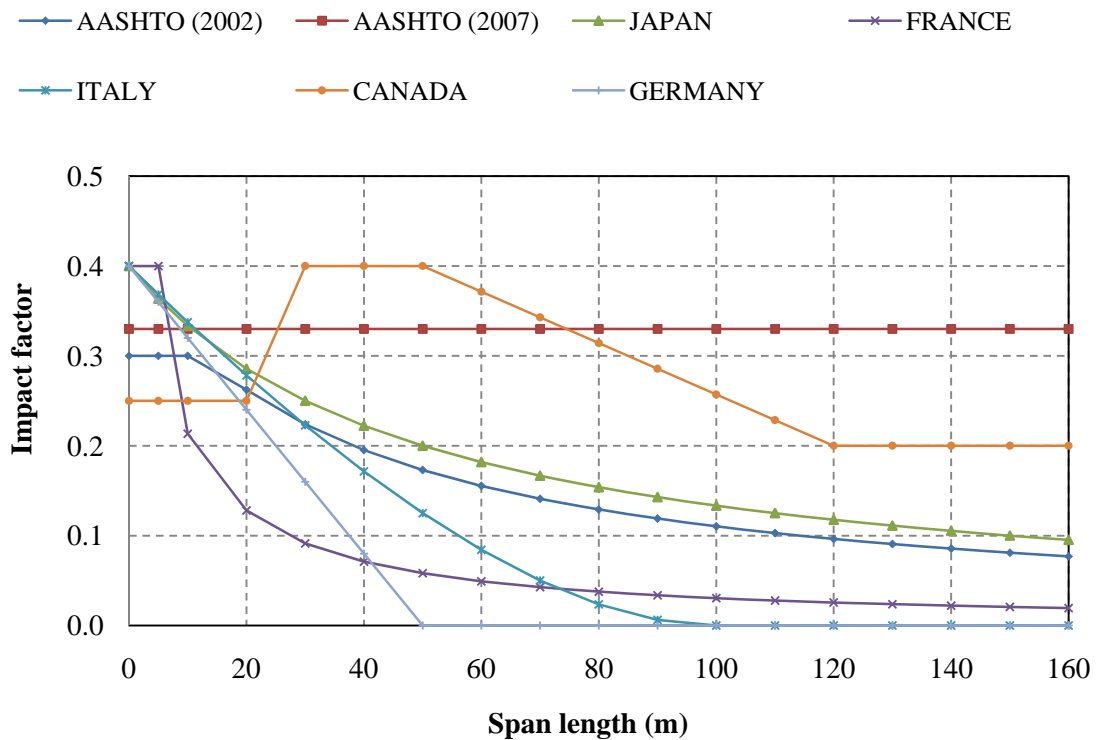
โดยที่ f คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน หน่วยเฮิรตซ์

มาตรฐานต่าง ๆ ยกเว้นมาตรฐานของแคนาดาจะให้สูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพาน แต่มาตรฐานของแคนาดาจะให้ตัวประกอบการกระแทกตามความถี่ธรรมชาติของสะพานซึ่งสามารถแปลงเป็นความยาวช่วงของสะพาน จากงานวิจัยของ Chaallal (1998) ดังสมการที่ 2.59

$$f = 82L^{-0.9} \quad (2.59)$$

การแปลงความถี่ธรรมชาติตามมาตรฐานของแคนาดาให้เป็นความยาวช่วงสะพานตามสมการที่ 2.59 มีสมมติฐานว่า ความถี่ธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพานเท่านั้น โดยมวลและสติเฟนสของสะพานที่แต่ละความยาวช่วงมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่ส่งผลมากนักต่อความถี่ธรรมชาติสะพาน

ทำให้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกจากตามมาตรฐานการออกแบบสะพานต่าง ๆ กับความยาวช่วงของสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 2.6

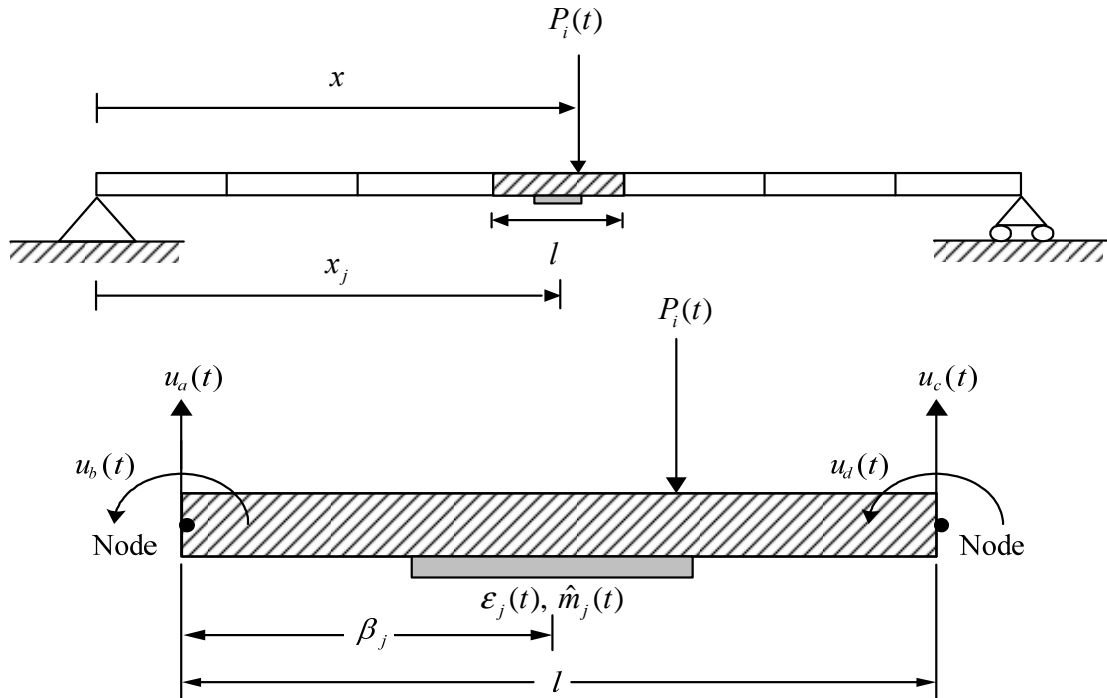


ภาพที่ 2.6 ตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานการออกแบบสะพานต่าง ๆ จำแนกตามความยาวช่วงของสะพาน (Moghimi, 2008)

2.3 การคำนวณค่าตัวประกอบการกระแทก

ตัวประกอบการกระแทกจะหาได้จากสมการที่ 2.52 ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน (R_d) และผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิตของสะพาน (R_s) ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 มาทำการวิเคราะห์หาผลตอบสนองภายใต้เงื่อนไขต่างๆของสะพานและรูปแบบต่างๆของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน แล้วจึงคำนวณหาค่า R_d และ R_s ดังนี้

2.3.1 ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน (R_d)



ภาพที่ 2.7 ตำแหน่งตรวจวัดผลตอบสนองในชิ้นส่วนของคาน

พิจารณาสะพานในชิ้นส่วนซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัด ที่ต้องการทราบค่าผลตอบสนอง ความเครียด หรือโมเมนต์ดัดของสะพาน ดังภาพที่ 2.7 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งผิวล่างของชิ้นส่วนคานในรูป สามารถพิจารณาได้จาก

$$\varepsilon_j(x_j, t) = -\gamma_j \left. \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right|_{x=x_j} \quad (2.60)$$

โดยที่ γ_j คือระยะระหว่างขอบผิวล่างกับแกนสะเทินของหน้าตัดพื้นสะพานที่ตำแหน่งตรวจวัด x_j แทนค่า $w(x, t)$ ลงในสมการที่ 2.60 ได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_j(\beta_j, t) = & -\left(\frac{\gamma_j}{l^3}\right) \cdot [(12\beta_j - 6l)u_1(t) + l(6\beta_j - 4l)u_2(t) \\ & - (12\beta_j - 6l)u_3(t) + l(6\beta_j - 2l)u_4(t)] \end{aligned} \quad (2.61)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด $\hat{m}_j(t)$ และความเครียด $\varepsilon_j(t)$ สมการที่ 2.61 สามารถแปลงกลับเป็นโมเมนต์ดัดได้

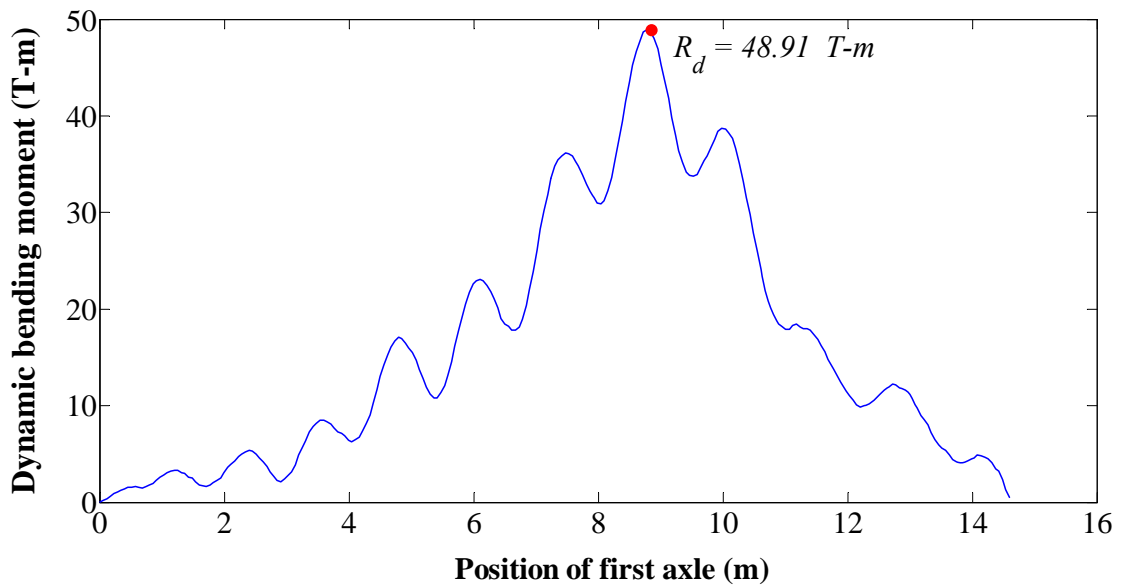
$$\hat{m}_j(t) = EI \cdot \frac{\varepsilon_j(t)}{\gamma_j} \quad (2.62)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.62 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\hat{m}_j(\beta_j, t) = -\left(\frac{EI}{l^3}\right) \{(12\beta_j - 6l)l(6\beta_j - 4l) - (12\beta_j - 6l)l(6\beta_j - 2l)\} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{Bmatrix} \quad (2.63)$$

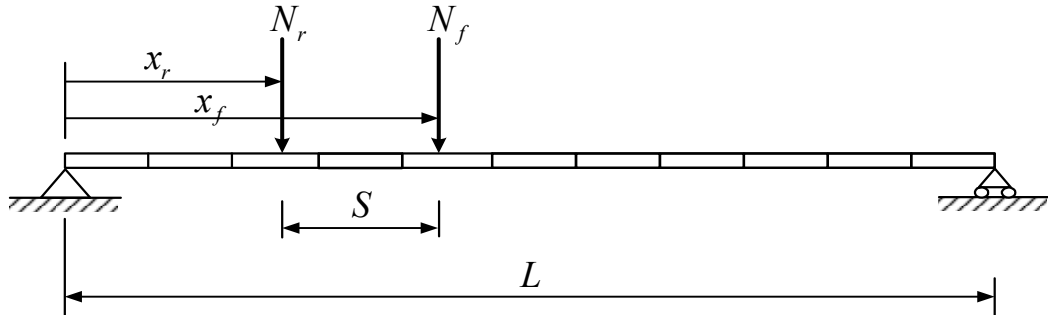
โดยที่ $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ และ $u_4(t)$ คือการกระจัดเชิงขั้ว (Nodal displacement) ที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนคานและ β_j คือตำแหน่งเฉพาะที่ (Local location) ของจุดวัด สามารถพิจารณาได้จากตำแหน่งพิกัดครอบคลุม (Global location) x_j

หลังจากนั้น นำผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานไปใช้ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระแทกดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

2.3.2 ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติของสะพาน (R_s)



ภาพที่ 2.9 น้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ไปบนสะพาน

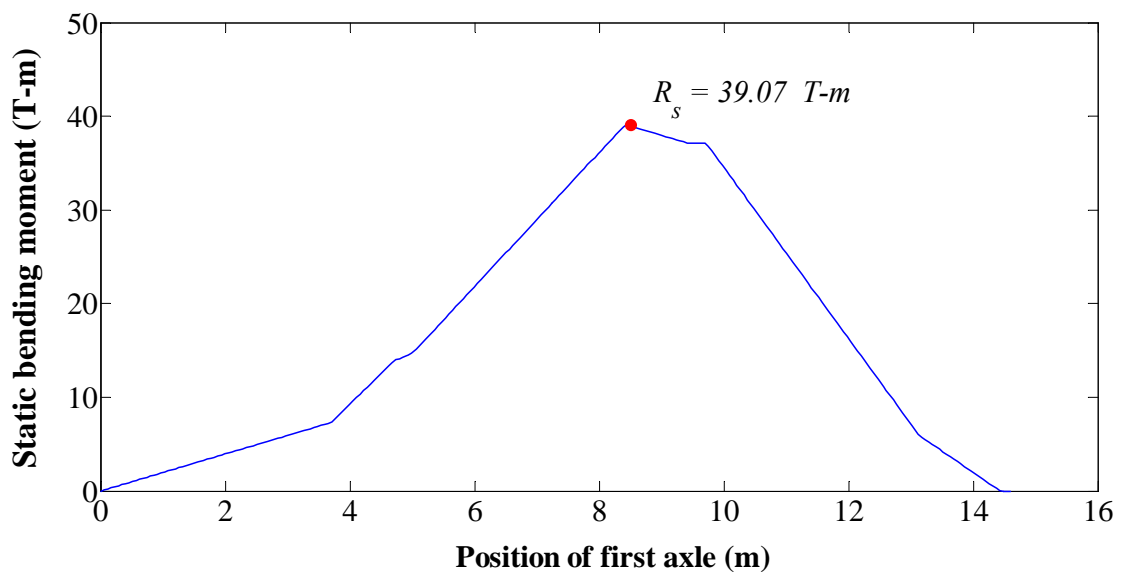
ซึ่งน้ำหนักเพลหน้า N_f และเพลหลัง N_r สามารถหาได้จากสมการที่ 2.64

$$\begin{aligned} N_f &= (m_1 + a_2 m_v) g \\ N_r &= (m_2 + a_1 m_v) g \end{aligned} \quad (2.64)$$

- โดยที่ N_f คือ น้ำหนักสถิติของรถบรรทุกที่เพลหน้า
 N_r คือ น้ำหนักสถิติของรถบรรทุกที่เพลหลัง
 m_v คือ มวลของรถบรรทุก
 m_1 คือ มวลของชุดกันสะเทือนเพลหน้า
 m_2 คือ มวลของชุดกันสะเทือนเพลหลัง
 S คือ ระยะห่างเพล
 a_1 คือ อัตราส่วนระหว่างระยะจากศูนย์กลางถึงเพลหน้ากับระยะห่างเพล
 a_2 คือ อัตราส่วนระหว่างระยะจากศูนย์กลางถึงเพลหลังกับระยะห่างเพล

ภาพที่ 2.9 แสดงวิธีการหาผลตอบสนองทางด้านสถิติของสะพาน โดยมีน้ำหนักกระทำแบบจุดจากเพลหน้าและเพลหลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน ซึ่งจะสามารถหาผลตอบสนองทางด้านสถิติได้ที่ทุก ๆ ตำแหน่งของสะพานโดยใช้หลักการของเส้นอิทธิพล (Influence line)

ทำการหาผลตอบสนองทางด้านสถิตเมื่อน้ำหนักกระทำแบบจุดจากเพลหน้า (N_f) เคลื่อนที่ไปบนสะพาน นำไปรวมกับผลตอบสนองทางด้านสถิตเมื่อน้ำหนักกระทำแบบจุดจากเพลหลัง (N_r) เคลื่อนที่ไปบนสะพาน ทำให้ได้ผลตอบสนองทางด้านสถิตจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก นำผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิตไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ผลตอบสนองทางด้านสถิตในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

2.3.3 ค่าตัวประกอบการกระแทก (I)

จากกรณีตัวอย่างจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบการกระแทกตามสมการที่ 2.52 ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ

$$\text{ที่ตำแหน่ง } x = \frac{L}{2}, \quad I\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{R_d\left(\frac{L}{2}\right) - R_s\left(\frac{L}{2}\right)}{R_s\left(\frac{L}{2}\right)} = \frac{48.91 - 39.07}{39.07} = 0.25 \quad (2.65)$$

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าส่วนใหญ่จะจำกัดความสนใจเฉพาะตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานเท่านั้น อีกทั้งมาตรฐานการออกแบบก็ได้กำหนดไว้เพียงค่าเดียว โดยอาจคิดว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางมีค่าสูงสุด อย่างไรก็ตามงานวิจัยของปานนท์ ลาขโรจน์ (2010) พบว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ อีกทั้งยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และความขรุขระของผิวทาง แต่นอกจากปัจจัยข้างต้นนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่อาจส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก อย่างไรก็ตาม การหาตัวประกอบการกระแทกจากการตรวจวัดสะพานจริง จึงเป็นวิธีการได้มาซึ่งค่าที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากกว่า ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสะพานในภาคสนาม เพื่อหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ของความยาวสะพานจากความสัมพันธ์ของผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และทางด้านสถิติในรูปของโมเมนต์ดัดของสะพาน โดยมีตัวแปร คือน้ำหนักบรรทุกรวม ความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะมากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานและเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าตัวประกอบการกระแทกที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงวิธีการศึกษาตัวประกอบการกระแทกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้อ้างอิงจากงานวิจัยของปานนท์ ลาขโรจน์ (2010) เฉพาะคุณสมบัติและค่าขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสะพานและรถบรรทุกภายใต้เงื่อนไขที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับแบบทดสอบภาคสนามเท่านั้น ส่วนที่สองจะกล่าวถึงวิธีการศึกษาตัวประกอบการกระแทกจากแบบทดสอบภาคสนาม ซึ่งอ้างอิงข้อมูลรถบรรทุกจากงานวิจัยของภาณุ ฟูงสุข (2004) ซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามอย่างต่อเนื่องที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามความยาวของสะพานภายใต้การแล่นผ่านของรถบรรทุกประเภทรถสิบล้อ ส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักในงานวิจัยนี้

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากงานวิจัยของปานนท์ ลาซโรจน์ (2010) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน แล้วทำการจำลองเหตุการณ์การแล่นข้ามสะพานของรถบรรทุกภายใต้เงื่อนไขแบบต่าง ๆ ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกจะมีทั้งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสะพานและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรถบรรทุก โดยในหัวข้อนี้ จะอ้างอิงการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยของปานนท์ ลาซโรจน์ (2010) ภายใต้เงื่อนไขที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับแบบทดสอบภาคสนามเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติและค่าขอบเขตของตัวแปรสำหรับแบบจำลองสะพานและแบบจำลองรถบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

3.1.1 คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองสะพานและแบบจำลองรถบรรทุก

1) แบบจำลองสะพาน

แบบจำลองสะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะมีลักษณะเป็นคานช่วงเดียวในระนาบสองมิติ โดยจะพิจารณาคูณสมบัติเช่นเดียวกับการทดสอบภาคสนาม ซึ่งสะพานมีความยาวเท่ากับ 9.43 เมตร และมีค่ามวลต่อความยาวของสะพานเท่ากับ 15,120 กิโลกรัมต่อเมตร ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 7.48 Hz อัตราส่วนของความหน่วงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.062 ส่วนประเภทของพื้นผิวทางที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คือ ประเภทดี (Class A) ซึ่งเป็นประเภทที่น่าจะมีความใกล้เคียงกับสะพานทดสอบจริง โดยค่าที่นำมาใช้จำลองรูปแบบของผิวทาง (Power spectrum density, PSD) มีค่าเท่ากับ $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ดังนั้น แบบจำลองสะพานมีคุณสมบัติและค่าขอบเขตสำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบทดสอบภาคสนาม ดังแสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองสะพาน

คุณสมบัติ	ค่าขอบเขต	หน่วย
ความยาว, L	9.43	m
มวลต่อความยาว	15,120	kg/m
ตำแหน่งพิจารณา	L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4, 7L/8	

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองสะพาน (ต่อ)

คุณสมบัติ	ค่าขอบเขต	หน่วย
ความขรุขระของผิวทาง	Class A	
ความหน่วง, ζ	0.062	
ความถี่, f	7.48	Hz
ความแข็งเชิงดัด, EI	2.71×10^9	N-m ²

2) แบบจำลองรถบรรทุก

แบบจำลองรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะใช้คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบรถบรรทุกสิบล้อในประเทศไทย ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของวุฒิชัย อ่อนนุ่ม (2001) ดังนั้นแบบจำลองรถบรรทุกมีคุณสมบัติและค่าขอบเขตสำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบทดสอบภาคสนาม ดังแสดงตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติและค่าขอบเขตของแบบจำลองรถบรรทุก

คุณสมบัติ	ค่าขอบเขต	หน่วย
สติสเนสของล้อหน้า (K_{I1})	$2 \times 2.69 \times 10^6$	N/m
สติสเนสของล้อหลัง (K_{I2})	$2 \times 6.41 \times 10^6$	N/m
สติสเนสของระบบกันสะเทือนหน้า (K_{S1})	$2 \times 4.75 \times 10^6$	N/m
สติสเนสของระบบกันสะเทือนหลัง (K_{S2})	$2 \times 8.49 \times 10^6$	N/m
ความหน่วงของล้อหน้า (C_{I1})	$2 \times 2.00 \times 10^4$	N-s/m
ความหน่วงของล้อหลัง (C_{I2})	$2 \times 2.00 \times 10^4$	N-s/m
ความหน่วงของระบบกันสะเทือนหน้า (C_{S1})	$2 \times 2.00 \times 10^4$	N-s/m
ความหน่วงของระบบกันสะเทือนหลัง (C_{S2})	$2 \times 2.00 \times 10^4$	N-s/m
มวลของระบบกันสะเทือนหน้า (m_1)	500	Kg
มวลของระบบกันสะเทือนหลัง (m_2)	700	Kg
โมเมนต์ความเฉื่อยของรถบรรทุก (I_v)	4.87×10^4	Kg/m ²

นอกจากนี้ คุณสมบัติของล้อและระบบกันสะเทือนของรถบรรทุกก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่น่านำมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบรถบรรทุกสิบล้อในประเทศไทย โดยสถิติของล้อและระบบกันสะเทือนที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 3 ค่าคือ ค่าขอบล่าง ค่ากลาง และค่าขอบบน ซึ่งค่ากลางได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติของรถบรรทุกสิบล้อ ค่าขอบล่างได้มาจาก 50% ของค่ากลาง และค่าขอบบนได้มาจาก 150% ของค่ากลาง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสถิติของล้อและระบบกันสะเทือนของแบบจำลองรถบรรทุก

สถิติ	ค่าขอบล่าง (N/m)	ค่ากลาง (N/m)	ค่าขอบบน (N/m)
ล้อหน้า	$2 \times 1.35 \times 10^6$	$2 \times 2.69 \times 10^6$	$2 \times 4.04 \times 10^6$
ล้อหลัง	$2 \times 3.21 \times 10^6$	$2 \times 6.41 \times 10^6$	$2 \times 9.62 \times 10^6$
ระบบกันสะเทือนหน้า	$2 \times 2.38 \times 10^6$	$2 \times 4.75 \times 10^6$	$2 \times 7.13 \times 10^6$
ระบบกันสะเทือนหลัง	$2 \times 4.25 \times 10^6$	$2 \times 8.49 \times 10^6$	$2 \times 12.74 \times 10^6$

3.1.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์

1) น้ำหนักรวมของรถบรรทุก

น้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาตั้งแต่ 10 – 40 ตัน โดยพิจารณาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจำนวน 13 ค่า คือ 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5 และ 40 ตัน

2) ความเร็วของรถบรรทุก

ความเร็วของรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาตั้งแต่ 5 – 20 เมตรต่อวินาที (18 – 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกจำนวน 13 ค่า คือ 5, 6.75, 7.5, 8.75, 10, 11.75, 12.5, 13.75, 15, 16.75, 17.5, 18.75 และ 20 เมตรต่อวินาที

3) ระยะห่างเพลาของรถบรรทุก

ระยะห่างเพลาของรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาตั้งแต่ 3.5 – 5.5 เมตร โดยพิจารณาระยะห่างเพลาของรถบรรทุกจำนวน 9 ค่า คือ 3.5, 3.75, 4, 4.25, 4.5, 4.75, 5, 5.25 และ 5.5 เมตร

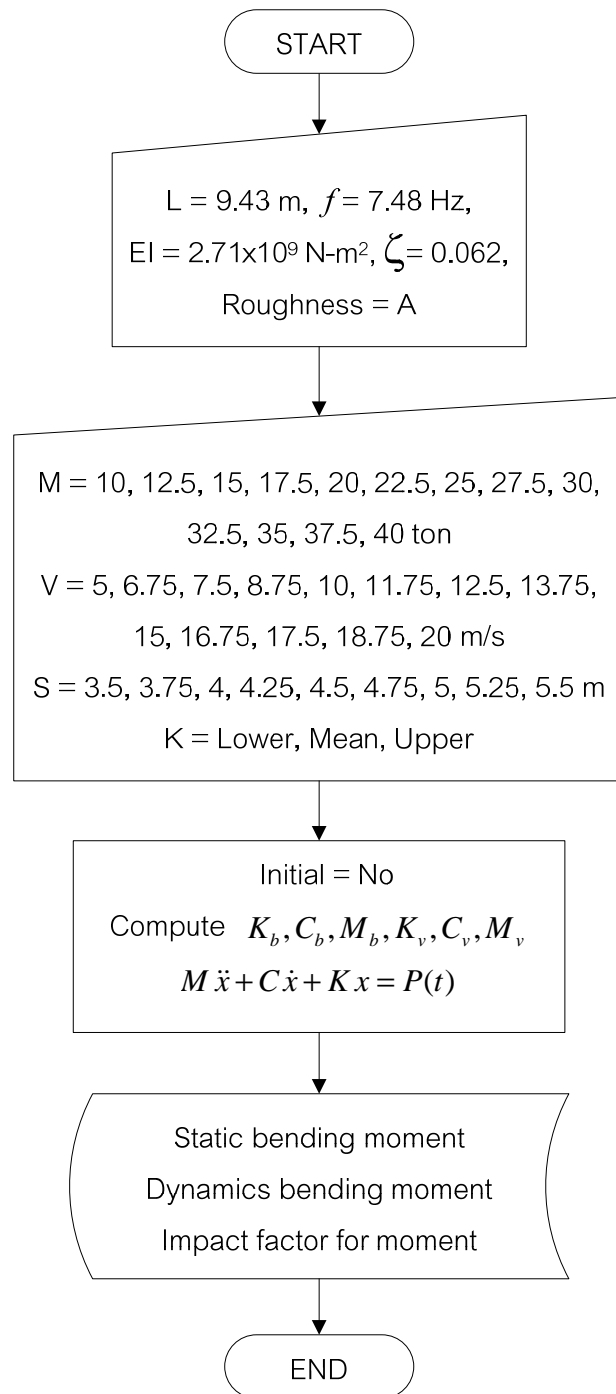
ในการศึกษานี้จะพิจารณาค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สอดคล้องและใกล้เคียงกับข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบภาคสนาม ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์	หน่วย
น้ำหนักรวม	10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5 และ 40	ตัน
ความเร็ว	5, 6.75, 7.5, 8.75, 10, 11.75, 12.5, 13.75, 15, 16.75, 17.5, 18.75 และ 20	เมตร/วินาที
ระยะห่างเพลลา	3.5, 3.75, 4, 4.25, 4.5, 4.75, 5, 5.25 และ 5.5	เมตร

3.1.3 ขั้นตอนการทำงานในคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์

การทำงานจะเริ่มต้นที่การเลือกประเภทผิวทางของสะพาน หลังจากนั้น กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของสะพานได้แก่ ความยาวช่วง ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วงและกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของรถบรรทุก ได้แก่ น้ำหนัก ความเร็ว สติฟเนส แล้วจึงทำการสุ่มรูปแบบของผิวทางประเภทนั้น ๆ และกำหนดเงื่อนไขสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกตามลำดับ จากนั้นจึงทำการคำนวณหาคุณสมบัติของรถบรรทุกและสะพาน เช่น เมทริกซ์สติฟเนส เมทริกซ์มวล และเมทริกซ์ความหน่วง นำไปคุณสมบัติเหล่านี้ไปใช้ในสมการการเคลื่อนที่ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ซึ่งสามารถนำไปใช้หาผลตอบสนองของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดต่อไป ขั้นตอนการทำงานในคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทำงานในคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์

3.2 การทดสอบภาคสนาม

ผลการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาได้จำกัดการหาค่าตัวประกอบการกระแทกเฉพาะที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานเท่านั้น แต่ในการนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องใช้ค่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ ด้วย เนื่องจากว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ อาจมีผลมากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ บนสะพานร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ได้ค่าตัวประกอบการกระแทกที่เหมาะสมไปใช้ในการออกแบบสะพาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสะพานในภาคสนาม เพื่อหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ของความยาวสะพานจากผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และสถิติในรูปโมเมนต์ดัดของสะพาน โดยมีตัวแปร คือ ความเร็วของรถบรรทุก น้ำหนักบรรทุกรวม การกระจายน้ำหนักระหว่างเพลและรูปแบบของรถบรรทุก เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะมากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน

ในการศึกษาจะนำผลการทดสอบสะพานภาคสนามที่ได้จากการศึกษาของภาณุ พุ่งสุข (2004) และ ธีระชัย ดีสมสุข (2008) (ซึ่งเป็นการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่การคำนวณน้ำหนักบรรทุกของยานบนสะพาน) มาศึกษาวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการกระแทก โดยในบทนี้จะรวบรวมผลตอบสนองในรูปของโมเมนต์ดัด ซึ่งเกิดจากการแล่นผ่านของรถบรรทุกภายใต้สภาพการจราจรปกติจำนวนประมาณ 5,500 คัน นำมาหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติและพลศาสตร์ของสะพาน ผลการวิเคราะห์จากหลาย ๆ กรณีจะนำไปพิจารณาความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะมากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน และเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบ

3.2.1 คุณสมบัติของสะพานทดสอบ

สะพานโดยทั่วไปที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้มีอยู่หลายประเภท เช่น สะพานคอนกรีต สะพานคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น ซึ่งจากการตรวจสอบจากข้อมูลของกรมทางหลวง พบว่า โดยส่วนใหญ่สะพานที่ก่อสร้างในเส้นทางของทางหลวงในเขตกรุงเทพและบนทางหลวงในเส้นทางสายหลัก ส่วนมากจะเป็นสะพานคอนกรีตที่ใช้รูปแบบโครงสร้างเป็นระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปค่อนข้างมาก ดังนั้น การทดสอบครั้งนี้จึงเลือกใช้สะพานคอนกรีตที่ใช้รูปแบบ

โครงสร้างเป็นระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปในการทดสอบ โดยมีหลักการเลือกสะพานทดสอบซึ่งพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสะพาน ความหนาแน่นของปริมาณรถบรรทุกที่วิ่งผ่าน ความยาวของช่วงสะพานที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ ความสะดวกในการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ทำงาน ความสะดวกในการทดสอบการทายน้ำหนัก เป็นต้น

จากการสำรวจโดยรอบกรุงเทพมหานครพบว่าสะพานข้ามคลองบางน้อย (กม. 28+170.31 ถนนวงแหวนรอบนอกตะวันตก บริเวณเนติบัณฑิตยสภาในพระบรมราชูปถัมภ์) ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 สะพานข้ามคลองบางน้อย (กม. 28+170.31 ถนนวงแหวนรอบนอกตะวันตก)

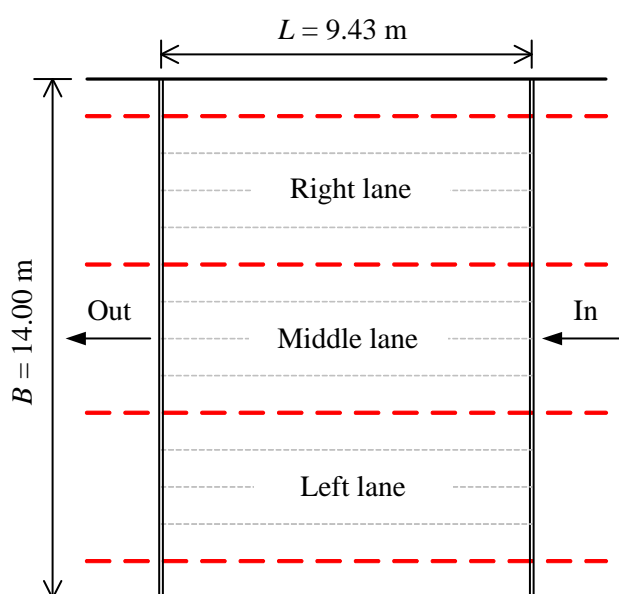
ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมตามที่ต้องการ เช่น รูปแบบโครงสร้างเป็นสะพานคอนกรีตที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูป ความหนาแน่นของปริมาณรถบรรทุกที่วิ่งผ่านช่วงเวลากลางคืนไม่มากนัก ความยาวของช่วงสะพานมีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ ความสะดวกในการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้

ทำงาน เป็นต้น สะพานข้ามคลองบางน้อยเป็นสะพานที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง ซึ่งลักษณะโครงสร้างของตัวสะพานตรงตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงและมาตรฐาน AASHTO ซึ่งมีคุณสมบัติของสะพาน ดังแสดงตามตารางที่ 3.5

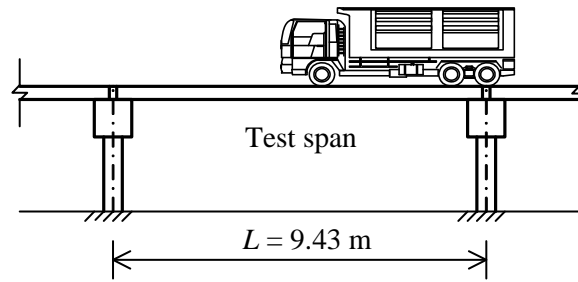
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของสะพานทดสอบ

คุณสมบัติ	
ความยาว, L(m)	9.43
มวลต่อความยาว, (kg/m)	15120
ความแข็งเชิงดัด, EI (N-m ²)	2.71x10 ⁹

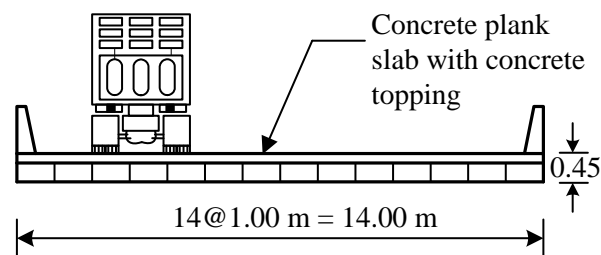
โดยมีลักษณะเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3 ช่องจราจร (1 ทิศทางจราจร) มีช่วงสะพานทั้งสิ้น 25 ช่วงสะพาน ซึ่งแต่ละช่วงสะพานมีความยาวช่วงประมาณ 10 เมตร โดยรูปแบบโครงสร้างใช้ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปขนาดกว้าง 1 เมตร วางเรียงกันทับหน้าด้วยคอนกรีต (topping) มีความหนารวมประมาณ 45 เซนติเมตร กว้าง 14 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.3



(ก) รูปแบบถนนของสะพาน



(ข) รูปด้านข้างของสะพาน

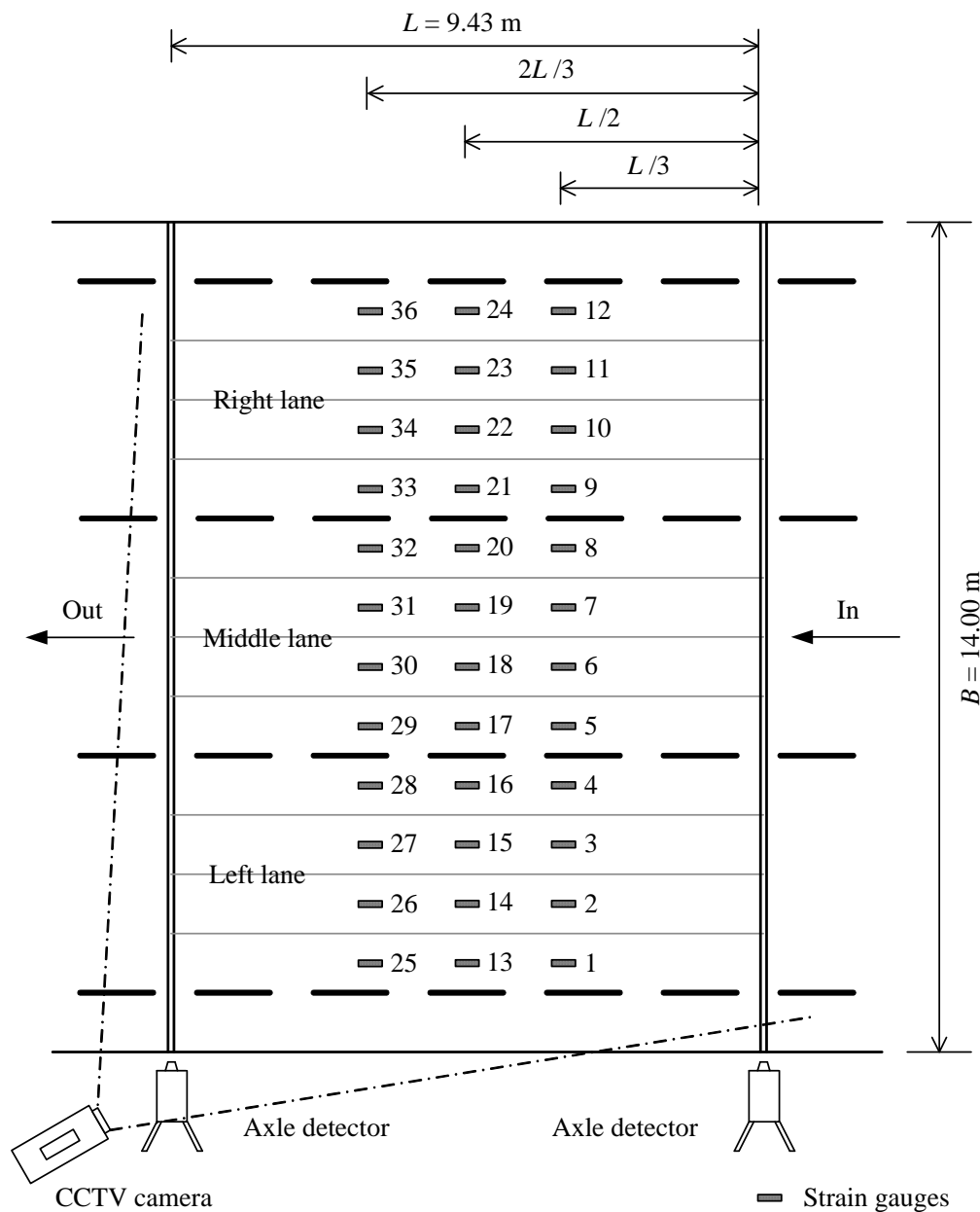


(ค) รูปตัดตามขวางของสะพาน

ภาพที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของสะพานทดสอบ (ก) รูปแปลนของสะพาน (ข) รูปด้านข้างของสะพาน และ (ค) รูปตัดตามขวางของสะพาน

3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดสำหรับสะพาน

จากงานวิจัยของภาณุ พุ่งสุข (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานข้ามคลองบางน้อยและได้ใช้การตรวจวัดผลตอบสนองของตัวสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก ซึ่งได้ใช้การตรวจวัดค่าความเครียดในส่วนต่าง ๆ ของสะพานที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวเก็บสัญญาณ โดยช่วงที่ทำการทดสอบจะประกอบด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตจำนวน 14 แผ่น ซึ่งจะติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดทุกแผ่นพื้นคอนกรีต ยกเว้นแผ่นพื้นคอนกรีตที่ตำแหน่งริมขอบของสะพานทั้งสองด้าน โดยทำการติดตั้งระบบเก็บข้อมูลที่บริเวณใต้สะพานและติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดทั้งหมด 3 ช่วง คือ ที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ซึ่งแต่ละช่วงทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด 12 ตัว ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์วัดความเครียดติดตั้งใต้สะพานทั้งหมด 36 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 3.4

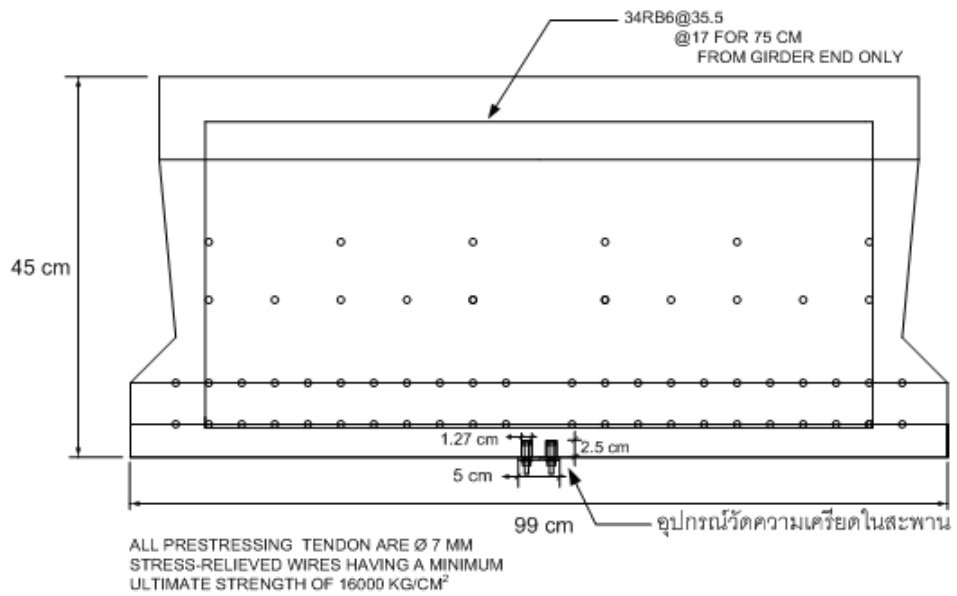


ภาพที่ 3.4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน

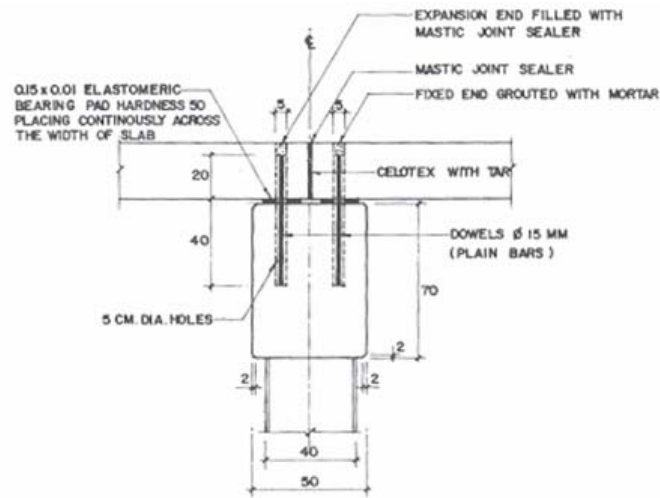
ซึ่งสาเหตุที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดหลายตัวในแต่ละหน้าตัด เพื่อความแม่นยำในการประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์ของสะพาน ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างภาพตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพานในภาพที่ 3.5 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพานเข้ากับแผ่นพื้นคอนกรีตในภาพที่ 3.6 และลักษณะการวางพาดของแผ่นพื้นคอนกรีตกับคานขวางบนหัวตอม่อสะพานในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างภาพตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพาน



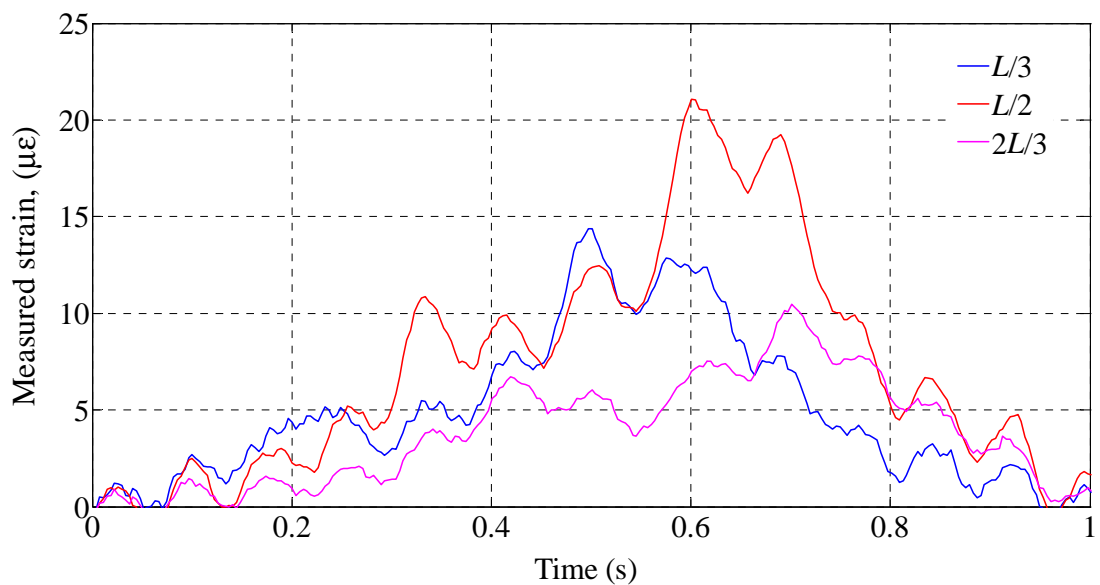
ภาพที่ 3.6 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดได้สะพานเข้ากับแผ่นพื้นคอนกรีต



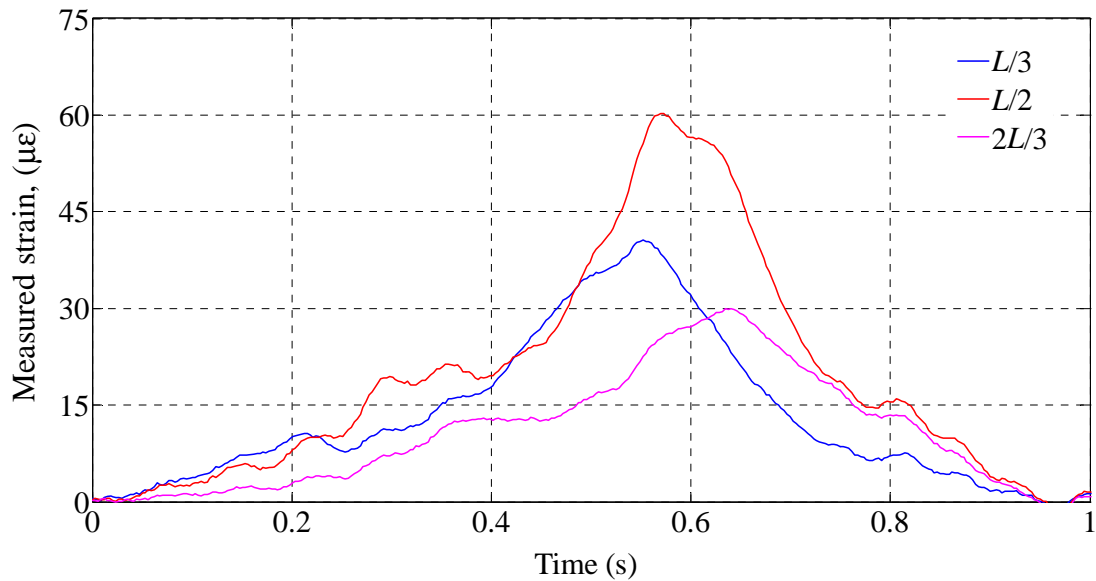
ภาพที่ 3.7 ลักษณะการวางพาดของแผ่นพื้นคอนกรีตกับคานขวางบนหัวต่อม่อสะพาน

3.2.3 สัญญาณค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากการเก็บข้อมูลภาคสนามที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานนั้น สามารถอ่านค่าความเครียดได้จากอุปกรณ์วัดความเครียด ทำการจำแนกสัญญาณค่าความเครียดทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างสัญญาณค่าความเครียดอันเป็นผลจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถที่มีน้ำหนักบรรทุกเบา (Light) และหนัก (Heavy) ในภาพที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างสัญญาณค่าความเครียดของกรณีรถที่มีน้ำหนักบรรทุกเบา (Light)



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างสัญญาณค่าความเครียดของกรณีรถที่มีน้ำหนักบรรทุกหนัก (Heavy)

3.2.4 คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม

จากข้อมูลของรถบรรทุกที่ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามที่เคลื่อนที่ไปบนสะพานนั้น จะทำการคัดกรองข้อมูลของรถบรรทุก เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ซึ่งเน้นการพิจารณารถที่มีน้ำหนักบรรทุกหนัก (Heavy) ทำให้ได้รถบรรทุกที่คัดกรองมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม

คุณสมบัติ	ค่าขอบเขต
น้ำหนักเพลาน้ำ	> 2.00 T
น้ำหนักเพลากลาง	> 4.00 T
น้ำหนักเพลาลัง	> 4.00 T
น้ำหนักเพลารวม	> 10.00 T
ระยะห่างเพลาน้ำและกลาง, S1	3.00 – 5.00 m
ระยะห่างเพลากลางและหลัง, S2	1.30 m
อัตราส่วนน้ำหนักเพลาน้ำต่อน้ำหนักเพลารวม	> 0.12

1) กล้องตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ

นอกจากนี้ ยังมีการเก็บภาพของรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่ไปบนสะพานด้วยกล้อง CCTV เพื่อการจำแนกประเภทและช่องทางจราจรที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานนั้น ซึ่งตัวอย่างภาพจากกล้อง CCTV ได้ทำการเก็บภาพของรถบรรทุก แสดงไว้ในภาพที่ 3.10



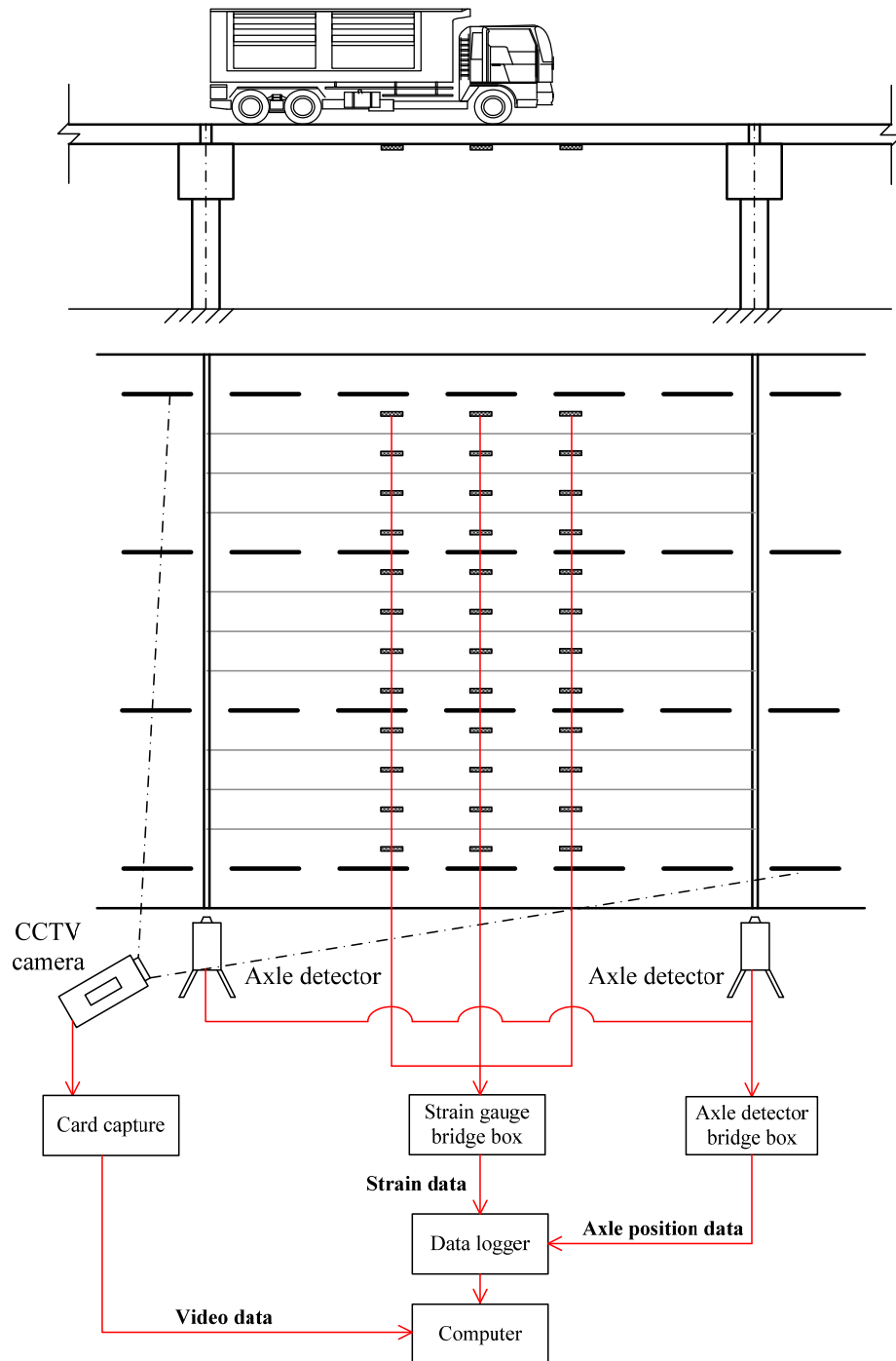
(ก) ช่วงเวลากลางวัน



(ข) ช่วงเวลากลางคืน

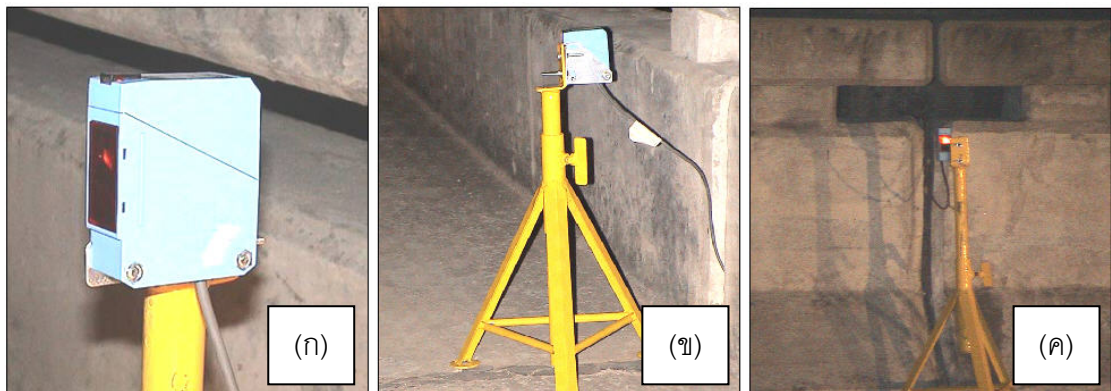
ภาพที่ 3.10 ตัวอย่างภาพของรถบรรทุกขณะแล่นไปบนสะพานจากกล้อง CCTV (ก) ช่วงเวลากลางวัน และ (ข) ช่วงเวลากลางคืน

2) ระบบตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ



ภาพที่ 3.11 แสดงแผนผังการทำงานของระบบตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของรถ (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008)

การหาเวลาที่รถบรรทุกเข้าและออกก็เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการทำนายน้ำหนัก ซึ่งในการทดสอบจะใช้เซ็นเซอร์บอกตำแหน่ง (Photoelectric sensor) ในการบอกเวลาที่รถบรรทุกเข้าและออกสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งจะประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณโดยระยะห่างของเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งทั้งสองตัวที่มากที่สุดที่สามารถทำงานได้เท่ากับ 30 เมตร และโดยจะเวลาในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 1.5 มิลลิวินาที (ms) การทดสอบจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งบนสะพานโดยจะติดตั้งที่ตำแหน่งรถเข้าและออกจากช่วงของสะพานที่ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



ภาพที่ 3.12 ลักษณะเซ็นเซอร์บอกตำแหน่ง (ก) ลักษณะทั่วไป (ข) ตัวรับสัญญาณ (ค) ตัวส่งสัญญาณ



ภาพที่ 3.13 ลักษณะการติดตั้งเซ็นเซอร์บอกตำแหน่งรถเข้าและออก

รถบรรทุกที่ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานนั้น มีจำนวนข้อมูลที่ได้ทำการการคัดกรองและจำแนกชนิดของรถบรรทุกแล้ว ว่าเป็นรถบรรทุกสิบล้อจำนวน 4,975 คัน ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างข้อมูลของรถบรรทุกที่ได้ทำการคัดกรองแล้ว (B-WIM) ดังแสดงตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างข้อมูลของรถบรรทุกสิบล้อ (B-WIM) จากจำนวน 4,975 คัน

Case No.	Record Time		Lane	Speed (m/s)	Spacing (m)	Weight of Truck Axle (Ton)			
	Date	Time				Front	Middle	Rear	Total
1	2005_07_19	20_21_14	Middle	10.73	4.36	6.82	11.7	11.7	30.22
2	2005_07_19	20_23_52	Middle	15.88	5.4	3.73	8.48	8.48	20.69
⋮									⋮
2640	2005_11_22	16_58_02	Middle	13.05	4.32	3.62	9.33	9.33	22.28
2641	2005_11_22	17_07_16	Middle	11.23	4.49	5.73	6.72	6.72	19.17
2642	2005_11_22	17_12_32	Middle	11.07	4.33	5.78	8.52	8.52	22.82
2643	2005_11_22	17_13_50	Middle	8.91	4.63	4.37	8.66	8.66	21.68
2644	2005_11_22	17_13_50	Middle	14.04	4.22	3.57	8.97	8.97	21.50
2645	2005_11_22	17_30_58	Middle	9.81	4.22	4.56	8.21	8.21	20.98
2646	2005_11_22	17_50_42	Left	14.72	4.27	4.11	8.74	8.74	21.58
2647	2005_11_22	17_50_42	Middle	10.83	4.66	5.61	8.16	8.16	21.94
2648	2005_11_22	17_53_20	Middle	12.91	4.13	4.51	7.28	7.28	19.07
2649	2005_11_22	17_53_20	Middle	12.38	4.22	4.22	9.27	9.27	22.76
2650	2005_11_22	17_57_18	Middle	11.66	4.42	4.37	9.21	9.21	22.79
⋮									⋮
4974	2005_12_30	06_46_28	Left	10.14	4.87	5.45	9.49	9.49	24.42
4975	2005_12_30	06_53_02	Middle	14.54	4.5	5.46	8.06	8.06	21.57

ซึ่งมีคุณสมบัติและค่าขอบเขตของสะพานและรถบรรทุกของแบบทดสอบภาคสนามที่จะนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงตามตารางที่ 3.8

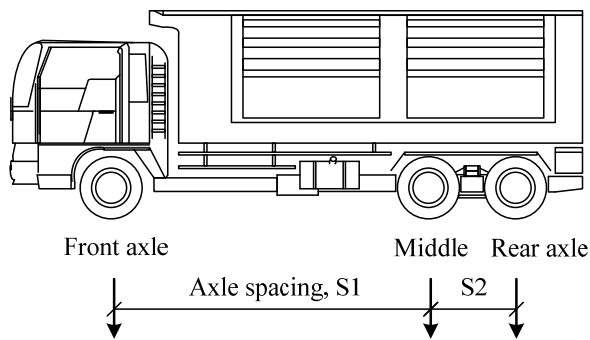
ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของสะพานและค่าขอบเขตของข้อมูลรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบภาคสนาม

ประเภท	ตัวแปร	ค่าขอบเขต	หน่วย
สะพาน	ความยาว, L	9.43	m
	มวลต่อความยาว	15,120	kg/m
	ตำแหน่งพิจารณา	L/3, L/2, 2L/3	
	ความขรุขระของผิวทาง	-	
	ความหน่วง, ζ	0.062	
	ความถี่, f	7.48	Hz
	ความแข็งเชิงดัด, EI	2.71×10^9	N-m ²
รถบรรทุก	น้ำหนักรวม	10.47 – 42.93	ton
	ความเร็ว	5.07 – 21.36 (18.3 – 76.9 km/hr)	m/s
	ระยะห่างเพลลา	3.48 – 5.52	m

3.2.5 การจำแนกข้อมูลรถบรรทุกตามตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์

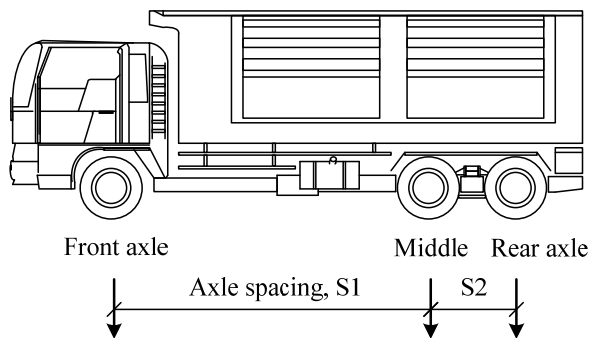
1) น้ำหนักรวมของรถบรรทุก

ตามข้อกำหนดและน้ำหนักตามกฎหมายสำหรับรถบรรทุกในประเทศไทย น้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อถูกควบคุมโดยกรมทางหลวง ซึ่งมีข้อกำหนดว่าอนุญาตให้มีน้ำหนักเพลลาคู่หลังได้ไม่เกิน 20 ตัน และน้ำหนักรวมจะต้องไม่เกิน 25 ตัน อย่างไรก็ตาม ก็พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นคือ มีการตรวจพบว่ารถบรรทุกสิบล้อในประเทศไทยส่วนใหญ่มักจะมีน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดในการออกแบบสะพานและข้อกำหนดการประเมินผลแบบจำลองภาระของการออกแบบไทย รถบรรทุกและมาตรฐาน AASHTO กำหนดการออกแบบรถบรรทุกของประเทศไทย คือ รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวม 30 ตัน เพียงคันเดียวที่มีเพลลาหน้า, เพลากลางและเพลลาหลัง ซึ่งก็คือ รถสิบล้อที่ใช้ในประเทศไทยนั่นเอง ขณะที่น้ำหนักรถบรรทุกในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO จะใช้รถบรรทุกประเภท HS20-44 เพียงคันเดียวและน้ำหนักกระจายอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม สำหรับสะพานช่วงสั้นที่มีความยาวช่วงน้อยกว่า 30 เมตร ได้กำหนดให้ใช้น้ำหนักของรถบรรทุกประเภท HS20-44 เพื่อใช้ในการออกแบบสะพาน (Nowak และ Szerszen, 1998) ทั้งนี้ ธีระชัย ดีสมสุข (2008) ได้นำเสนอภาพร่างแสดงการกระจายน้ำหนักของรถบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 3.14



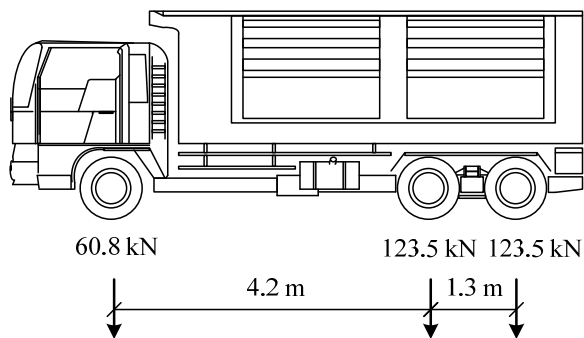
B-WIM database

Front axle wt. $> 19.6 \text{ kN}$
 Middle and rear axle wt. $> 78.4 \text{ kN}$
 Gross wt. $> 98.0 \text{ kN}$
 Axle spacing, S1 = $3.00\text{-}5.00 \text{ m}$
 Axle spacing, S2 = 1.30 m
 Ratio of front/gross $> 0.12 \text{ m}$



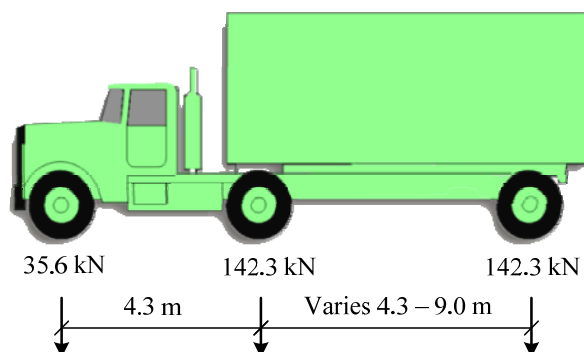
Thailand legal limitations

Middle + rear axle wt. $< 196 \text{ kN}$
 Gross wt. $< 245 \text{ kN}$



Design Thai truck

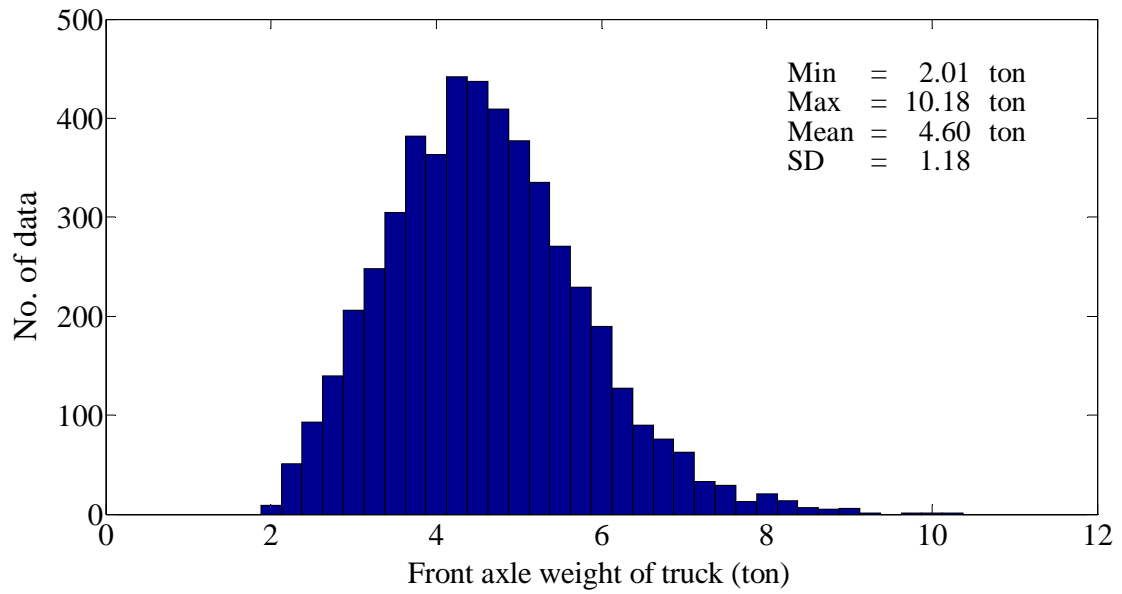
Front axle wt. = 60.8 kN
 Middle and rear axle wt. = 123.5 kN
 Gross wt. = 307.7 kN
 Axle spacing, S1 = 4.2 m
 Axle spacing, S2 = 1.30 m



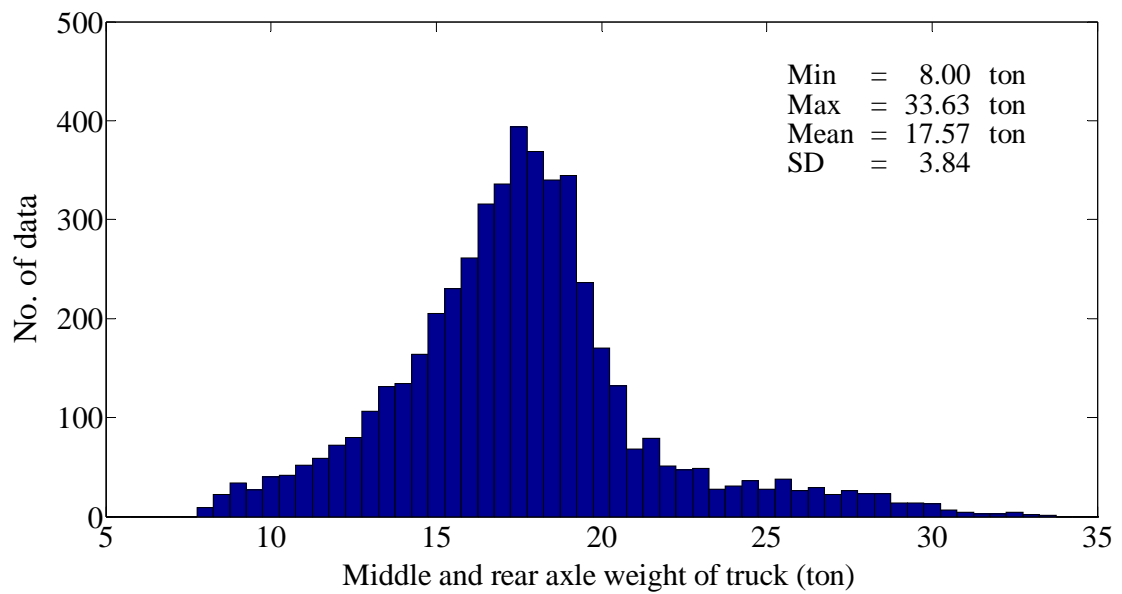
AASHTO HS20-44

Front axle wt. = 35.6 kN
 Middle and rear axle wt. = 142.3 kN
 Gross wt. = 320.1 kN
 Axle spacing, S1 = 4.3 m
 Axle spacing, S2 = $4.3\text{-}9.0 \text{ m}$

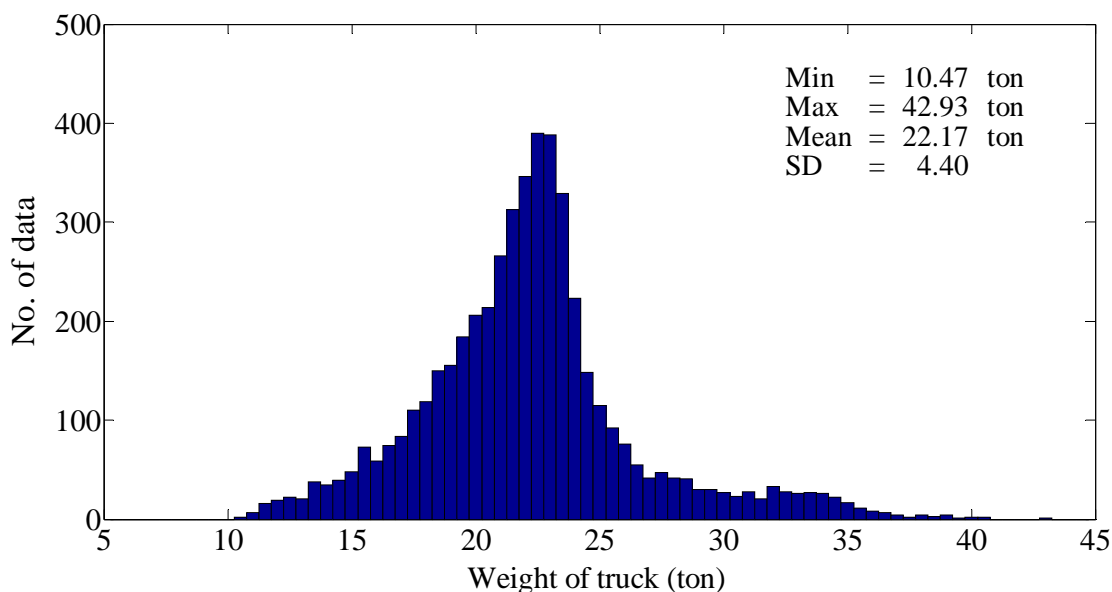
ภาพที่ 3.14 ภาพร่างแสดงการกระจายน้ำหนักของรถบรรทุก (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008)



ภาพที่ 3.15 กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่น้ำหนักต่าง ๆ ของเพลาน้ำหนักรถบรรทุก



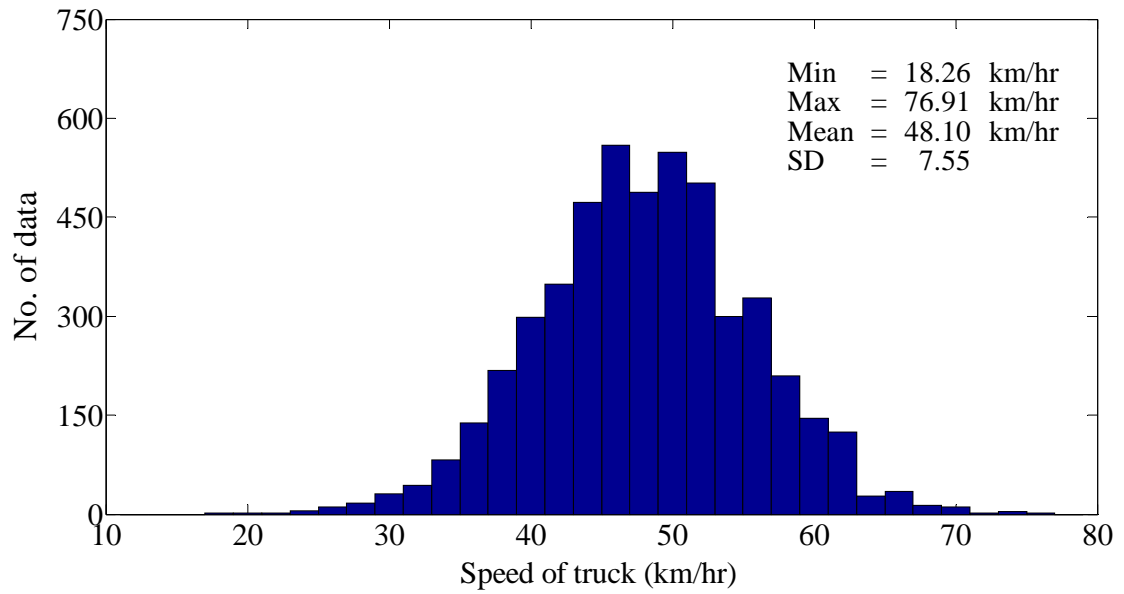
ภาพที่ 3.16 กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่น้ำหนักต่าง ๆ ของเพลากลางและเพลาลังรถบรรทุก



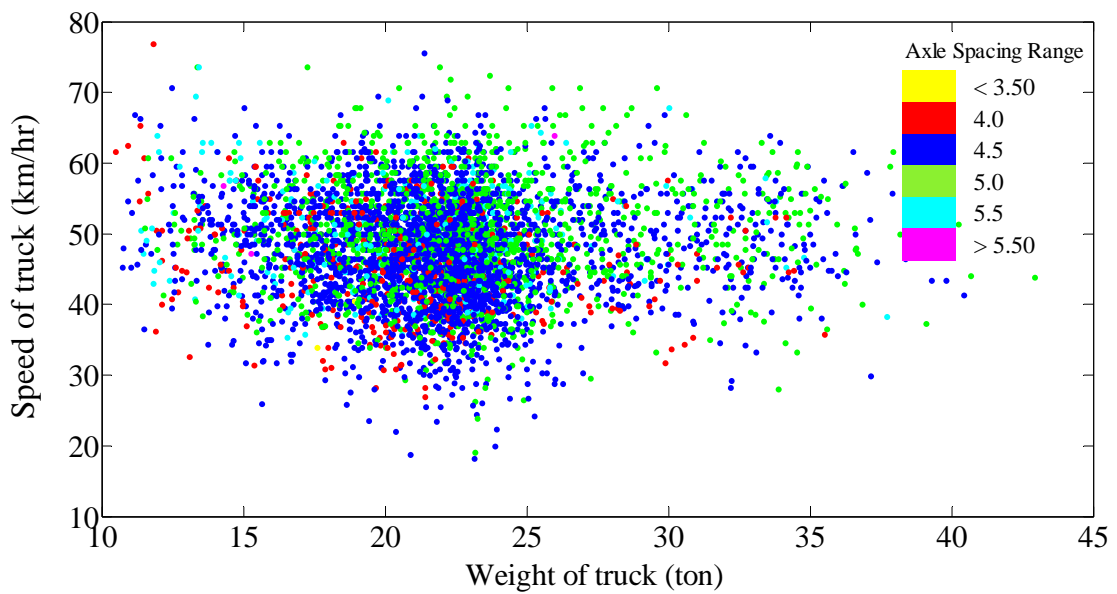
ภาพที่ 3.17 กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก

2) ความเร็วของรถบรรทุก

ความเร็วของรถบรรทุกและช่องทางวิ่งของรถบรรทุกเป็นปัจจัยที่สำคัญของลักษณะรถบรรทุก การกระจายตัวของความเร็ว ซึ่งได้นำเสนอโดยกราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูลของรถบรรทุกที่ความเร็วต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.18 นอกจากนี้ พบว่ารถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วที่แตกต่างกันระหว่าง 18 - 85 กิโลเมตรต่อชั่วโมง. ภาพที่ 3.19 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุก แม้ว่าโดยปกติรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากควรวิ่งด้วยความเร็วที่ช้าลง มันเป็นที่สังเกตได้จากข้อมูลความเร็วรถบรรทุกจะไม่ได้รับผลกระทบอย่างชัดเจนโดยน้ำหนักรวม การกระจายตัวของความเร็วยังแสดงให้เห็นว่ารถบรรทุกส่วนใหญ่วิ่งด้วยความเร็วด้วยความเร็วปานกลางระหว่าง 30 - 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงความเร็วปกติสำหรับยานพาหนะตามข้อกำหนดโดยกรมทางหลวง



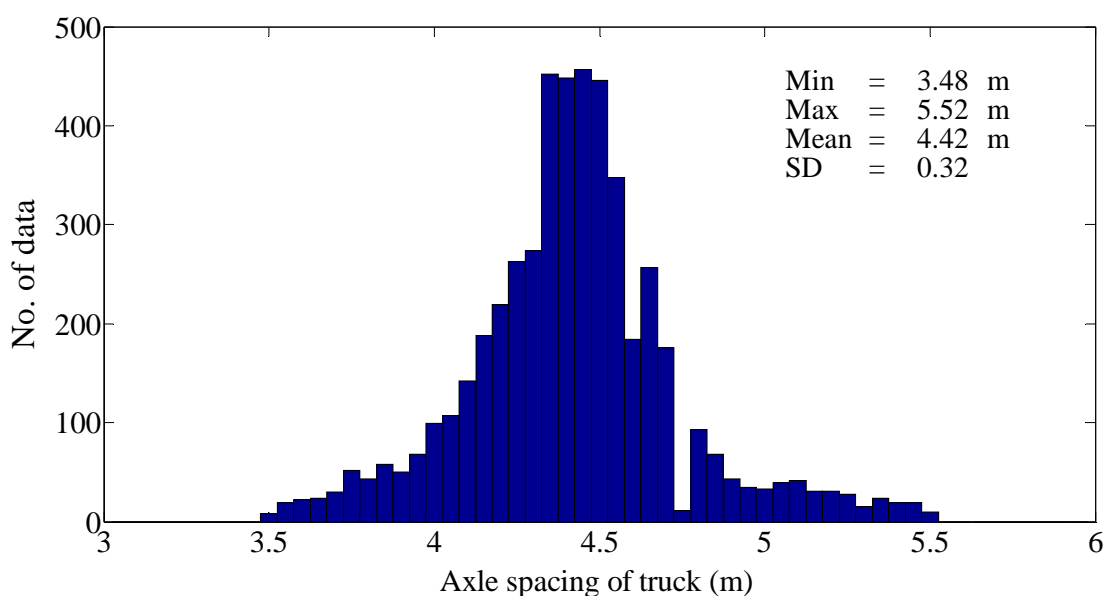
ภาพที่ 3.18 กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก



ภาพที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุก

3) ระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก

ระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกสืบล้าจากเก็บข้อมูลภาคสนาม จะเก็บค่าโดยใช้สัญญาณตรวจจับที่ล้อของรถบรรทุก ถึงแม้ว่ารถบรรทุกจะเป็นประเภท 3 เพลลาและมีระยะห่างของเพลลาคู่หลังที่ใกล้กันมาก ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือตรวจจับ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ก็ยังคงใช้กันอย่างแพร่หลาย รถบรรทุกสืบล้าในประเทศไทยที่มีระยะห่างของเพลลาคู่หลังที่ใกล้กันมาก อาจถือได้ว่าได้รับการแก้ไขในระยะทาง 1.30 เมตรสำหรับรถบรรทุกทั้งหมดผลทางสถิติของการเว้นระยะห่างเพลลา (S1) ซึ่งจะถูกนำเสนอโดยกราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูลของรถบรรทุกที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 3.20



ภาพที่ 3.20 กราฟแท่งแสดงจำนวนข้อมูล ที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก

จากภาพที่ 3.20 พบว่า ระยะห่างเพลลา (S1) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.48 - 5.52 เมตรและค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.42 เมตร เมื่อเปรียบเทียบระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเฉลี่ยที่วัดได้จะมากกว่าระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ใช้ออกแบบตามมาตรฐานในประเทศไทย (4.20 เมตร) อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการออกแบบสะพานโดยใช้การออกแบบรถบรรทุกที่มีอยู่ในไทย จึงอาจจะไม่ปลอดภัยเท่าที่ควร

4) ช่องทางวิ่งของรถบรรทุก

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของรถบรรทุกในกรณีวิ่งช่องทางต่าง ๆ ได้ทำการจำแนกจำนวนรถบรรทุกที่วิ่งในช่องทางต่าง ๆ ดังแสดงตามตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 พฤติกรรมของรถบรรทุกในกรณีวิ่งช่องทางต่าง ๆ

กรณีวิ่ง ช่องทาง	จำนวน (คัน)	ร้อยละ (%)	น้ำหนักรวม เฉลี่ย (ตัน)	ความเร็ว เฉลี่ย (กม./ชม.)	ระยะห่าง เพลลาเฉลี่ย (ม.)
ซ้าย	311	6.25	21.50	44.20	4.43
กลาง	4,374	87.92	22.08	48.38	4.42
ขวา	290	5.83	24.27	48.18	4.44

จากตารางที่ 3.9 พบว่า รถบรรทุกส่วนใหญ่จะวิ่งในช่องทางกลาง ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 4,374 คัน คิดเป็นร้อยละ 87.92 น้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถบรรทุกที่วิ่งในช่องทางขวาจะสูงกว่าช่องทางอื่น ๆ เล็กน้อย ความเร็วรถบรรทุกเฉลี่ยของรถบรรทุกที่วิ่งในช่องทางซ้ายน้อยกว่าเลนช่องทางอื่น ๆ เล็กน้อย ส่วนระยะห่างเพลลาเฉลี่ยของรถบรรทุกที่วิ่งในช่องทางต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันมาก

3.3 การหาค่าตัวประกอบการกระแทก

3.3.1 การประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์ของหน้าตัด

จากการเก็บข้อมูลภาคสนามที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน อ่านค่าความเครียดได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดทั้งหมด 36 ตัว ซึ่งได้ทำการติดตั้งไว้ 3 ช่วง คือตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ โดยแต่ละช่วงทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด 12 ตัว แล้วนำมาประมาณค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดในแต่ละช่วง ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.1

$$M_d(x) = \frac{2EI\alpha}{t} \sum_{i=1}^{12} \varepsilon_i(x) \quad (3.1)$$

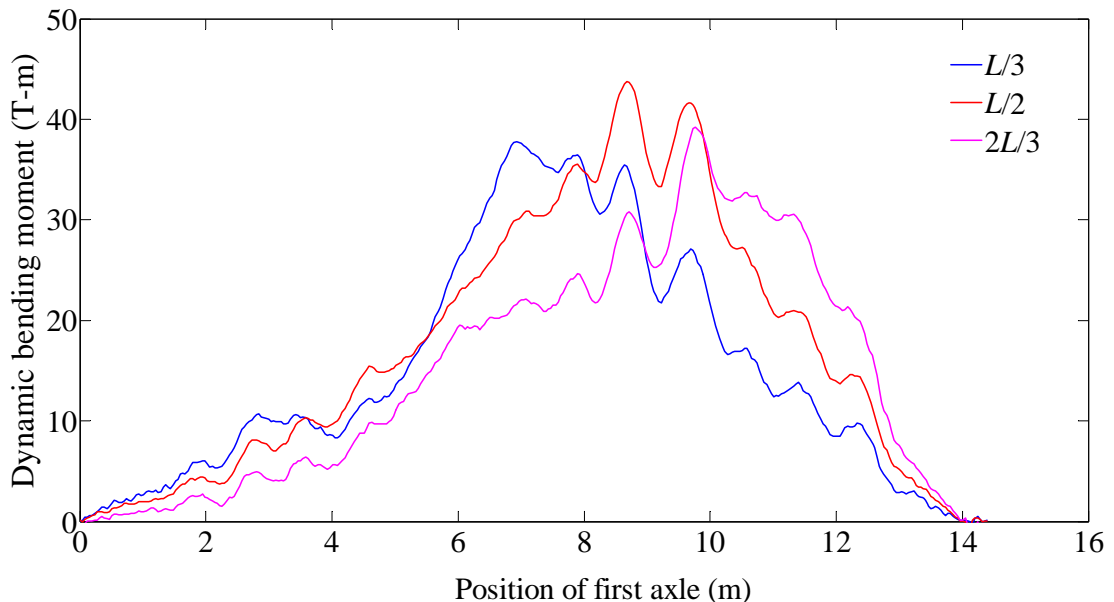
โดยที่ $M_d(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์ของหน้าตัดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ บนพื้นสะพาน
 $\varepsilon_i(x)$ คือ ค่าความเครียดที่อ่านค่าได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดหมายเลข i ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ บนพื้นสะพาน

- i คือ หมายเลขอุปกรณ์วัดความเครียด
- E คือ ค่าอีลาสติกโมดูลัสของหน้าตัดของพื้นสะพาน, นิวตันต่อเมตร⁴
- I คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของพื้นสะพาน, เมตร⁴
- α คือ ตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดตามตำแหน่งที่วัดค่า ตามตารางที่ 3.10
- t คือ ความหนาของพื้นทางคอนกรีตเสริมเหล็กของสะพาน, เมตร

ตารางที่ 3.10 ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดของแบบทดสอบสะพาน, α

กรณีวิ่งของจราจร	ค่าตัวคูณปรับแก้ค่าความเครียดตามตำแหน่งวัดค่า, α		
	L/3	L/2	2L/3
ซ้าย	2.09	1.97	2.23
กลาง	2.20	2.13	2.58
ขวา	2.53	3.06	3.72

จากสมการที่ 3.1 สามารถคำนวณหาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 ดังแสดงในภาพที่ 3.21

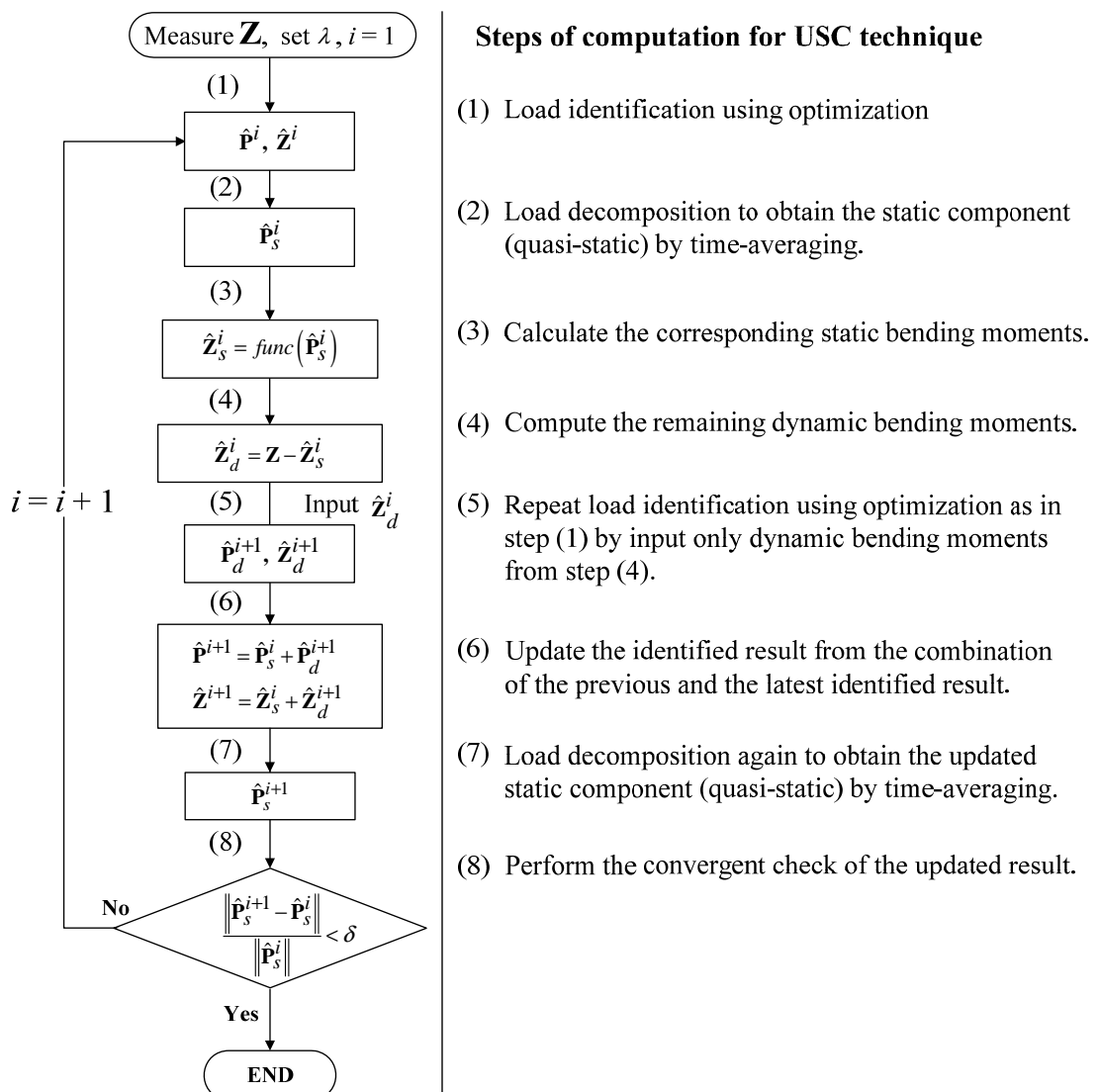


ภาพที่ 3.21 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน

3.3.2 การประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติของหน้าตัด

1) การหาน้ำหนักของรถบรรทุก

จากงานวิจัยของ Pinkaew (2006), Pinkaew และ Asnachinda (2007) และธีระชัย ดีสมสุข (2008) ซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานข้ามคลองบางน้อย ในการทำการทดสอบ และนำเสนอวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกไว้ ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้มาทำการจำแนกและวิเคราะห์ตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 ขั้นตอนการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเทคนิค Update Static Component (USC)

2) การประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติจากน้ำหนักบรรทุก

หลังจากคำนวณหาค่าน้ำหนักของรถบรรทุก แล้วนำมาประมาณค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเชิงสถิติในแต่ละช่วง โดยการหาอินทิกรัลของโมเมนต์ดัดเชิงสถิติของหน้าตัดที่ตำแหน่ง j บนพื้นสะพาน เนื่องจากน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ แล้วนำไปคูณด้วยน้ำหนักของเพลาล้อรถบรรทุกได้จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

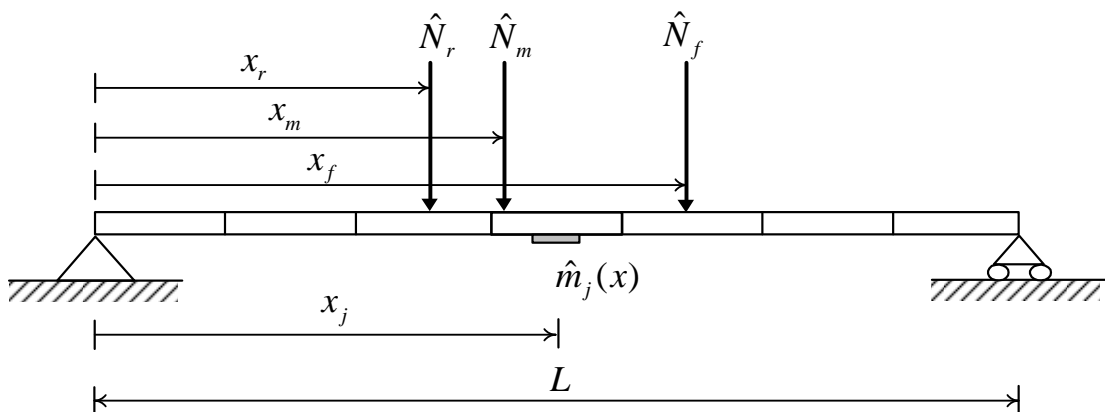
$$IL_j(x) = \begin{cases} x - \frac{x \cdot x_j}{L}, & x \leq x_j \\ x_j - \frac{x \cdot x_j}{L}, & x_j < x \leq L \end{cases} \quad (3.2)$$

โดยที่ $IL_j(x)$ คือ อินทิกรัลของโมเมนต์ดัดเชิงสถิติของหน้าตัดที่ตำแหน่ง j บนพื้นสะพาน เนื่องจากน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ

L คือ ความยาวของสะพาน

x_j คือ ระยะของตำแหน่งพิจารณาของหน้าตัดที่ตำแหน่ง j

x คือ ระยะที่เพลาล้อหน้า เพลาล้อกลางหรือเพลาล้อหลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไป x_f, x_m, x_r ตามลำดับ



ภาพที่ 3.23 ตำแหน่งของน้ำหนักเพลารถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน สำหรับหาอินทิกรัลของโมเมนต์ดัดเชิงสถิติของหน้าตัดที่ตำแหน่ง j บนพื้นสะพาน เนื่องจากน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ

$$M_s(x) = \begin{Bmatrix} M_1(x) \\ M_2(x) \\ \vdots \\ M_N(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} IL_1(x) & IL_2(x) & IL_3(x) \\ IL_1(x) & IL_2(x) & IL_3(x) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ IL_1(x) & IL_2(x) & IL_3(x) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} N_f \\ N_m \\ N_r \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

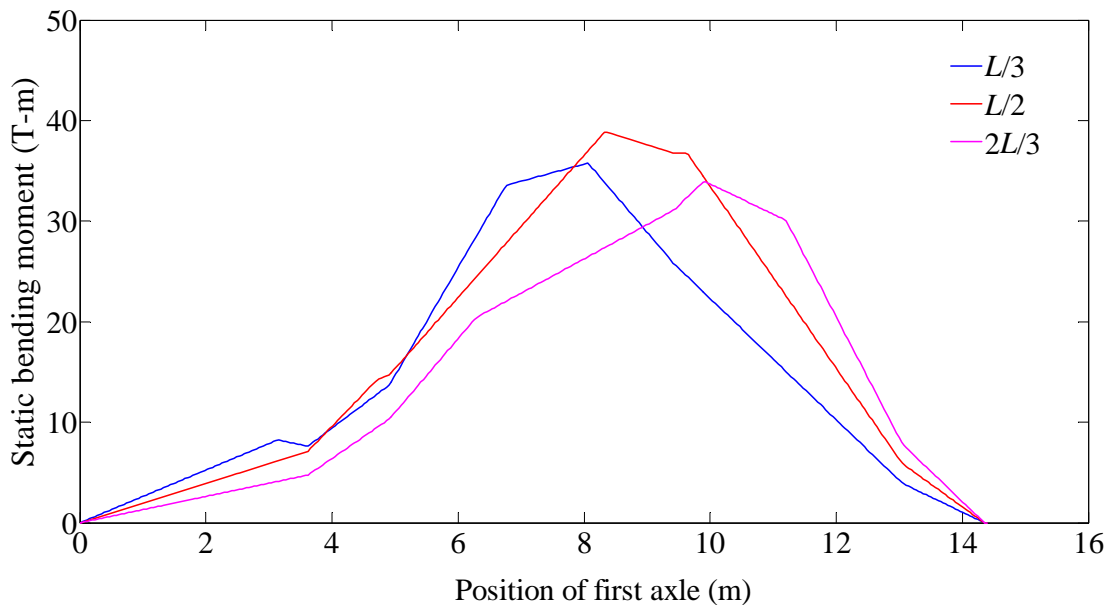
โดยที่ $M_s(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตของหน้าตัดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ บนพื้นสะพาน

$m_j(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตของหน้าตัดที่ตำแหน่ง j บนพื้นสะพาน

N_f คือ น้ำหนักเพลาน้ำหน้าของรถบรรทุก

N_m คือ น้ำหนักเพลากลางของรถบรรทุก

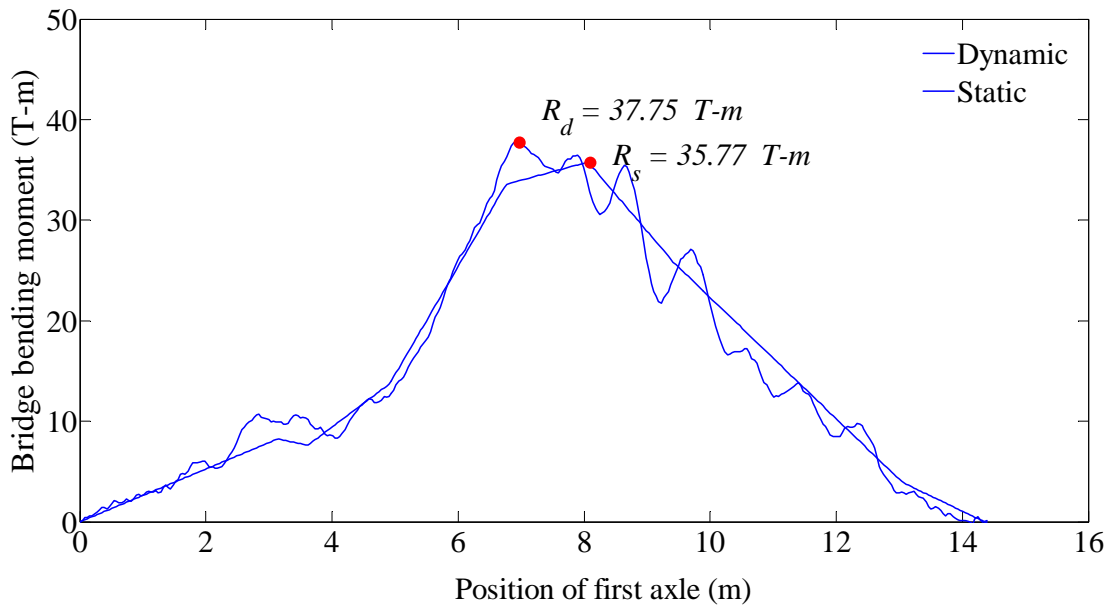
N_r คือ น้ำหนักเพลาลังของรถบรรทุก



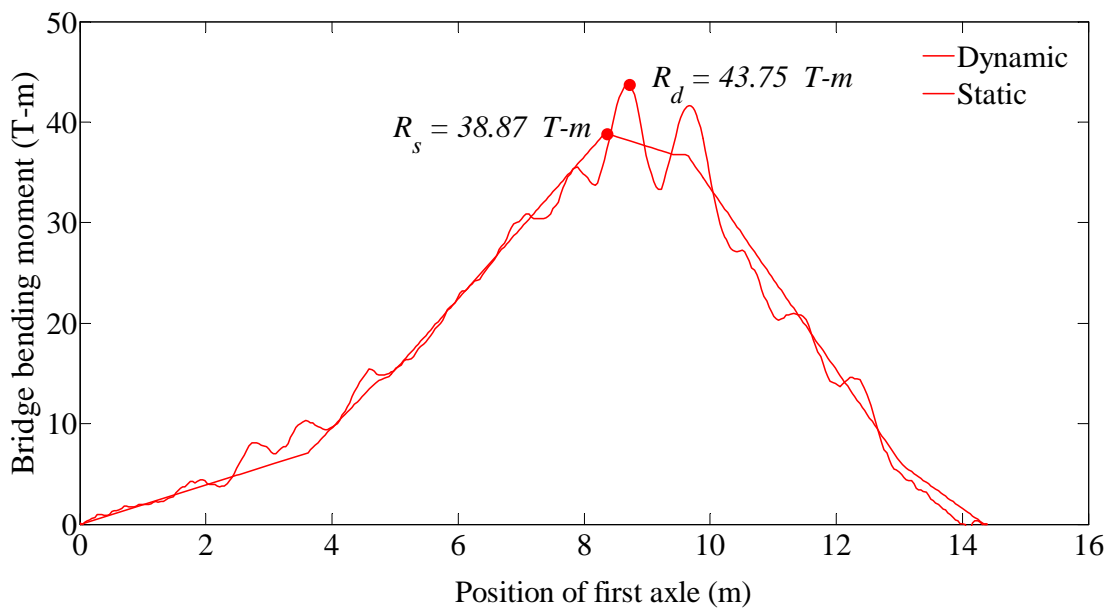
ภาพที่ 3.24 ผลตอบสนองเชิงสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน

3.3.3 การหาค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งต่าง ๆ

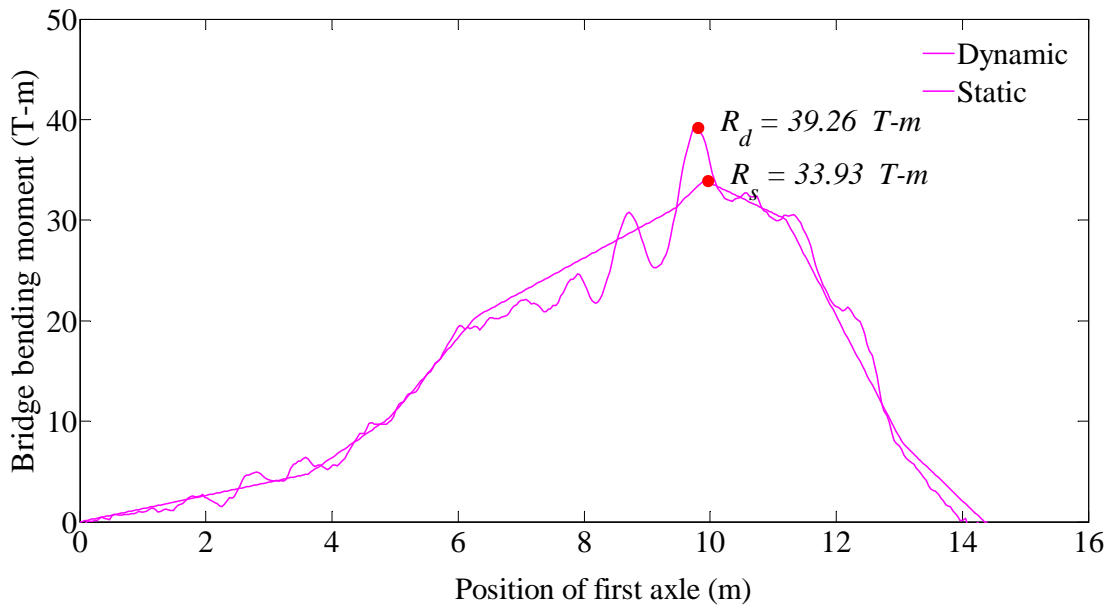
หลังจากที่ประมาณค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์และค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตตามหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ แล้ว จึงทำการเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์และเชิงสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัด เพื่อหาค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ดังแสดงในภาพที่ 3.25 – 3.27 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.25 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์และสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $L/3$



ภาพที่ 3.26 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์และสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $L/2$



ภาพที่ 3.27 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์และสถิตของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $2L/3$

การหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ จากค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์สูงสุดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานกับค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตสูงสุดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ดังสมการที่ 3.4

$$I(x) = \frac{M_d(x) - M_s(x)}{M_s(x)} \quad (3.4)$$

โดยที่ $I(x)$ คือ ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ

$M_d(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์สูงสุดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน

$M_s(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตสูงสุดที่ตำแหน่ง x ใด ๆ บนสะพาน

จากกรณีตัวอย่างตามภาพที่ 3.25 - 3.27 ซึ่งเป็นเหตุการณ์การเคลื่อนที่ผ่านสะพานของรถบรรทุกสิบล้อหนัก 22.02 ตัน วิ่งด้วยความเร็ว 9.93 เมตรต่อวินาที (35.75 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) จะได้ค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์สูงสุดขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานกับค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตสูงสุดที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละตำแหน่งของสะพาน ได้จากสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$\text{ที่ตำแหน่ง } x = \frac{L}{3}, \quad I\left(\frac{L}{3}\right) = \frac{M_d\left(\frac{L}{3}\right) - M_s\left(\frac{L}{3}\right)}{M_s\left(\frac{L}{3}\right)} = \frac{37.75 - 35.77}{35.77} = 0.06$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } x = \frac{L}{2}, \quad I\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{M_d\left(\frac{L}{2}\right) - M_s\left(\frac{L}{2}\right)}{M_s\left(\frac{L}{2}\right)} = \frac{43.75 - 38.87}{38.87} = 0.13$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } x = \frac{2L}{3}, \quad I\left(\frac{2L}{3}\right) = \frac{M_d\left(\frac{2L}{3}\right) - M_s\left(\frac{2L}{3}\right)}{M_s\left(\frac{2L}{3}\right)} = \frac{39.26 - 33.93}{33.93} = 0.16$$

บทที่ 4

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ ศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากความสัมพันธ์ของผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และทางด้านสถิติในรูปของโมเมนต์ตัดตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ของสะพานทดสอบแห่งหนึ่ง ซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามอย่างต่อเนื่องที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานภายใต้การแล่นผ่านของรถบรรทุกสิบล้อ จำนวน 4,975 คัน (ภาณุ พุ่งสุข, 2004) แล้วนำมาหาค่าตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในอดีต ซึ่งศึกษาพฤติกรรมของตัวประกอบการกระแทกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

4.1 ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากงานวิจัยของปานนท์ ลาขโรจน์ (2010) ซึ่งได้ทำการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยทำการจำลองเหตุการณ์การแล่นข้ามสะพานของรถบรรทุกภายใต้เงื่อนไขแบบต่าง ๆ ในคอมพิวเตอร์ แล้วนำมาคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากความสัมพันธ์ของผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และทางด้านสถิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ โดยพิจารณาตัวประกอบการกระแทกทั้งหมด 7 ตำแหน่ง ตามความยาวสะพาน คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ของสะพาน ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะผลวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้เงื่อนไขที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับการทดสอบภาคสนามเท่านั้น

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ

ปานนท์ ลาขโรจน์ (2010) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความยาวช่วงและความถี่ธรรมชาติของสะพาน น้ำหนักรวมและความเร็วของรถบรรทุก เป็นต้น ซึ่งการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกนั้น จะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) โดยวิธีการนี้เป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกัน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นมี 3 ลักษณะคือ ความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและไม่มีความสัมพันธ์กัน โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.1

$$r(X, Y) = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] \cdot [n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (4.1)$$

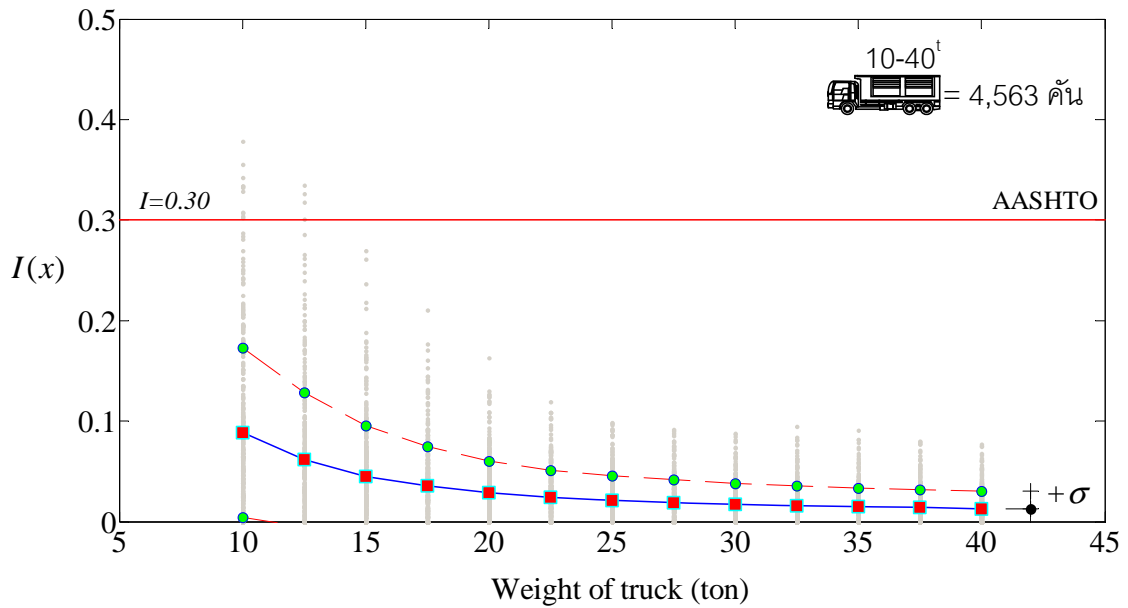
โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ X และตัวแปรตาม Y
 n คือ จำนวนชุดข้อมูล
 X_i คือ ค่าตัวแปรอิสระ (Independent variable) ของชุดข้อมูลที่ i
 Y_i คือ ค่าตัวแปรตาม (Dependent variable) ของชุดข้อมูลที่ i

โดยจะมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับหน่วยในการวัดของ X และ Y ซึ่งไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนหน่วยอย่างไรก็จะไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่าที่เป็นบวกหมายถึงแปรผันตามกัน ส่วนค่าที่เป็นลบหมายถึงแปรผกผันกัน และค่าศูนย์หมายถึงไม่มีความสัมพันธ์กัน ยิ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 นั้นหมายความว่ามีความสัมพันธ์กันมาก แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ ศูนย์จะหมายความว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย

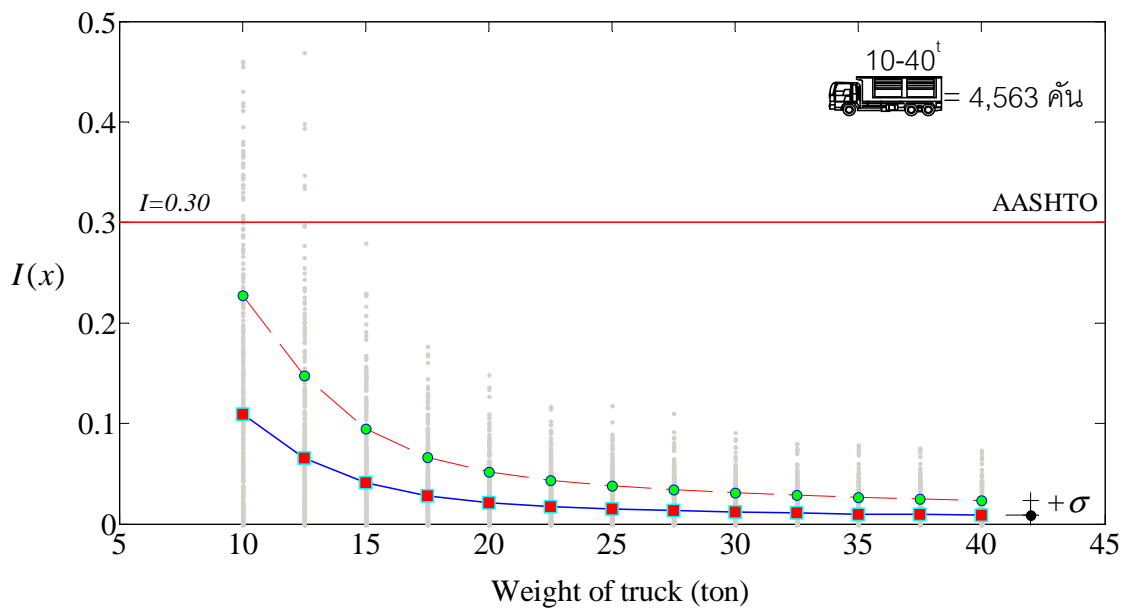
ซึ่งในหัวข้อนี้ จะพิจารณาเฉพาะผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวม ความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรทุกของสะพานที่มีความยาวคงที่เท่ากับ 9.43 เมตร ซึ่งมีค่ามวลต่อความยาวของสะพานเท่ากับ 15,120 กิโลกรัมต่อเมตรและสมมุติระดับความขรุขระของผิวทางเป็นแบบเรียบ (Class A) โดยจะพิจารณาช่วงน้ำหนักของรถบรทุกตั้งแต่ 10 - 40 ตันและช่วงความเร็วของรถบรทุกจะพิจารณาในช่วงตั้งแต่ 5 - 20 เมตรต่อวินาที (18 - 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ส่วนระยะห่างเพลลาของรถบรทุกจะพิจารณาในช่วงตั้งแต่ 3.5 - 5.5 เมตรและสมมุติว่ารถบรทุกไม่มีการกระจัดเริ่มต้นก่อนเข้าสู่สะพาน เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบภาคสนาม เนื่องจากได้ทำการเก็บข้อมูลของรถบรทุกที่แล่นผ่านไปบนสะพานเพียงแห่งเดียว

1) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรทุก

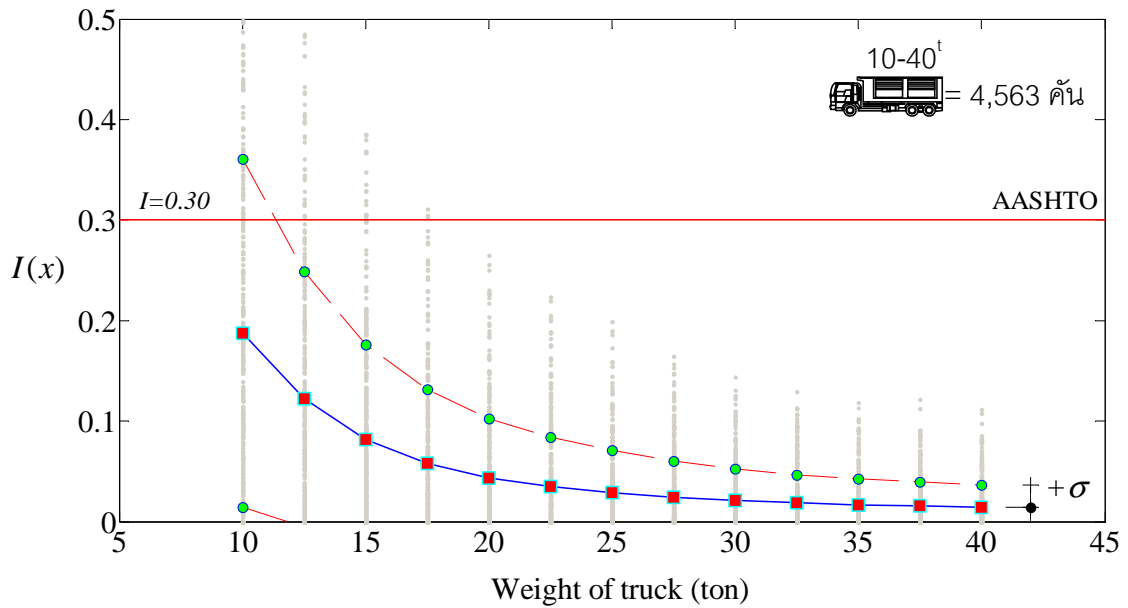
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะทำการจำแนกค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานตามน้ำหนักรวมของรถบรทุก โดยพิจารณาน้ำหนักรวมของรถบรทุกจำนวน 13 ค่า คือ 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5 และ 40 ตัน โดยที่แต่ละตำแหน่งของสะพานมีรถบรทุกที่เคลื่อนไปบนสะพานจำนวนทั้งหมด 4,563 ข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 4.1 - 4.7



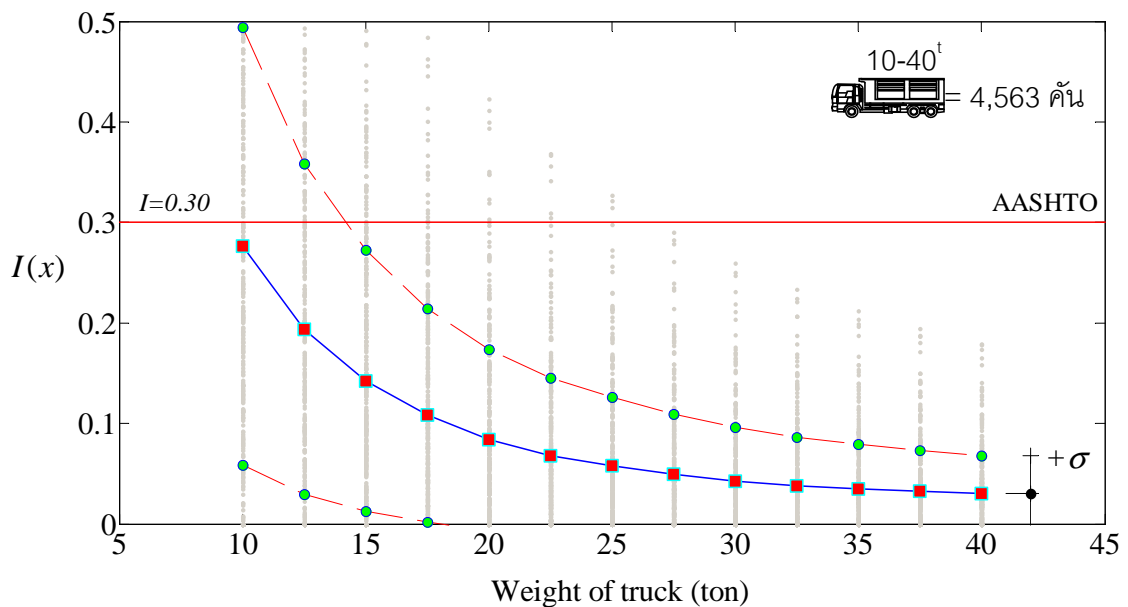
ภาพที่ 4.1 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/8 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล



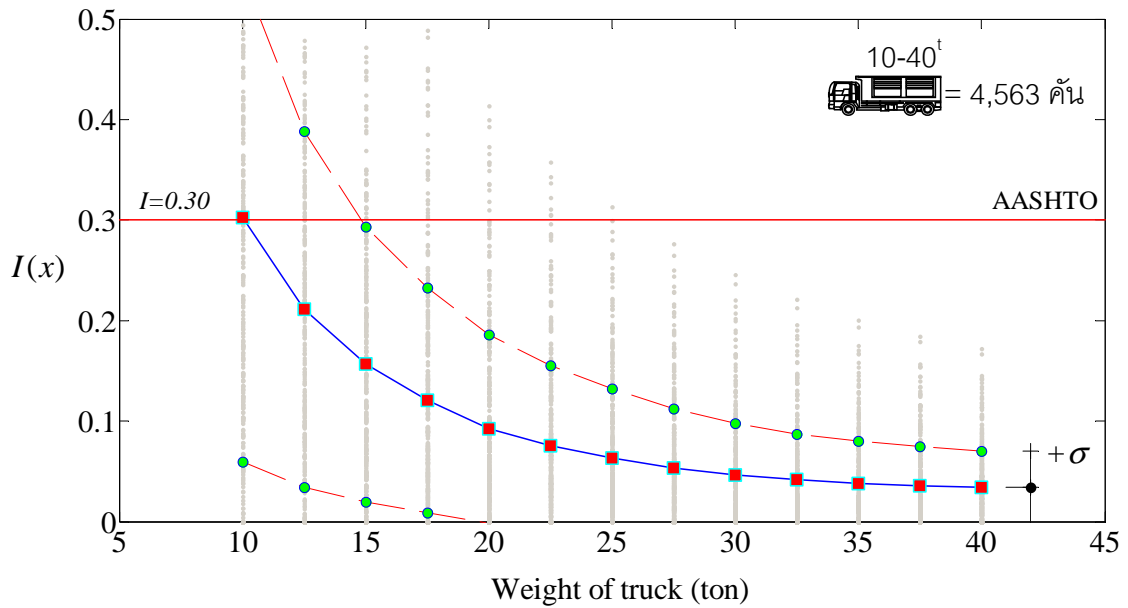
ภาพที่ 4.2 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/4 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล



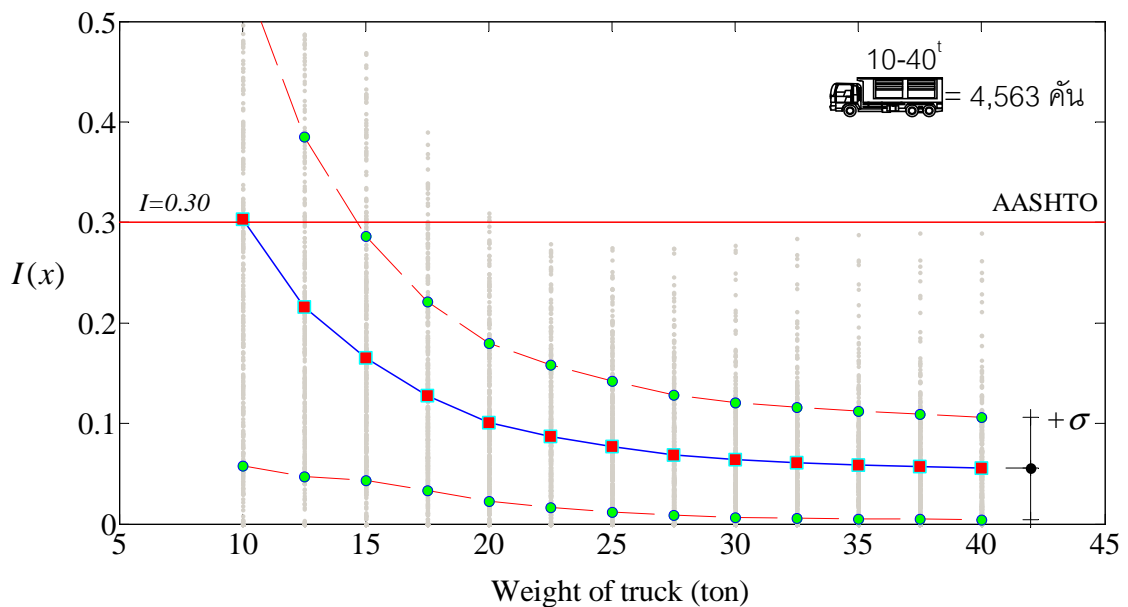
ภาพที่ 4.3 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง 3L/8 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล



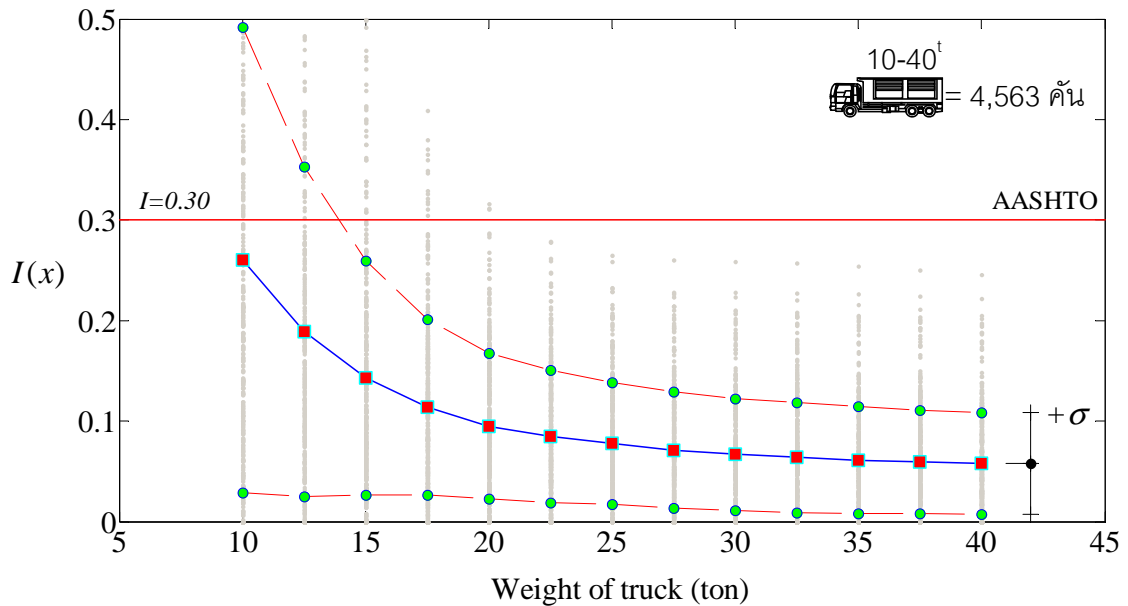
ภาพที่ 4.4 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล



ภาพที่ 4.5 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง 5L/8 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล



ภาพที่ 4.6 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง 3L/4 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล



ภาพที่ 4.7 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง 7L/8 ของสะพานที่น้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล

จากภาพที่ 4.1 – 4.7 แสดงค่าตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 7 ตำแหน่ง ตามความยาวสะพาน คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ตามลำดับ ซึ่งจำแนกตาม น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก พบว่าค่าตัวประกอบการกระจายที่น้ำหนักรวมของรถบรรทุกแต่ ละค่ามีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง ซึ่งส่งผลกระทบต่อกรเปรียบเทียบค่าทำได้ไม่ง่ายนัก ดังนั้น จึงต้อง พิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระจายตามน้ำหนักต่าง ๆ ของรถบรรทุก ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายที่ทุกตำแหน่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อน้ำหนักรวม ของรถบรรทุกสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโดยละเอียดตามช่วงน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจะ พบว่าทั้ง 7 ตำแหน่ง รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงน้ำหนักรถบรรทุก 10 – 25 ตัน ค่าตัว ประกอบการกระจายจะเปลี่ยนแปลงเร็วมาก โดยค่าตัวประกอบการกระจายมีค่าลดลงถึงร้อยละ 45 - 60 เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าตัว แต่เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น ในช่วง 25 - 40 ตัน ค่าตัวประกอบการกระจายค่อนข้างคงที่ โดยค่าตัวประกอบการกระจายมีค่า ลดลงเพียง 0.03 เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวประกอบการกระจายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.15 ที่ ตำแหน่ง 3L/4 ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 10 ตัน ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากน้ำหนักรถบรรทุกที่ค่อนข้างน้อย ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติมีค่าไม่สูงมากและเมื่อ นำมาคำนวณค่าตัวประกอบการกระจาย จึงทำให้ได้ค่าตัวประกอบการกระจายที่ค่อนข้างสูง

นอกจากนี้ ยังทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

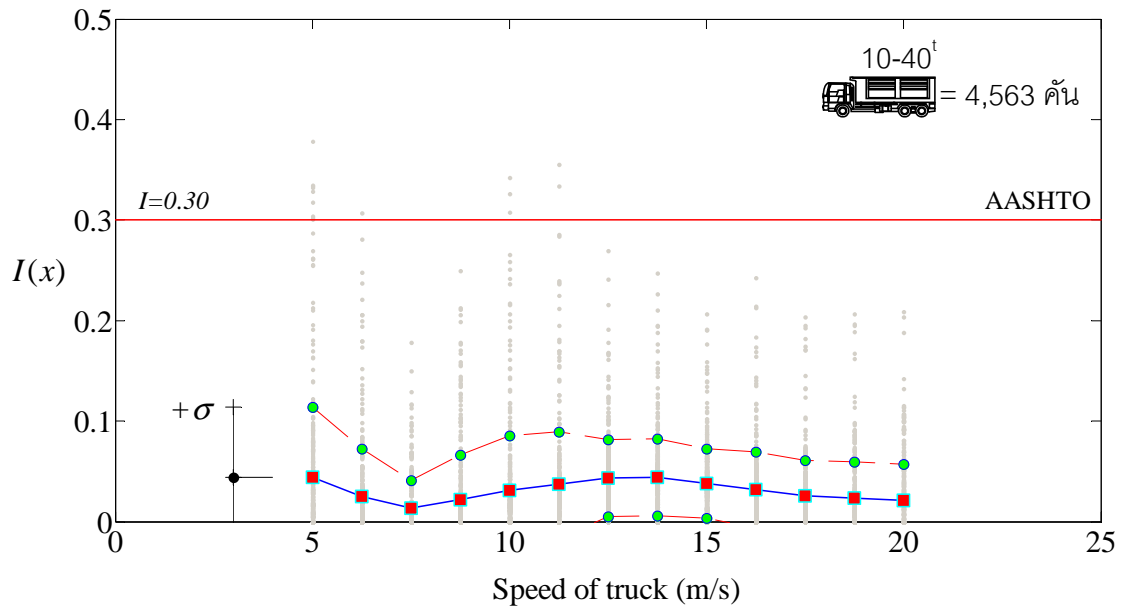
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน

ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r
X : ตัวประกอบการกระแทก กับ Y : น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (10 – 40 ตัน)	L/8	-0.4136
	L/4	-0.4075
	3L/8	-0.4598
	L/2	-0.4989
	5L/8	-0.5080
	3L/4	-0.4809
	7L/8	-0.4245

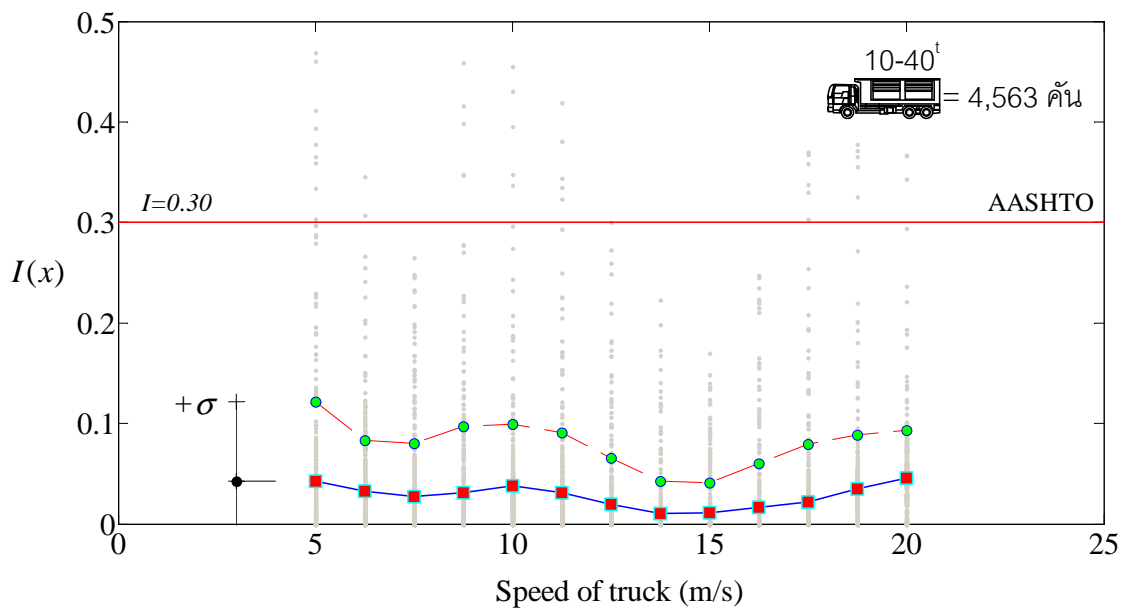
จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 7 ตำแหน่งตามความยาวของสะพาน คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 มีเท่ากับ -0.4136, -0.4075, -0.4598, -0.4989, -0.5080, -0.4809 และ -0.4245 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นลบทั้งหมดและมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 7 ตำแหน่ง ดังนั้น ตัวประกอบการกระแทกที่ทุกตำแหน่งจะแปรผกผันกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น

2) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุก

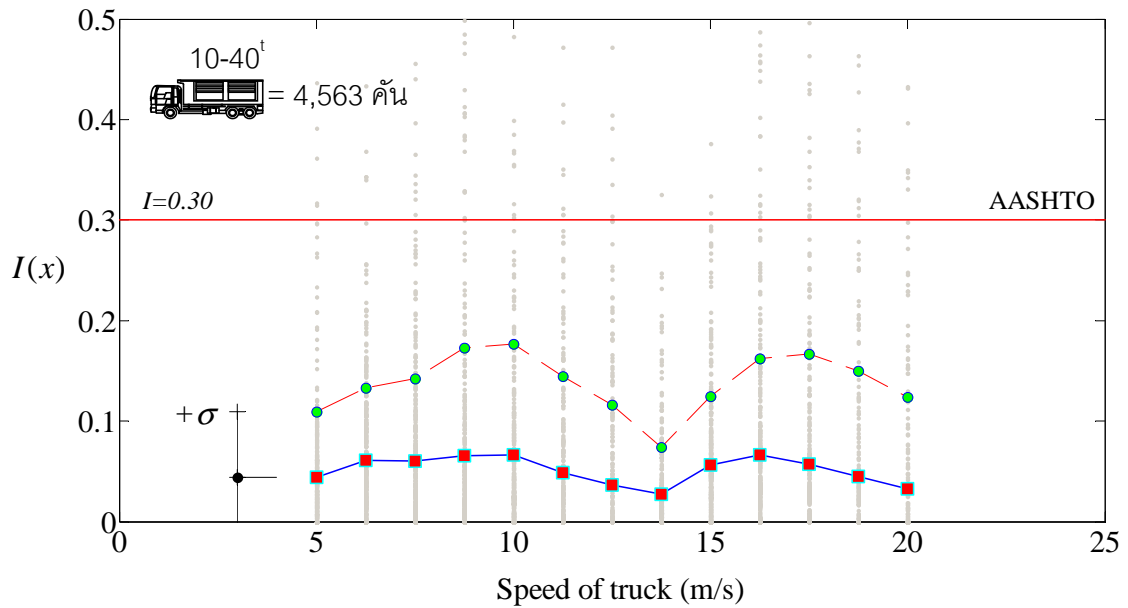
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะทำการจำแนกค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานตามความเร็วของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกจำนวน 13 ค่า คือ 5, 6.75, 7.5, 8.75, 10, 11.75, 12.5, 13.75, 15, 16.75, 17.5, 18.75 และ 20 เมตรต่อวินาที โดยที่แต่ละตำแหน่งของสะพานมีรถบรรทุกที่เคลื่อนไปบนสะพานจำนวนทั้งหมด 4,563 ข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 4.8 – 4.14



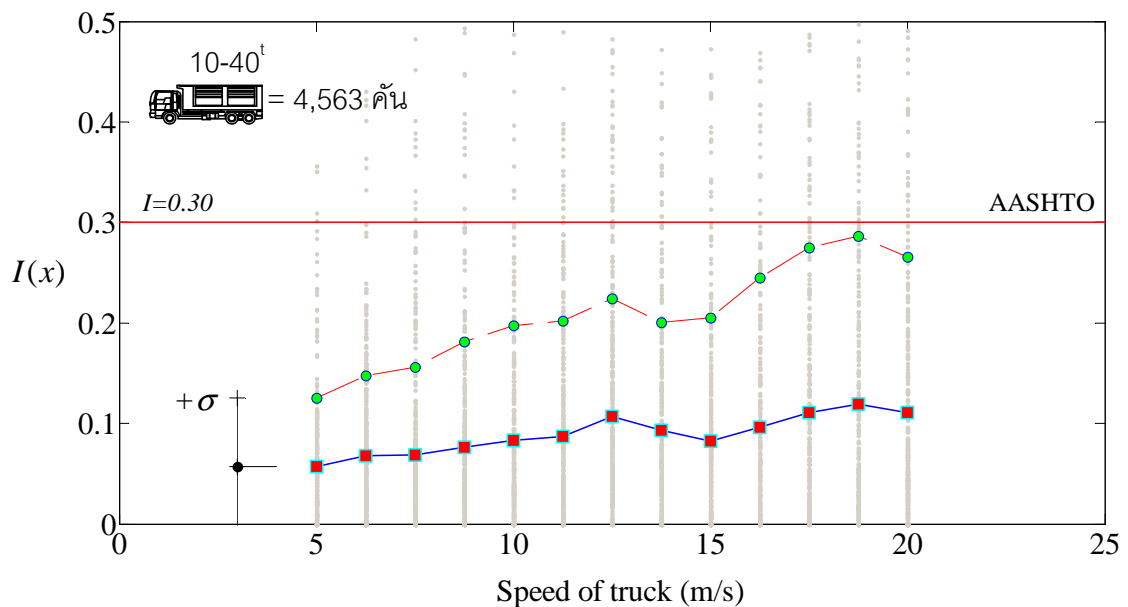
ภาพที่ 4.8 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/8$ ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



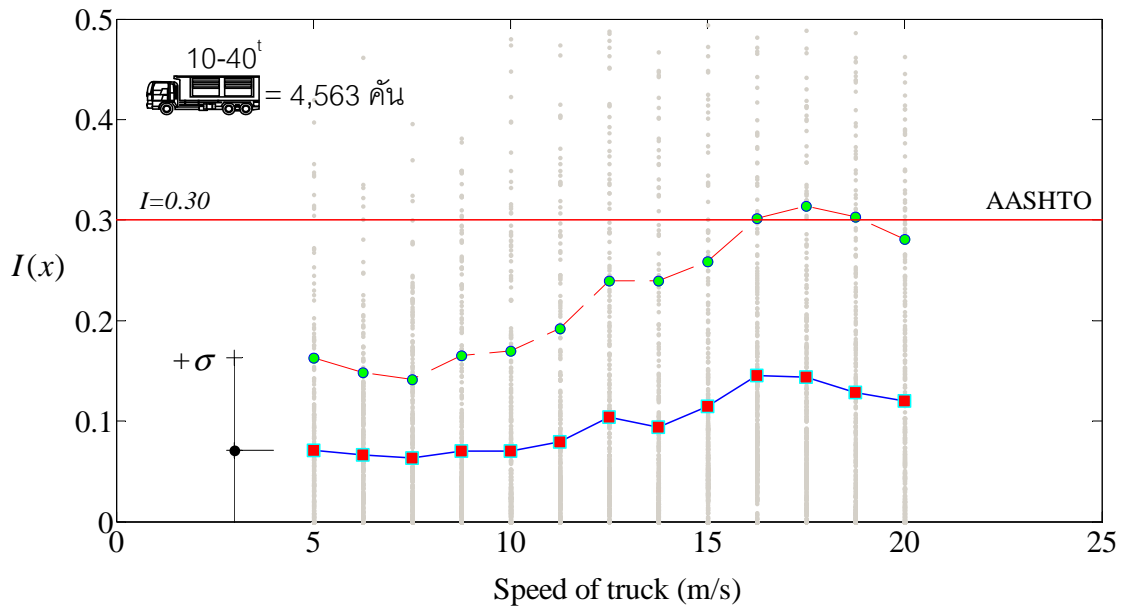
ภาพที่ 4.9 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/4$ ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



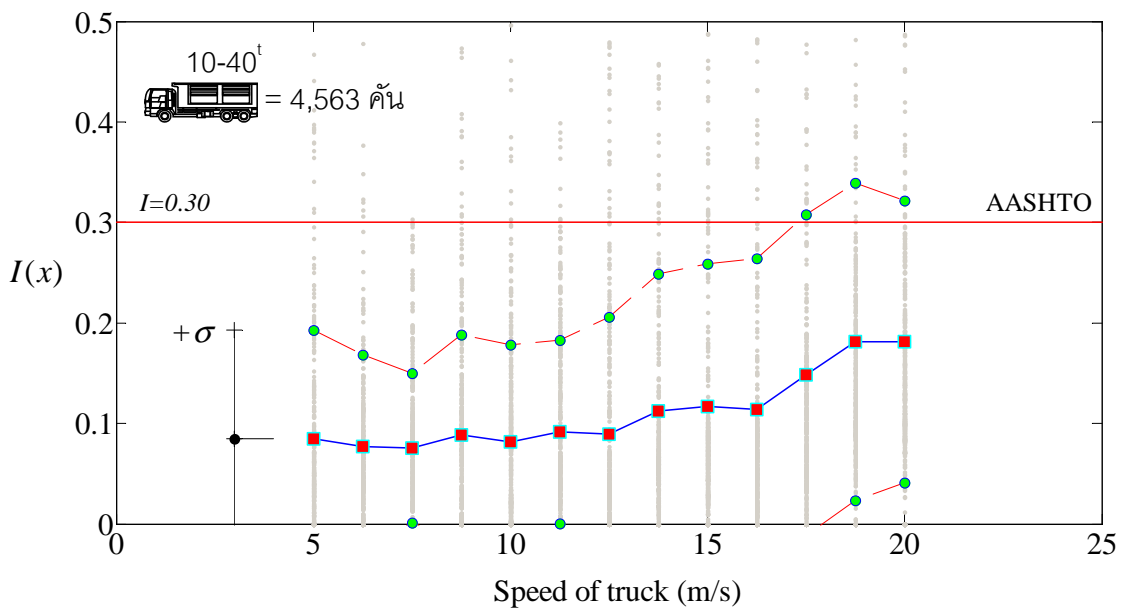
ภาพที่ 4.10 ตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่ง 3L/8 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



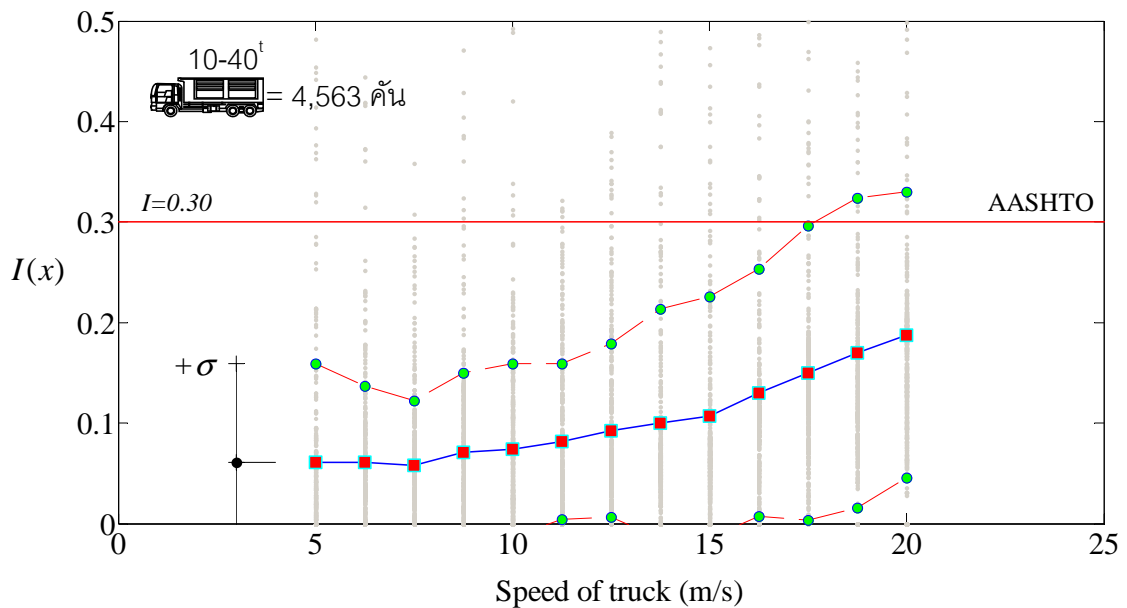
ภาพที่ 4.11 ตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



ภาพที่ 4.12 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 5L/8 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



ภาพที่ 4.13 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 3L/4 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



ภาพที่ 4.14 ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง 7L/8 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน

จากภาพที่ 4.8 – 4.14 แสดงค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 7 ตำแหน่ง ตามความยาวสะพาน คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ตามลำดับ ซึ่งจำแนกตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก พบว่าค่าตัวประกอบการกระทบที่ความเร็วของรถบรรทุกแต่ละค่า มีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเปรียบเทียบทำได้ไม่ถนัด ดังนั้น จึงต้องพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระทบตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากภาพที่ 4.8 – 4.10 พบว่าค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง L/8, L/4 และ 3L/8 ของสะพานมีแนวโน้มไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก เมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น แต่จากภาพที่ 4.11 – 4.14 พบว่าค่าตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ของสะพานมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตำแหน่งบริเวณปลายสะพาน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวประกอบการกระทบมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.15 ที่ตำแหน่ง 3L/4 เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานที่ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที (72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

เนื่องจากยังไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทบกับความเร็วรถบรรทุกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทบกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

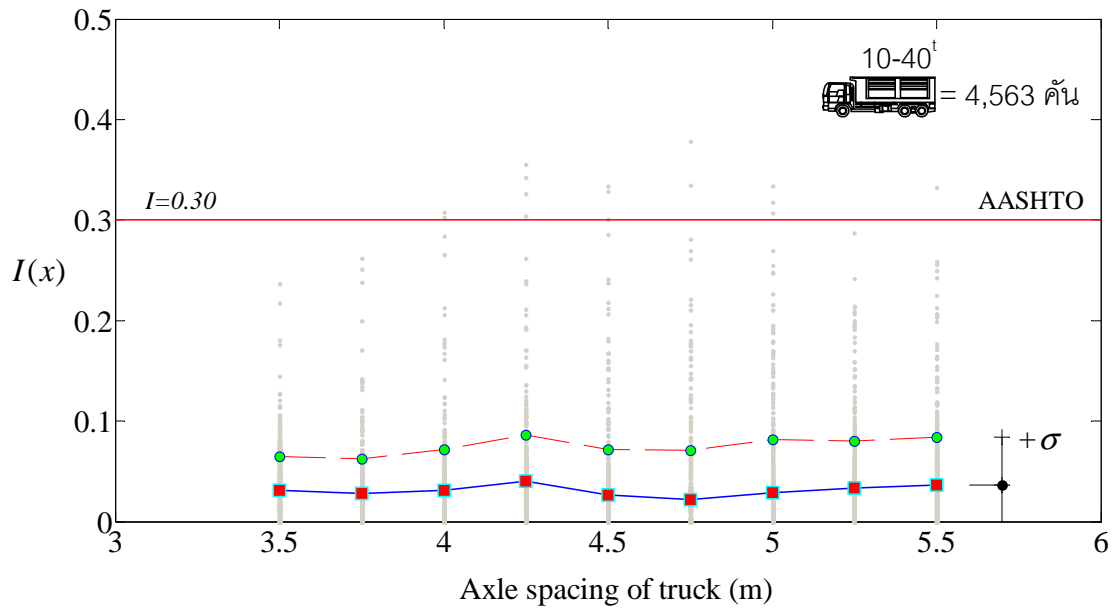
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน

ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r
X : ตัวประกอบการกระแทก กับ Y : ความเร็วของรถบรรทุก (5 – 40 เมตรต่อวินาที)	L/8	-0.0217
	L/4	-0.0414
	3L/8	-0.0460
	L/2	0.1347
	5L/8	0.1929
	3L/4	0.2506
	7L/8	0.3420

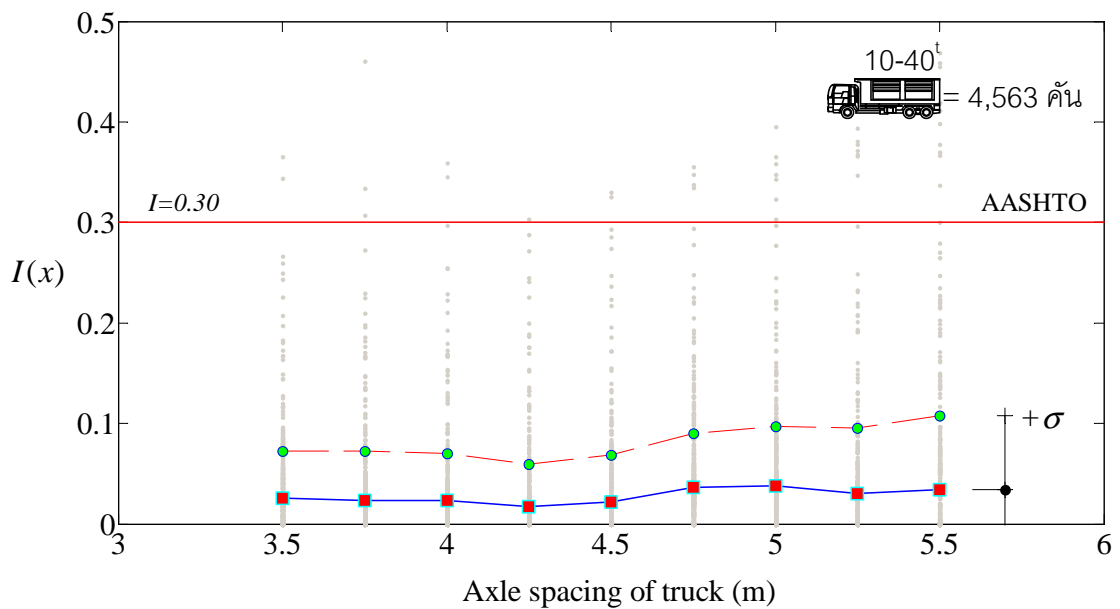
จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ของสะพาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ -0.0217, -0.0414, -0.0460, 0.1347, 0.1929, 0.2506 และ 0.3420 ตามลำดับ พบว่าที่ตำแหน่ง L/8, L/4 และ 3L/8 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งดังกล่าวจึงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วของรถบรรทุก แต่ที่ตำแหน่ง L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 มีค่าเป็นบวก ดังนั้น ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผันตามกับความเร็วของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีความเร็วสูงขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง พบว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มยังไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีความเร็วสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านบริเวณปลายสะพาน

3) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก

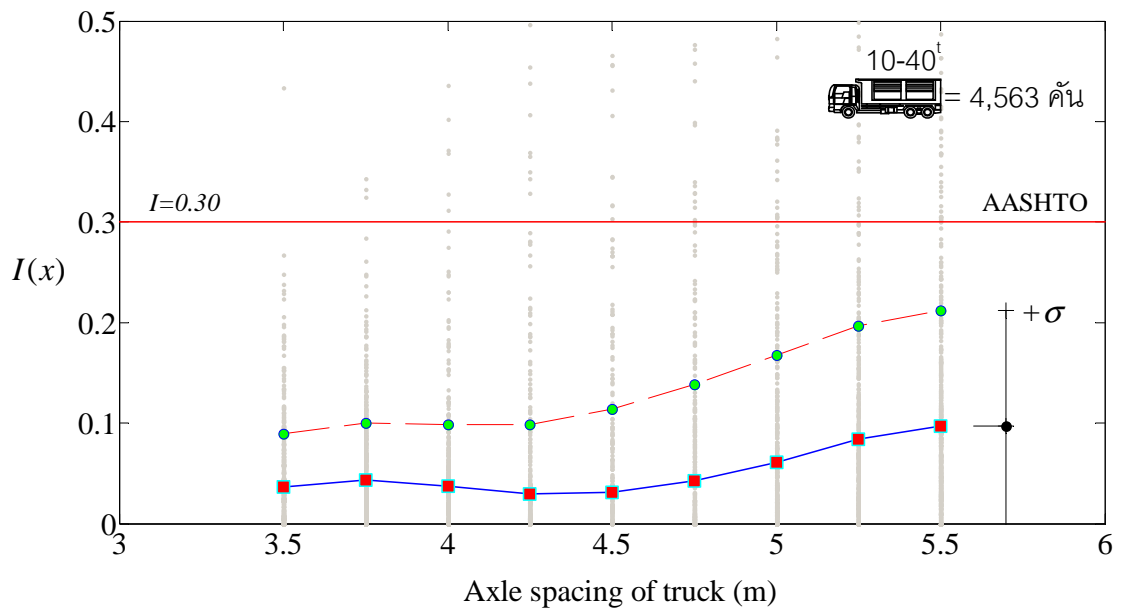
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะทำการจำแนกค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานตามความเร็วของรถบรรทุก โดยพิจารณาความเร็วของรถบรรทุกจำนวน 9 ค่า คือ 3.5, 3.75, 4, 4.25, 4.5, 4.75, 5, 5.25 และ 5.5 เมตร โดยที่แต่ละตำแหน่งของสะพานมีรถบรรทุกที่เคลื่อนไปบนสะพานจำนวนทั้งหมด 4,563 ข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 4.15 – 4.21



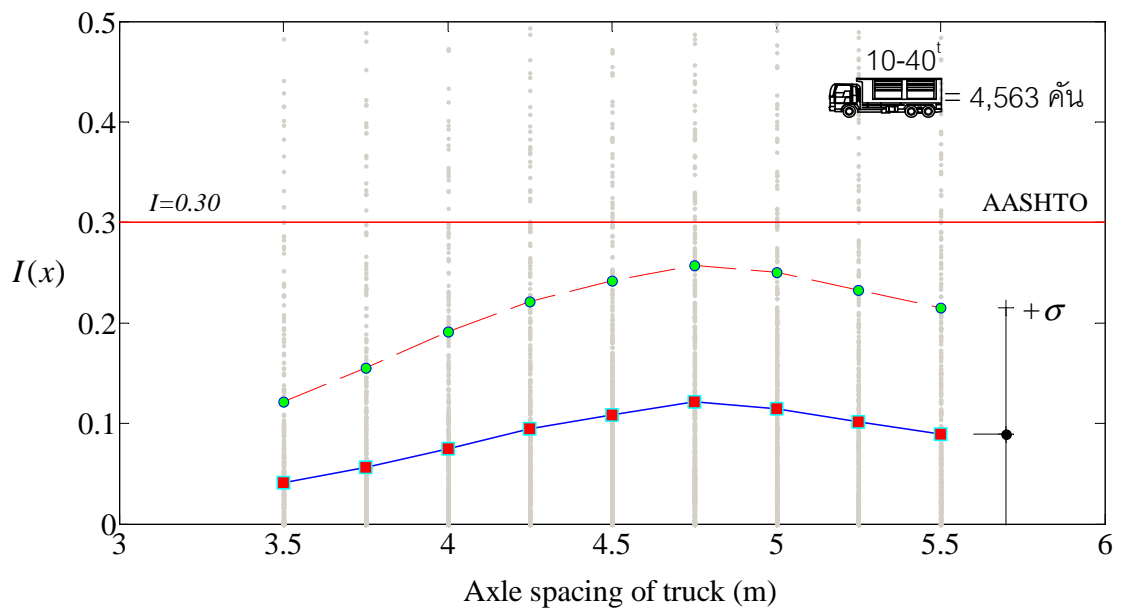
ภาพที่ 4.15 ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัณ



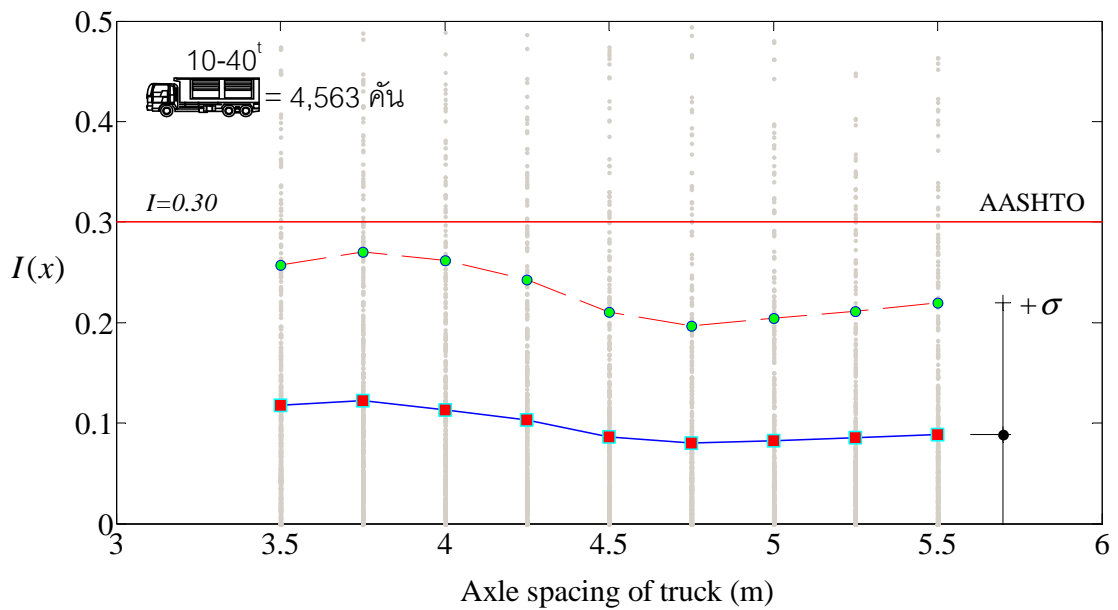
ภาพที่ 4.16 ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง L/4 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัณ



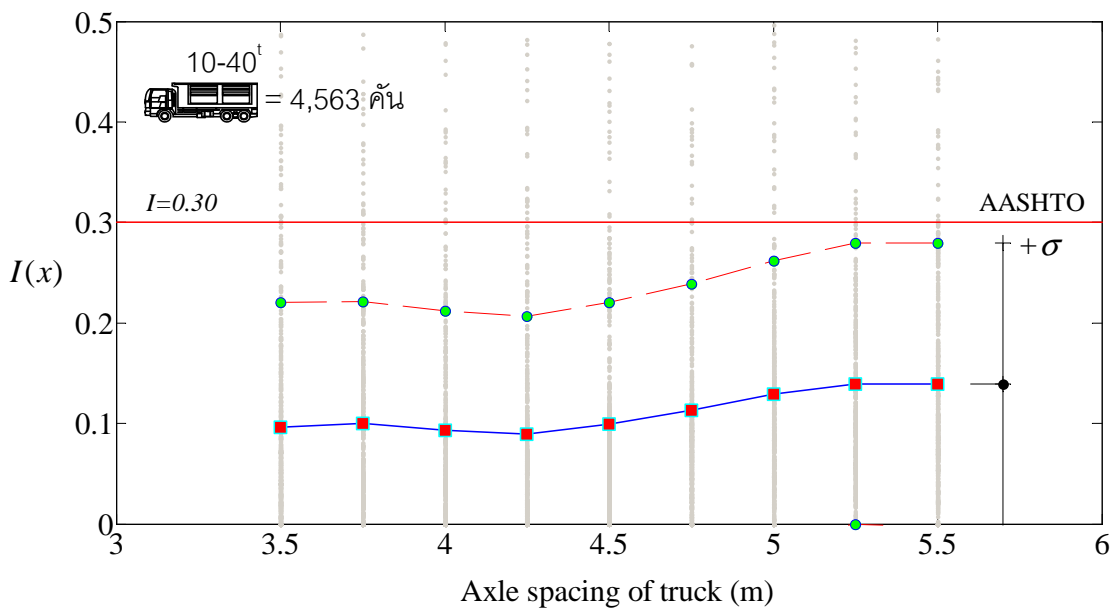
ภาพที่ 4.17 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง 3L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



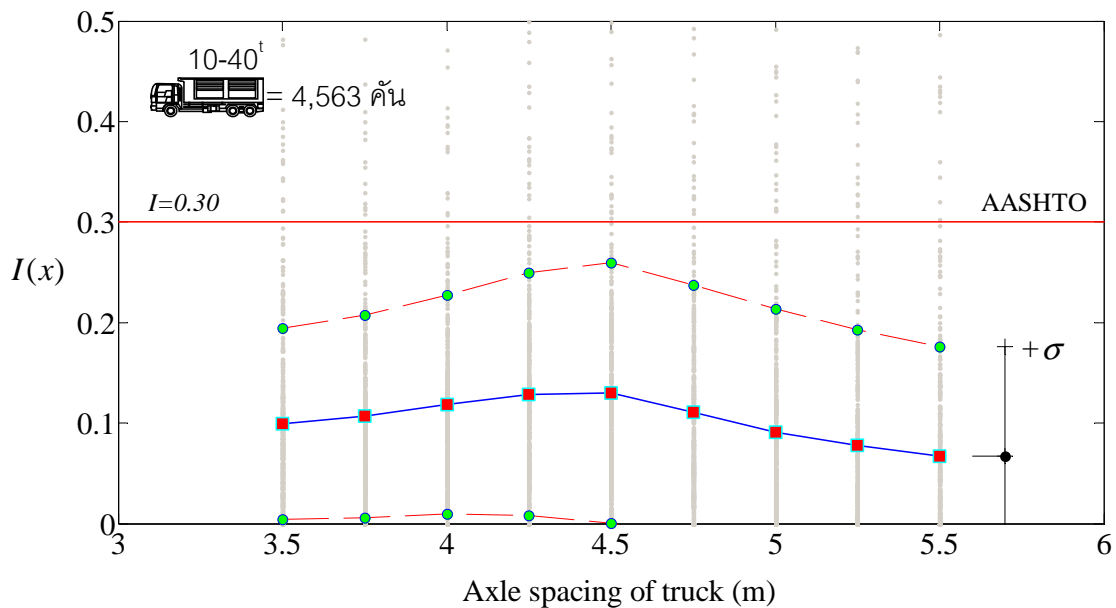
ภาพที่ 4.18 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



ภาพที่ 4.19 ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง 5L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



ภาพที่ 4.20 ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง 3L/4 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน



ภาพที่ 4.21 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 7L/8 ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน

จากภาพที่ 4.15 – 4.21 แสดงค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 7 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ตามลำดับ ซึ่งจำแนกตามระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ระยะห่างเพลาของรถบรรทุกแต่ละค่ามีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง ซึ่งจะส่งผลต่อการเปรียบเทียบทำได้ไม่ถนัด ดังนั้น จึงต้องพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระแทกตามระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/8 ถึง 7L/8 ของสะพานมีแนวโน้มไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก เมื่อระยะห่างเพลาของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.15 ที่ตำแหน่ง 3L/4 เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานมีระยะห่างเพลา 5.5 เมตร

เนื่องจากยังไม่สามารถบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลารถบรรทุกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

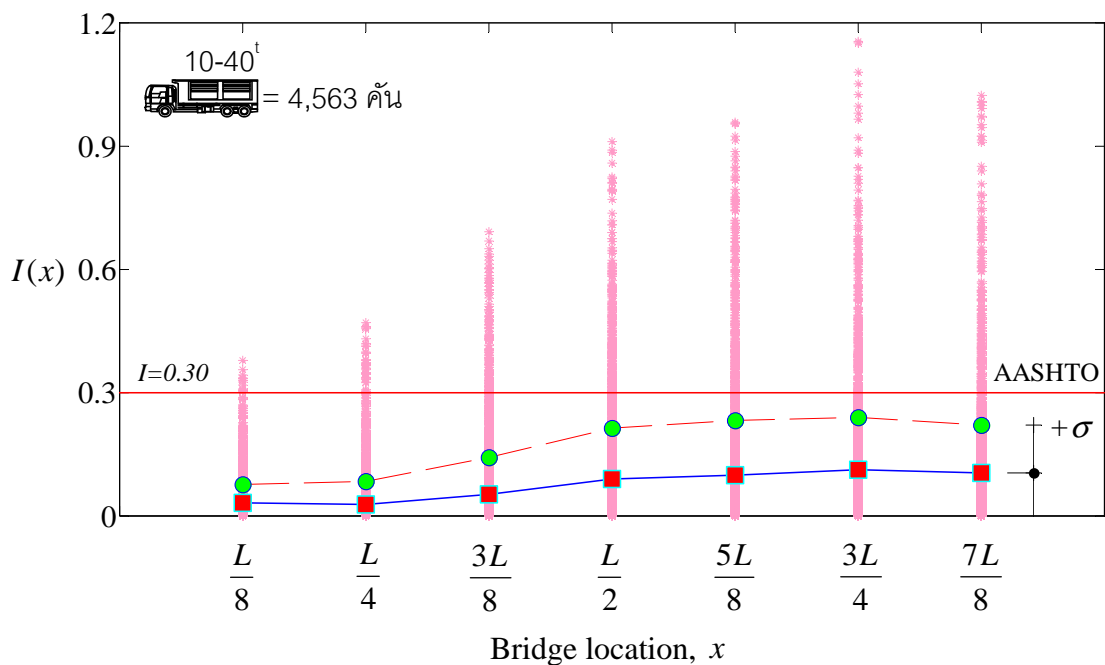
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน

ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r
X : ตัวประกอบการกระแทก กับ Y : ระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก (3.5 – 5.5 เมตร)	L/8	0.0137
	L/4	0.0805
	3L/8	0.2034
	L/2	0.1512
	5L/8	-0.0996
	3L/4	0.1287
	7L/8	-0.1067

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง คือ L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4 และ 7L/8 ตามความยาวของสะพาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0137, 0.0805, 0.2034, 0.1512, -0.0996, 0.1287 และ -0.1067 ตามลำดับ พบว่าที่ตำแหน่ง L/8 และ 5L/8 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งดังกล่าว จึงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก ที่ตำแหน่ง L/4, 3L/8, L/2 และ 3L/4 มีค่าเป็นบวก ดังนั้นตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผันตามกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น แต่ที่ตำแหน่ง 7L/8 มีค่าเป็นลบ ดังนั้นตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผกผันกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลง เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มยังไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น

4.1.2 ตัวประกอบการกระแทกจากผลตอบสนองในรูปแบบของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน

เพื่อศึกษาพฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 7 ตำแหน่ง คือ $L/8$, $L/4$, $3L/8$, $L/2$, $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$ ตามความยาวของสะพาน ทำการหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และด้านสถิติในรูปแบบของโมเมนต์ดัดตามสมการที่ 3.4 หลังจากนั้นนำตัวประกอบการกระแทกนั้นมาเปรียบเทียบกันทั้ง 7 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล

จากภาพที่ 4.22 แสดงค่าตัวประกอบการกระแทกจากผลตอบสนองในรูปแบบของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 7 ตำแหน่งตามความยาวของสะพาน คือ $L/8$, $L/4$, $3L/8$, $L/2$, $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$ พบว่ามีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.38, 0.47, 0.69, 0.91, 0.96, 1.15 และ 1.02 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้ว พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งที่มี

ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นของสะพานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ค่าตัวประกอบการกระแทกจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่พิจารณาอย่างมีนัยสำคัญและเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดที่แต่ละตำแหน่ง พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ อาจมีโอกาที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ โดยเฉพาะค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งบริเวณปลายสะพาน ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานถึงร้อยละ 26.67

นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกระแทกกับค่าที่กำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.30 สำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวไม่เกิน 10 เมตร พบว่ามีกรณีที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่า 0.30 (AASHTO, 2002) คิดเป็นจำนวนกรณีร้อยละ 0.3, 0.9, 3.1, 7.0, 7.9, 6.7 และ 5.1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่า 0.30 (AASHTO, 2002) มีอยู่พอสมควร โดยเฉพาะที่ตำแหน่งตั้งแต่กึ่งกลางสะพานเป็นต้นไป

4.1.3 ผลเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

การศึกษาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะมีค่ามากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้หรือไม่นั้น จะทำการศึกษาความเป็นได้ที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน อีกทั้งยังเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับทุกกรณีของรถบรรทุกที่เคลื่อนไปบนสะพาน

1) ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

ทำการศึกษาความเป็นได้ที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานของรถบรรทุกคันเดียวกัน ตามสมการที่ 4.2

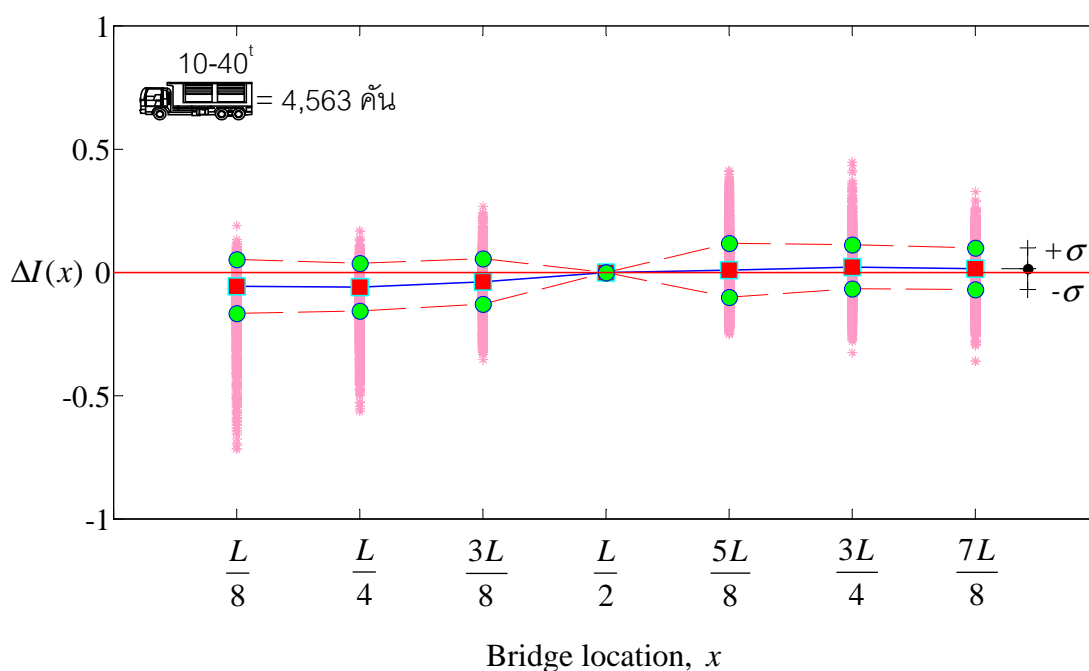
$$\Delta I(x) = I(x) - I\left(\frac{L}{2}\right) \quad (4.2)$$

โดยที่ $\Delta I(x)$ คือ ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน (แสดงถึงความคลาดเคลื่อนของโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ใช้ ออกแบบที่ตำแหน่ง x หากใช้ค่า $I(x) = I(\frac{L}{2})$)

$I(x)$ คือ ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ของสะพาน

$I(\frac{L}{2})$ คือ ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

จากสมการที่ 4.2 สามารถคำนวณผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานแล้ว หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 7 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล

จากภาพที่ 4.23 แสดงผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างของตัว

ประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้ว พบว่าผลต่างของตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากจุดเริ่มต้นของสะพานเพิ่มมากขึ้น โดยที่ผลต่างสูงสุดระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/8$, $L/4$, $3L/8$, $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$ ของสะพานกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมีค่าเท่ากับ 0.19, 0.17, 0.27, 0.41, 0.45 และ 0.33 ตามลำดับ และมีจำนวนข้อมูลที่มีตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน คิดเป็นร้อยละ 26.6, 17.1, 32.3, 50.9, 62.4 และ 55.7 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ามีโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ยากค่อนข้างมาก โดยเฉพาะบริเวณปลายสะพาน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทำให้สะพานสั่นด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่รถบรรทุกจนเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ขนาดของการสั่นของสะพานและรถบรรทุกจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมายังบริเวณปลายสะพาน จึงพบการสั่นที่มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งกึ่งกลางสะพานไปแล้ว

2) อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

ทำการศึกษาความเป็นได้ที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานของรถบรรทุกคันเดียวกัน ตามสมการที่ 4.3

$$I_R(x) = \frac{I(x)}{I(\frac{L}{2})} \quad (4.3)$$

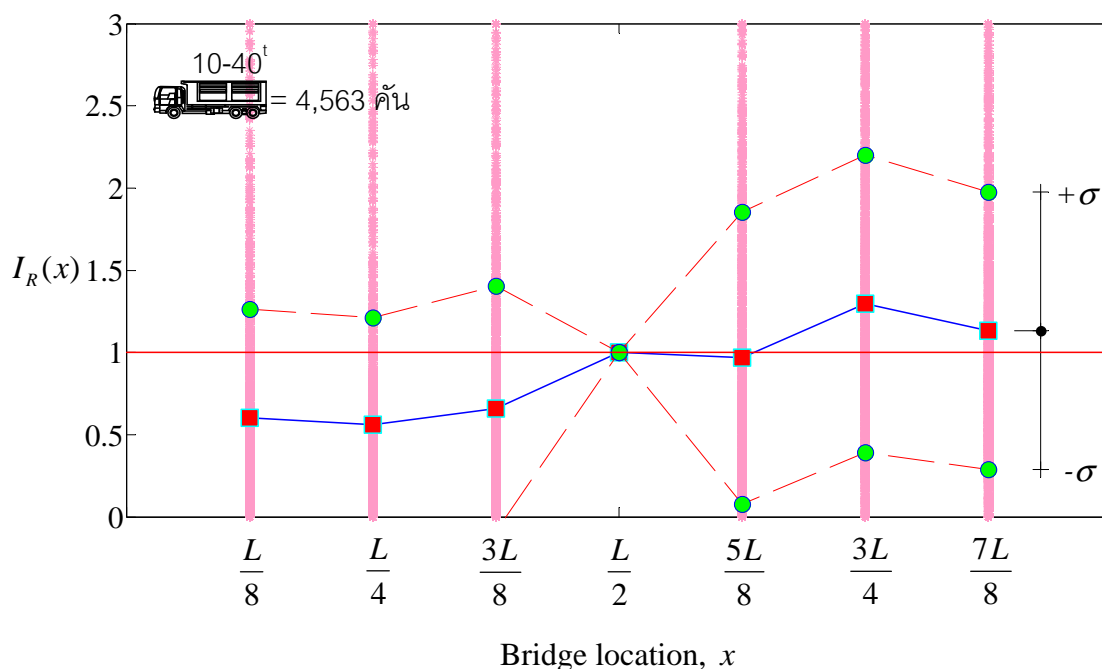
โดยที่ $I_R(x)$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

$I(x)$ คือ ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ บนพื้นสะพาน

$I(\frac{L}{2})$ คือ ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

จากสมการที่ 4.3 สามารถคำนวณอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานแล้ว ทั้งนี้ได้จำกัดค่าอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจาก

ค่าตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมีค่าน้อยมากหรือมีค่าเป็นศูนย์ไว้ไม่เกิน 3.0 หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 7 ตำแหน่ง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 ข้อมูล

จากภาพที่ 4.24 แสดงอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยเปรียบเทียบตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งทั้ง 7 ตำแหน่ง เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนของตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้ว พบว่าอัตราส่วนของตัวประกอบการกระจายมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากจุดเริ่มต้นของสะพานเพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง $L/8$, $L/4$, $3L/8$, $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$ ของสะพานกับตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมีค่าเท่ากับ 0.60, 0.56, 0.66, 0.97, 1.30 และ 1.13 ตามลำดับ และมีจำนวนข้อมูลที่มีตัวประกอบการกระจายมีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน คิดเป็นร้อยละ 9.7, 9.0, 13.9, 26.5, 41.5 และ 33.6 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ามีโอกาสที่ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้อยู่ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะบริเวณปลายสะพาน

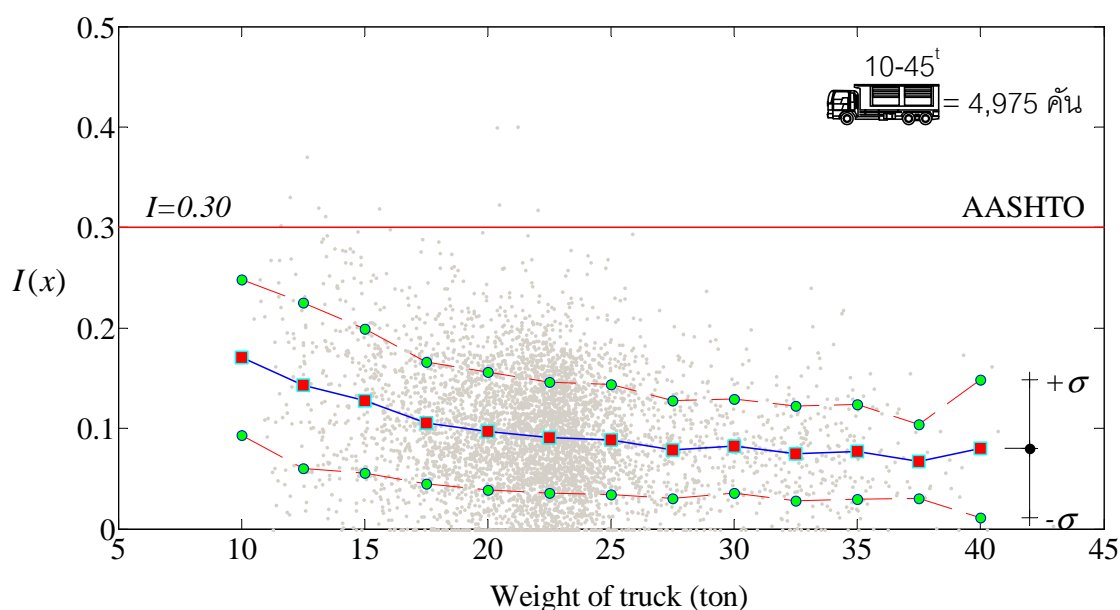
4.2 ผลการศึกษาจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม

4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ

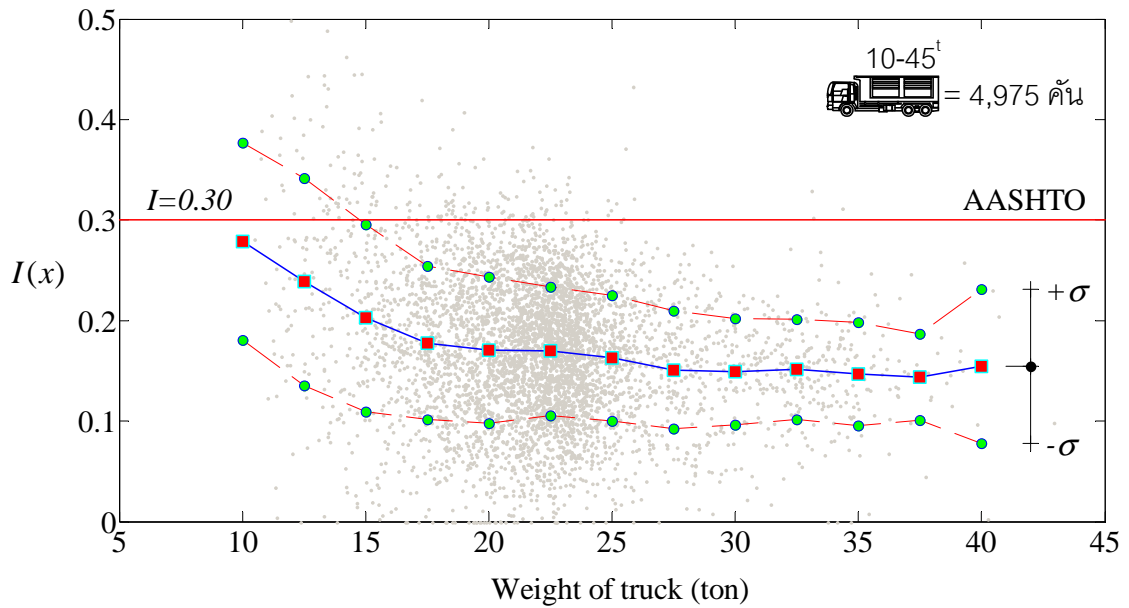
การศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกนั้น จะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) เช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อ 4.1

1) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

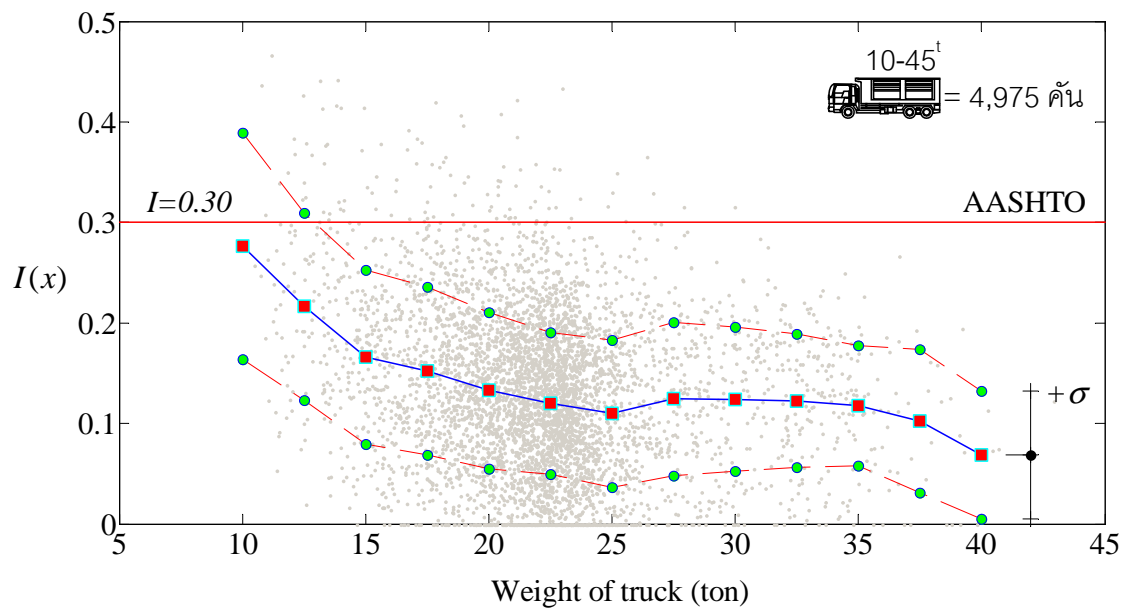
จากการเก็บข้อมูลการทดสอบภาคสนามมีรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านไปบนสะพานจำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน ซึ่งรถบรรทุกมีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงประมาณ 10 – 45 ตัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามนั้น จะทำการจำแนกค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานตามน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 4.25 – 4.27



ภาพที่ 4.25 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน



ภาพที่ 4.26 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน



ภาพที่ 4.27 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานที่น้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

จากภาพที่ 4.25 - 4.27 แสดงค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามทั้งหมด 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ตามลำดับ ซึ่งรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านไปบนสะพานมีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงประมาณ 10 - 45 ตัน จำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน โดยน้ำหนักรวมของรถบรรทุกส่วนมากอยู่ในช่วงประมาณ 20 - 25 ตันและค่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละช่วงของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างกว้างทั้ง 3 ตำแหน่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกตามน้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุกทำได้ไม่ถนัด ดังนั้นจึงต้องพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระแทกตามช่วงของน้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุก ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อน้ำหนักของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโดยละเอียดตามช่วงน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจะพบว่าที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงน้ำหนักรถบรรทุก 10 - 25 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกจะเปลี่ยนแปลงเร็วมาก โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 2L/3 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าลดลงถึงร้อยละ 49.3 เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าตัว แต่เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นในช่วง 25 - 45 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกค่อนข้างคงที่ โดยค่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าลดลงเพียงร้อยละ 6.9 เท่านั้น ทั้งนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่ง L/2 มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 0.93 จากรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีน้ำหนักรวม 11.94 ตัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากน้ำหนักรถบรรทุกที่ค่อนข้างน้อย ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติมีค่าไม่สูงมาก จึงทำให้ได้ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ค่อนข้างสูง

นอกจากนี้ยังทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพานดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r		
	L/3	L/2	2L/3
X : ตัวประกอบการกระแทก กับ Y : น้ำหนักรวมของรถบรรทุก (10.47 - 42.93 ตัน)	-0.2034	-0.1882	-0.1970

จากตารางที่ 4.4 พบว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 มีค่าเท่ากับ -0.2034, -0.1882 และ -0.1970 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นลบทั้งหมดและใกล้เคียงกัน ดังนั้น ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งจะแปรผกผันกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ปานนท์ ลาขโรจน์, 2010) ดังได้อภิปรายไว้ในหัวข้อ 4.1

ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง 10 – 25 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกจะเปลี่ยนแปลงเร็วมาก แต่เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกสูงขึ้นในช่วง 25 - 45 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกค่อนข้างคงที่ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ได้อย่างชัดเจน จึงต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน โดยพิจารณาแบ่งแยกช่วงของน้ำหนักรวมเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงน้ำหนักรวม 10 – 25 ตันและ 25 – 45 ตัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน โดยพิจารณาแบ่งแยกตามช่วงของน้ำหนักรวม

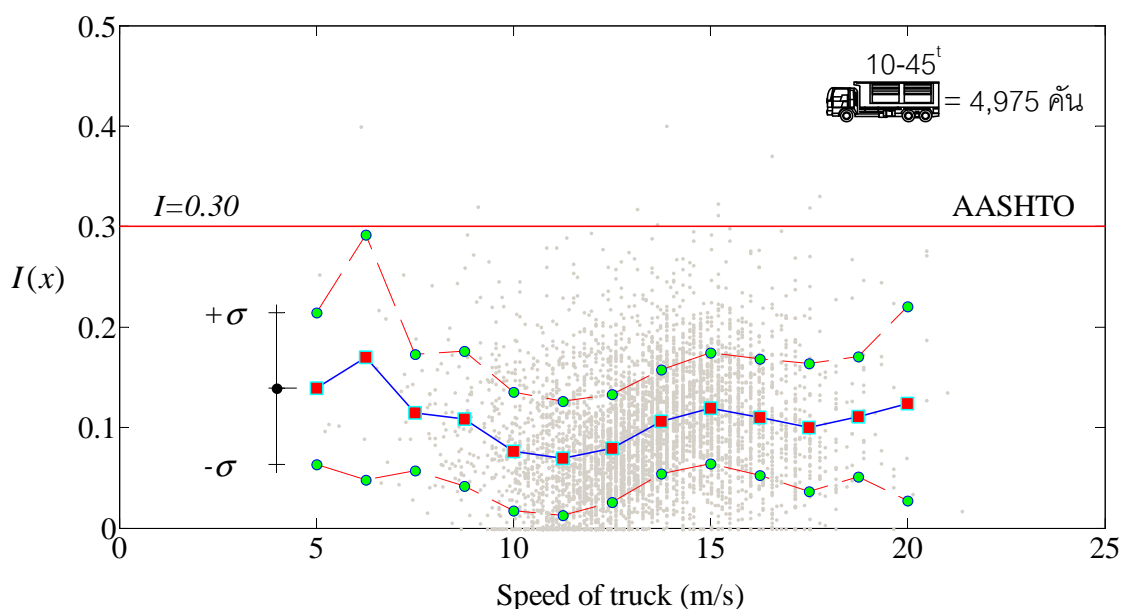
ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r	
		10 – 25 ^t	25 – 45 ^t
X : ตัวประกอบการกระแทก	L/3	-0.2097	-0.1258
	L/2	-0.1745	-0.0774
Y : น้ำหนักรวมของรถบรรทุก	2L/3	-0.2710	-0.0180

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน โดยพิจารณาแบ่งแยกตามช่วงของน้ำหนักรวม พบว่า ที่ตำแหน่ง L/3 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง 10 – 25 ตัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ติดลบค่อนข้างมาก ตัวประกอบการกระแทกในช่วงน้ำหนักรวมดังกล่าวจึงมีค่าลดลงเร็วมาก เมื่อรถบรรทุกมีน้ำหนักรวมสูงขึ้นและรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง 25 – 45 ตัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ติดลบแต่ไม่มากนัก ตัวประกอบการกระแทกในช่วงน้ำหนักรวมดังกล่าวจึงมีค่าลดลงช้า ๆ ส่วนที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง 10 – 25 ตัน มี

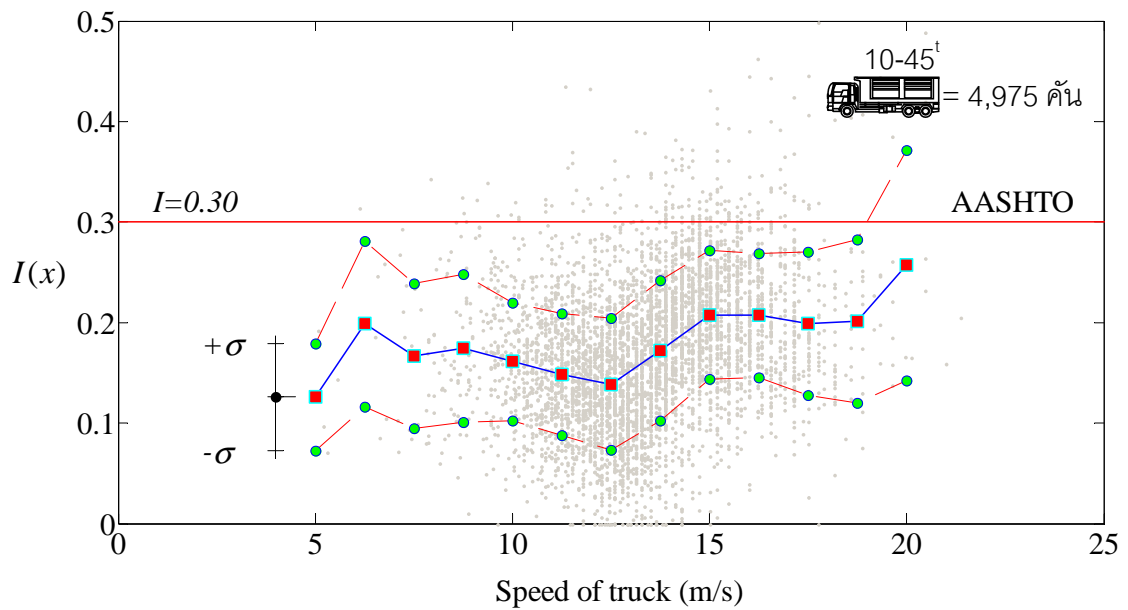
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ติดลบค่อนข้างมาก ตัวประกอบการกระแทกในช่วงน้ำหนักรวมดังกล่าว จึงมีค่าลดลงเร็วมาก เมื่อรถบรรทุกมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่ง $2L/3$ แต่รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง 25 – 45 ตัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยมาก ตัวประกอบการกระแทกในช่วงน้ำหนักรวมดังกล่าวจึงค่อนข้างคงที่ เมื่อรถบรรทุกมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโหมดการสั่นของรถบรรทุกและสะพานเป็นไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ขนาดการสั่นของสะพานและรถบรรทุกจึงมีค่าสม่ำเสมอเทียบกับเวลา เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมีค่ามากขึ้น ตัวประกอบการกระแทกจึงมีค่าค่อนข้างคงที่

2) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุก

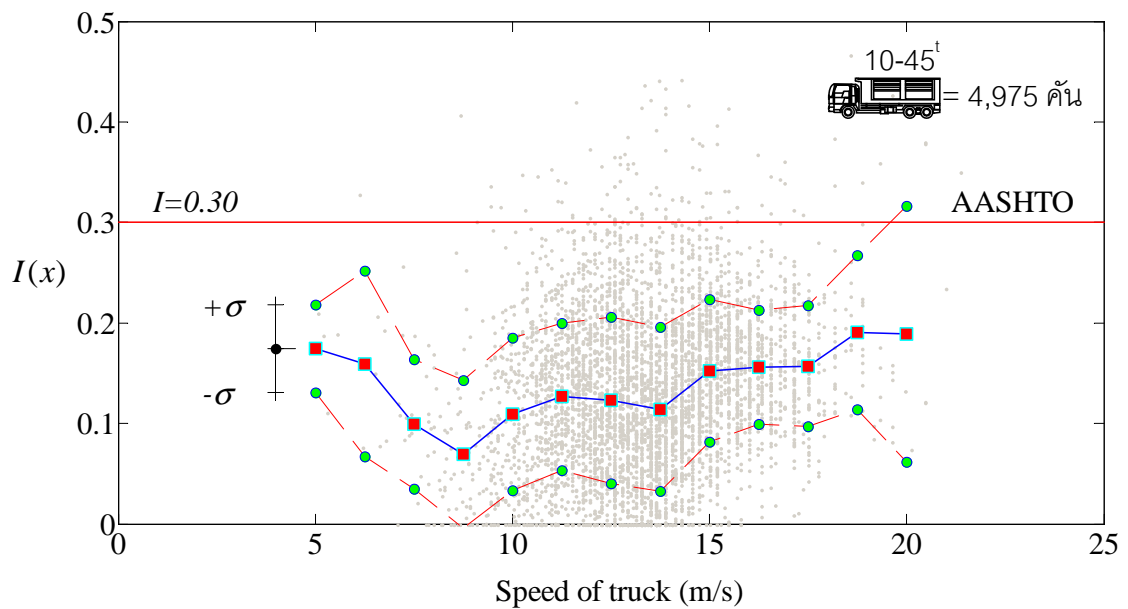
จากการเก็บข้อมูลการทดสอบภาคสนามมีรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานจำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน ซึ่งรถบรรทุกมีความเร็วอยู่ในช่วงประมาณ 5 – 20 เมตรต่อวินาที (18 – 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามนั้น จะทำการจำแนกค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานตามความเร็วของรถบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 4.28 – 4.30



ภาพที่ 4.28 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน



ภาพที่ 4.29 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน



ภาพที่ 4.30 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ของสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

จากภาพที่ 4.28 - 4.30 แสดงค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามทั้งหมด 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ตามลำดับ ซึ่งรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านไปบนสะพานมีความเร็วอยู่ในช่วงประมาณ 5 - 20 เมตรต่อวินาที (18 - 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) จำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน ที่แต่ละตำแหน่งของสะพาน พบว่าความเร็วของรถบรรทุกส่วนมากอยู่ในช่วงประมาณ 10 - 15 เมตรต่อวินาที (36 - 54 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และค่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละช่วงของความเร็วของรถบรรทุกมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างกว้างทั้ง 3 ตำแหน่ง ซึ่งส่งผลต่อการเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกทำได้ไม่ถนัด ดังนั้น จึงต้องพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระแทกตามช่วงของความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุก พบว่าที่ตำแหน่ง L/3 และ L/2 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มไม่ชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วรถเพิ่มขึ้น ขณะที่ตำแหน่ง 2L/3 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเร็วของรถบรรทุกสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่ง L/2 มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 0.93 จากรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านไปบนสะพานมีความเร็วเท่ากับ 17.75 เมตรต่อวินาที (63.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

นอกจากนี้ ยังทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วยของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพานดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วยของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน

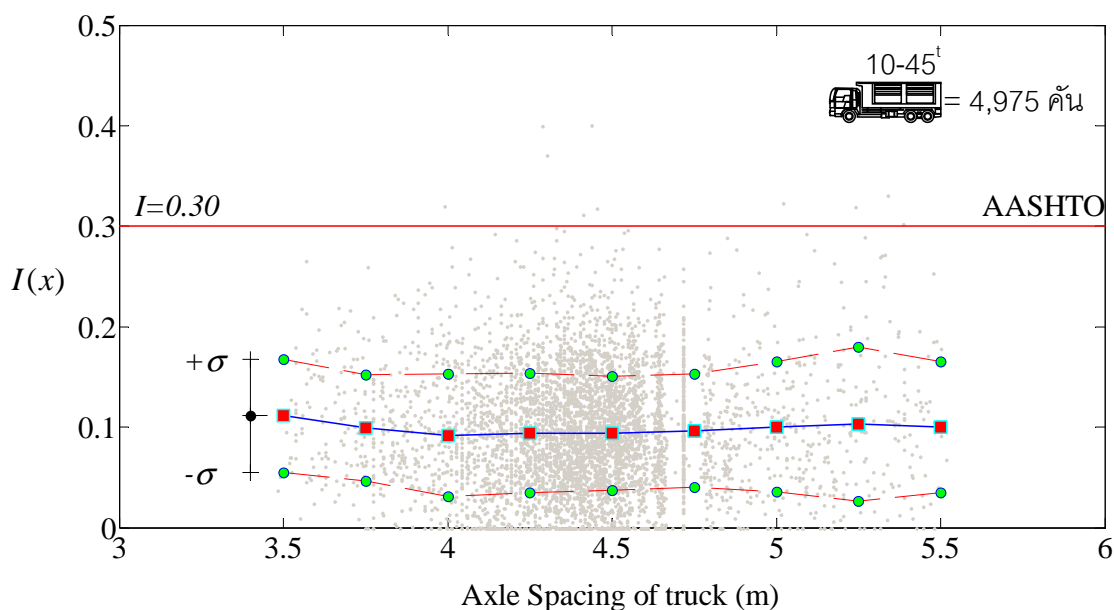
ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r		
	L/3	L/2	2L/3
X : ตัวประกอบการกระแทก กับ Y : ความเร็วของรถบรรทุก (5.07 - 21.36 เมตรต่อวินาที)	0.2078	0.2824	0.2031

จากตารางที่ 4.6 พบว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วยของรถบรรทุกทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 มีค่าเท่ากับ 0.2078, 0.2824 และ 0.2031 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นบวกทั้งหมดและใกล้เคียงกัน ดังนั้น ค่าตัวประกอบการกระแทกมี

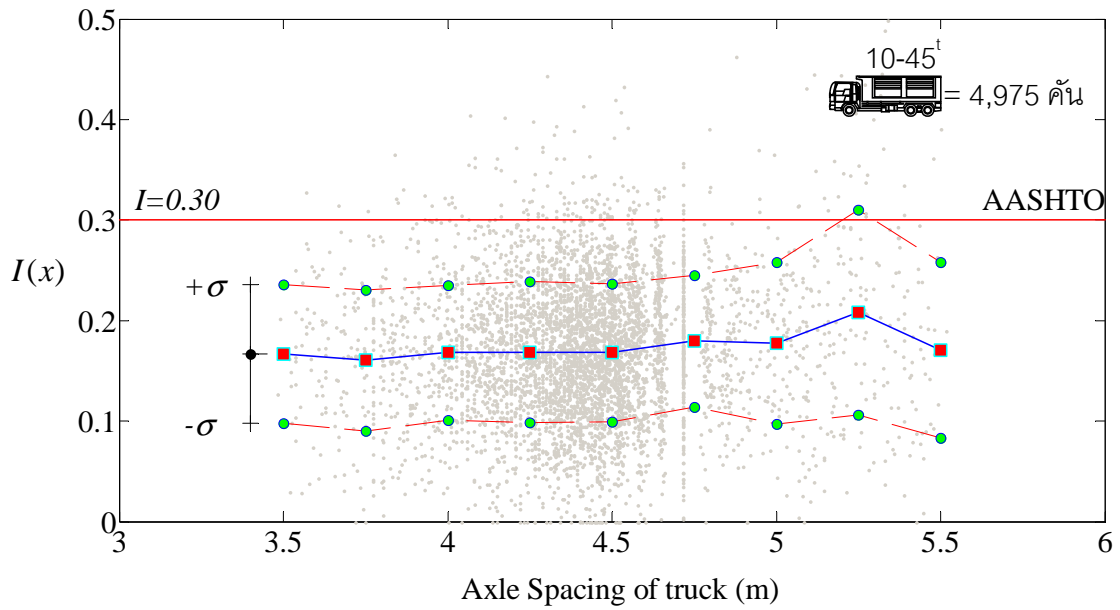
ความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วของรถบรรทุก โดยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งจะแปรผันตามกับความเร็วของรถบรรทุก กล่าวคือค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านไปบนสะพานมีความเร็วสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ปานนท์ ลาซโรจน์, 2010) ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1

3) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก

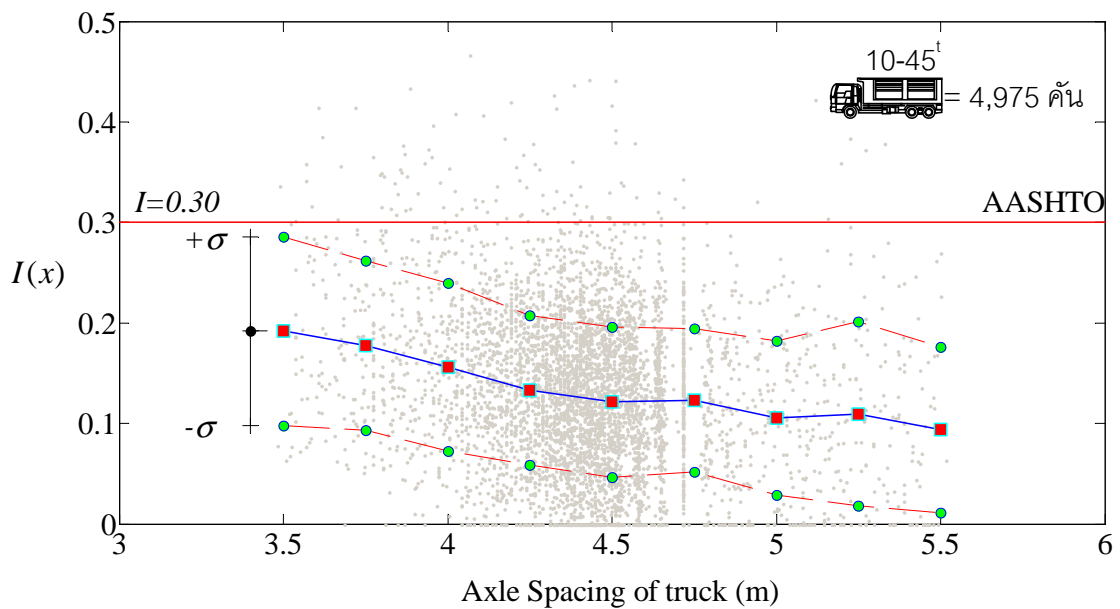
จากการเก็บข้อมูลการทดสอบภาคสนามรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานจำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน ซึ่งรถบรรทุกมีระยะห่างเพลลาอยู่ในช่วงประมาณ 3.5 – 5.5 เมตร เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามนั้น จะทำการจำแนกค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานตามระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก ดังแสดงในภาพที่ 4.31 – 4.33



ภาพที่ 4.31 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ของสะพานที่ระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน



ภาพที่ 4.32 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง $L/2$ ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน



ภาพที่ 4.33 ตัวประกอบการกระจายที่ตำแหน่ง $2L/3$ ของสะพานที่ระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุก จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

จากภาพที่ 4.31 - 4.33 แสดงค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามทั้งหมด 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ตามลำดับ ซึ่งรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลาอยู่ในช่วงประมาณ 3.5 - 5.5 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 4,975 คัน ที่แต่ละตำแหน่งของสะพาน พบว่าที่ตำแหน่ง L/2 มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 0.93 จากรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลาเท่ากับ 5.34 เมตรและค่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละช่วงของระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างกว้างทั้ง 3 ตำแหน่ง ซึ่งส่งผลต่อการเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกตามระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุกทำได้ไม่ถนัด ดังนั้นจึงต้องพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระแทกตามช่วงของระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุก พบว่าที่ตำแหน่ง L/3 และ L/2 ค่าตัวประกอบการกระแทกไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ตัวประกอบการกระแทกมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 1.5 เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มเท่าตัว แต่ที่ตำแหน่ง 2L/3 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ตัวประกอบการกระแทกมีค่าลดลงถึงร้อยละ 32.6 เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มเท่าตัว

นอกจากนี้ยังทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพานดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพาน

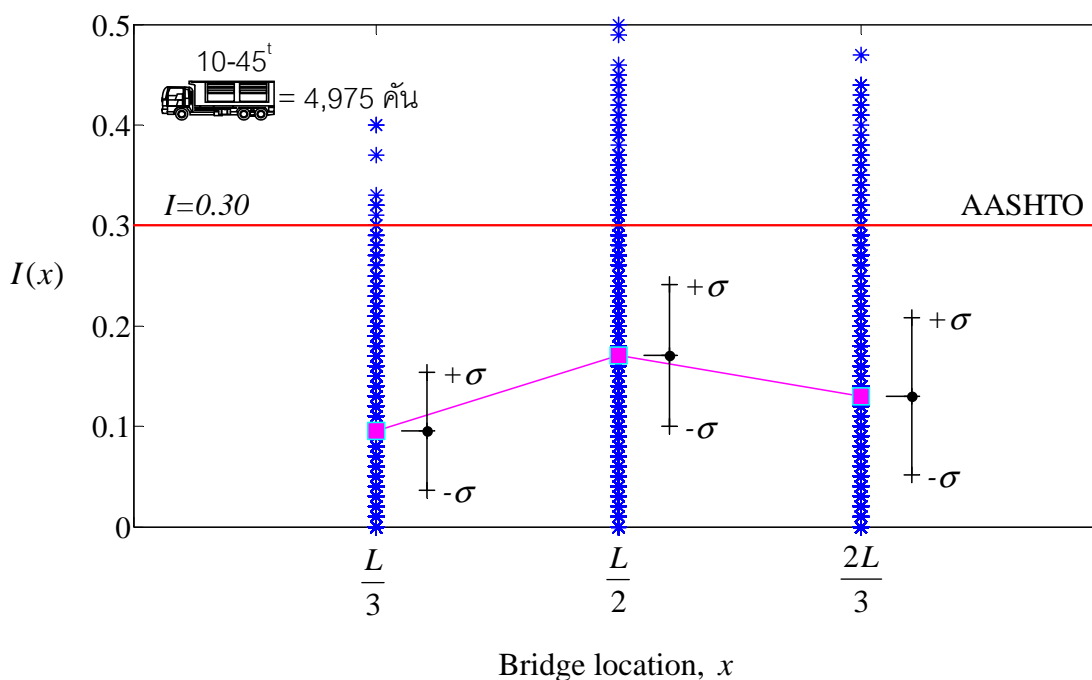
ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r		
	L/3	L/2	2L/3
X : ตัวประกอบการกระแทก กับ Y : ระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก (3.48 - 5.52 เมตร)	0.0154	0.0750	-0.1990

จากตารางที่ 4.7 พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 มีค่าเท่ากับ 0.0154, 0.0750 และ -0.1990 ตามลำดับ ซึ่งที่ตำแหน่ง L/3 และ L/2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นตัวประกอบการ

กระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $L/2$ ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก แต่ที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีค่าเป็นลบ ดังนั้นตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก โดยตัวประกอบการกระแทกจะแปรผกผันตามกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก กล่าวคือค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านไปบนสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น

4.2.2 ตัวประกอบการกระแทกจากโมเมนต์ดัดของสะพานที่ตำแหน่งต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามภายใต้การแล่นผ่านของรถบรรทุกจำนวน 4,975 คัน ซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 10-45 ตัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ทำการหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และด้านสถิติในรูปแบบของโมเมนต์ดัด ดังสมการที่ 3.4 หลังจากนั้นนำตัวประกอบการกระแทกนั้นมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.34 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

จากภาพที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่งของสะพาน คือ L/3, L/2 และ 2L/3 จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม พบว่า มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.47 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกระแทกกับค่าที่กำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ประเทศไทยนิยมใช้ในการออกแบบ โดยมีค่าเท่ากับ 0.30 สำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวไม่เกิน 10 เมตร พบว่าโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่า 0.30 (AASHTO, 2002) มีอยู่พอสมควร และค่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง L/2 เท่ากับ 0.50 ทุกร้อยละ ทั้ง 3 ตำแหน่งยังมีกรณีในตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่า 0.30 ซึ่งมีจำนวนกรณีในตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่า 0.30 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ คิดเป็นร้อยละ 0.2, 3.1 และ 2.0 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปริมาณการจราจรเฉลี่ย 5,000 คันต่อวันและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรร้อยละ 2 ต่อปี (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008) โดยพิจารณาอายุการใช้งานสะพาน 75 ปี จะเห็นว่าโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบอยู่พอสมควร โดยเฉพาะที่ตำแหน่งตั้งแต่กึ่งกลางสะพานเป็นต้นไป

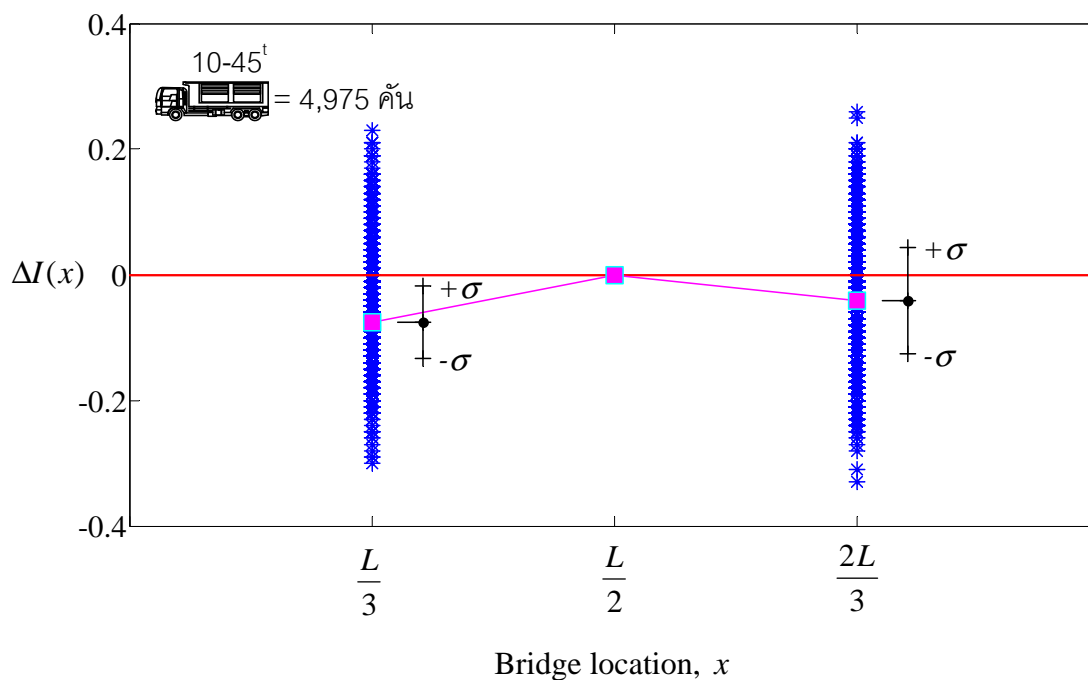
4.2.3 ผลเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

เพื่อศึกษาว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะมีค่ามากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้หรือไม่นั้น จะทำการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน อีกทั้งยังเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานด้วย สำหรับทุกกรณีของรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพาน จำนวน 4,975 คัน ซึ่งมีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วง 10-45 ตัน

1) ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

เพื่อศึกษาความเป็นได้ที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ภายใต้การแล่นผ่านสะพาน

ของรถบรรทุกคันเดียวกัน จากสมการที่ 4.2 หลังจากนั้นนำค่าผลต่างดังกล่าวมาเปรียบเทียบกัน ทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.35

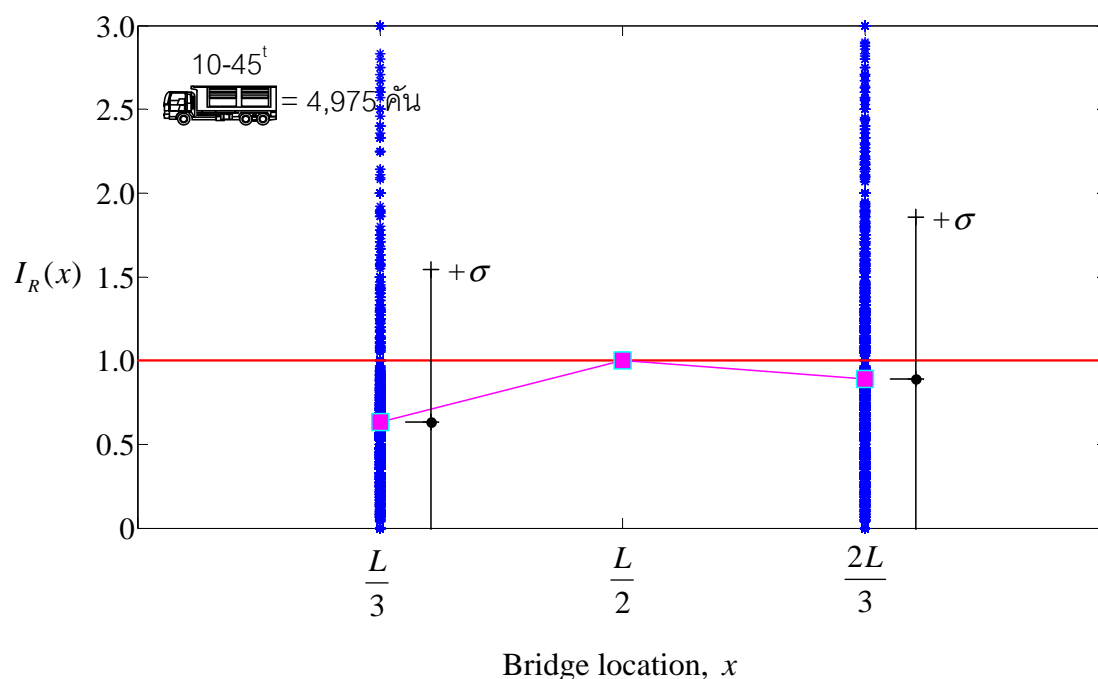


ภาพที่ 4.35 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

จากภาพที่ 4.35 แสดงผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน พบว่าการตรวจวัดที่ตำแหน่ง $L/3$ มีค่าผลต่างสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกเท่ากับ 0.23 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคิดเป็นร้อยละ 8.5 และที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีค่าผลต่างสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกเท่ากับ 0.26 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคิดเป็นร้อยละ 29.8 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า มีโอกาสที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสั่นพ้อง (Resonance) ของรถบรรทุกและสะพาน ทำให้เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมายังบริเวณปลายสะพาน จึงมีค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้น

2) อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพาน

นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ภายใต้การเคลื่อนผ่านสะพานของรถบรรทุกคันเดียวกัน เพื่อศึกษาความเป็นได้ที่ตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากสมการที่ 4.3 ทั้งนี้ได้จำกัดค่าอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากค่าตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมีค่าน้อยมากหรือมีค่าเป็นศูนย์ไว้ไม่เกิน 3.0 หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.36



ภาพที่ 4.36 อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

จากภาพที่ 4.36 แสดงอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน พบว่าผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง $L/3$ มีกรณีที่มีค่าตัวประกอบภาระกระทำมากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคิดเป็นจำนวนกรณีร้อยละ 7.5 และที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีกรณีที่มีค่าตัวประกอบภาระกระทำมากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคิดเป็นจำนวนกรณีร้อยละ 29.0 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า มีโอกาสที่ค่าตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งอื่น ๆ

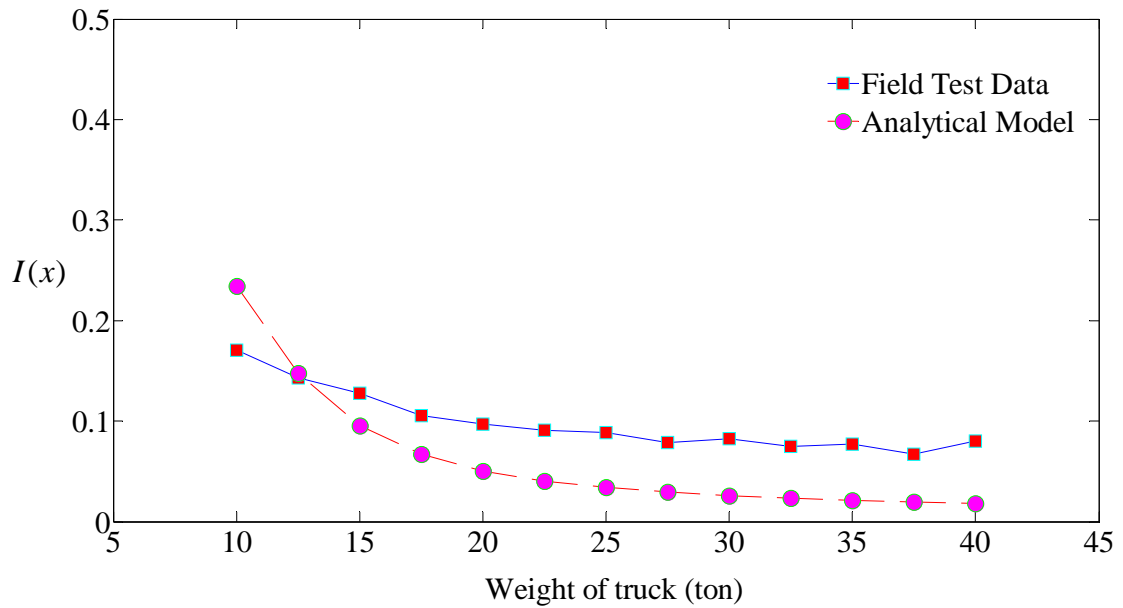
จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทำให้สะพานสั่นด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของรถบรรทุก จนเกิดการการสั่นพ้อง (Resonance) ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมายังบริเวณปลายสะพาน

4.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

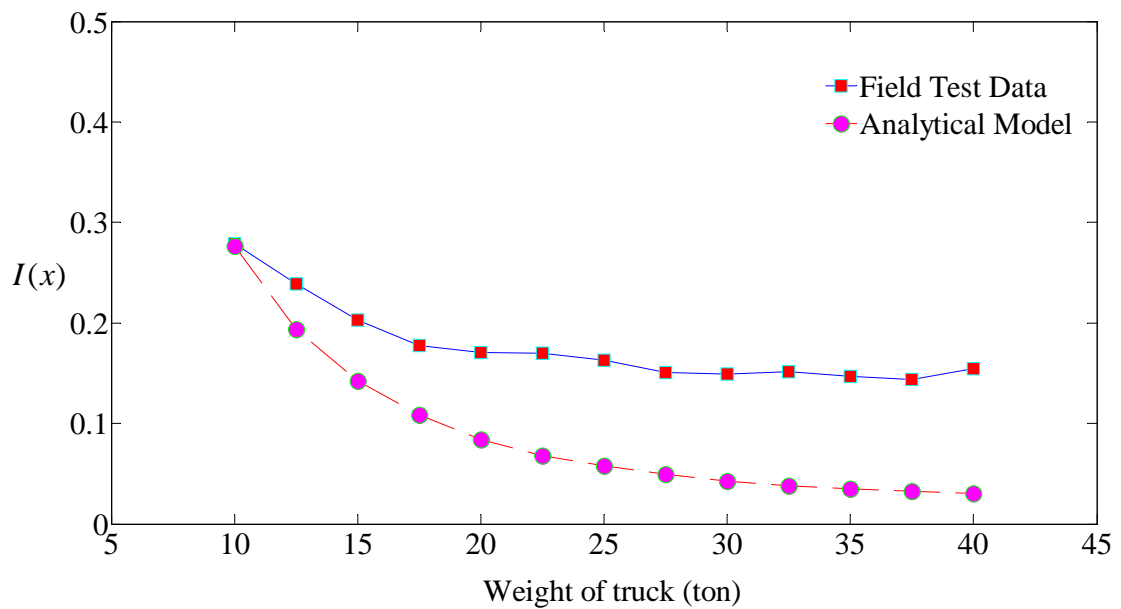
จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับตัวแปรต่าง ๆ เช่น น้ำหนักรวม ความเร็วและระยะห่างเพลของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่เนื่องจากไม่มีผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $2L/3$ เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด จึงทำการเฉลี่ยตามสัดส่วนของค่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $L/4$ และ $3L/8$ สำหรับค่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $L/3$ และทำการเฉลี่ยตามสัดส่วนของค่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $5L/8$ และ $3L/4$ สำหรับค่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $2L/3$ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับตัวแปรต่าง ๆ และศึกษาพฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระทำตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานจำนวน 4,593 คัน ซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 10-40 ตัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

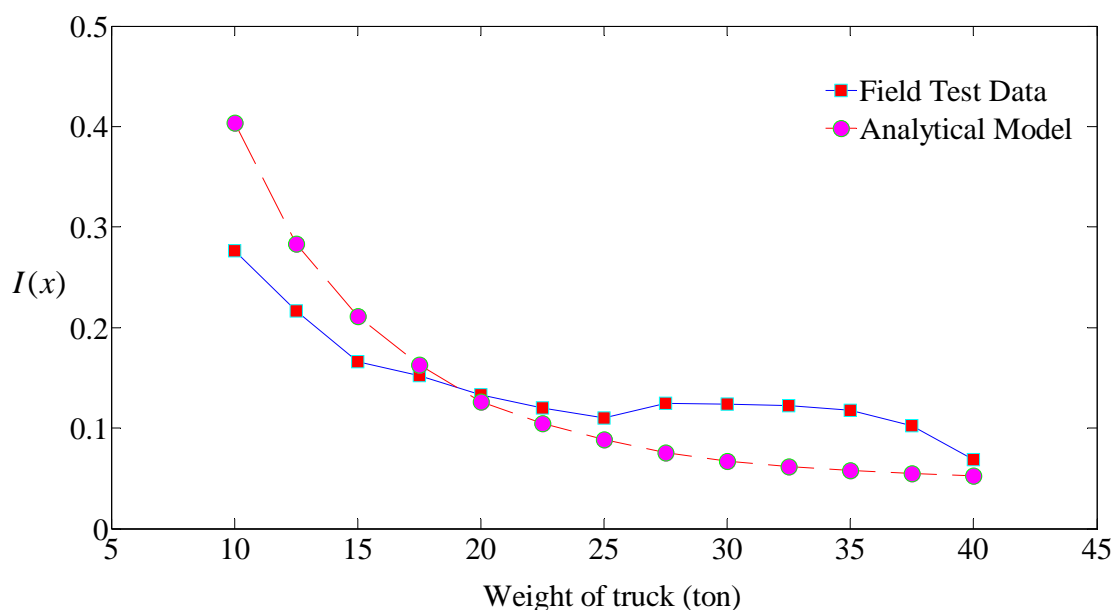
นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจากผลการศึกษาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.37 – 4.39



ภาพที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 ตามน้ำหนักรวมต่างๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม



ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/2 ตามน้ำหนักรวมต่างๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม



ภาพที่ 4.39 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 ตามน้ำหนักรวมต่างๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

จากภาพที่ 4.37 - 4.39 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้งหมด 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ตามลำดับ ตามน้ำหนักรวมต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม ซึ่งจากการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นในช่วง 10 - 25 ตัน ซึ่งมีค่าลดลงเฉลี่ยถึงร้อยละ 50 - 60 เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าตัว ซึ่งมีอัตราการลดลงสูงกว่าการทดสอบภาคสนามถึงร้อยละ 30 แต่เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นจาก 25 - 40 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่งมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ จนเกือบค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าลดลงสูงสุดเพียง 0.04 เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 0.40 ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ผ่านสะพานของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวม 10 ตัน ทั้งนี้ทั้ง 3 ตำแหน่งมีค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกตามน้ำหนักรวมต่าง ๆ ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าการทดสอบภาคสนาม โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง L/2 มีค่าต่ำกว่าการทดสอบภาคสนามอยู่ค่อนข้างมาก ยกเว้นที่ตำแหน่ง 2L/3 ในช่วงน้ำหนักรวม 10 - 20 ตัน ที่มีค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกสูงกว่าการทดสอบภาคสนาม อย่างไรก็ตาม การทดสอบภาคสนามจะพบว่าที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงน้ำหนักบรรทุกทุก 10 - 25 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทก

จะเปลี่ยนแปลงเร็วมาก โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ และตัวประกอบการกระแทกมีค่าลดลงถึงร้อยละ 40.2 เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าตัว แต่เมื่อน้ำหนักของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นในช่วง 25 - 45 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกค่อนข้างคงที่ โดยตัวประกอบการกระแทกมีค่าลดลงสูงสุดเพียง 0.04 เท่านั้น ดังนั้น ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลการศึกษารทดสอบภาคสนาม

นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

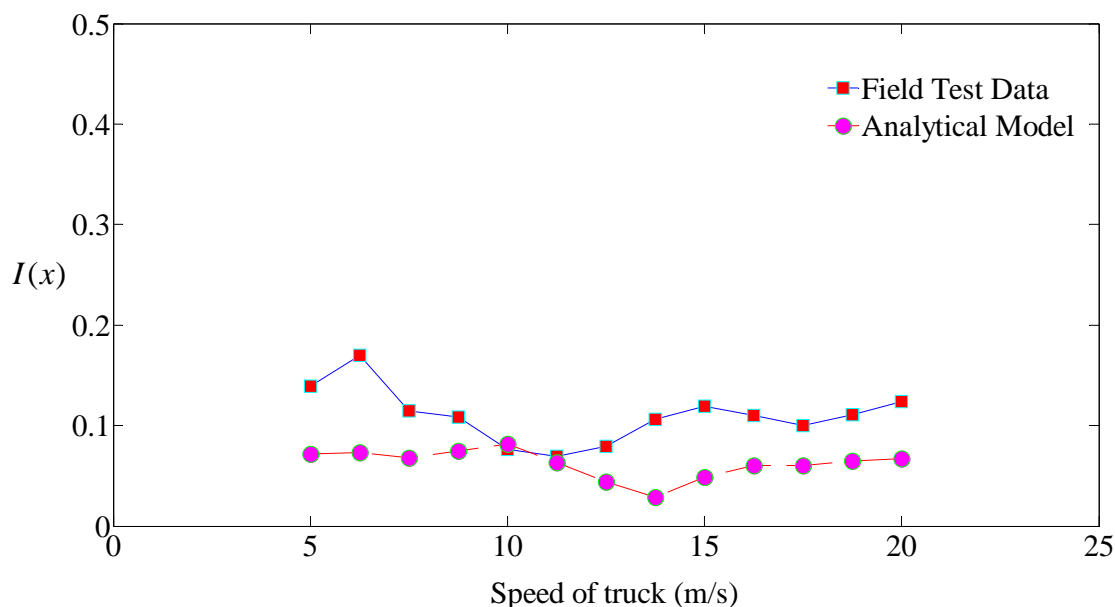
ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r	
		แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	การทดสอบภาคสนาม
X : ตัวประกอบการกระแทก	L/3	-0.4706	-0.2035
	L/2	-0.4989	-0.1877
Y : น้ำหนักรวมของรถบรรทุก	2L/3	-0.5341	-0.1966

จากตารางที่ 4.8 พบว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเป็นลบทั้งหมดและมีค่าใกล้เคียงกันมากเช่นเดียวกับการทดสอบภาคสนาม ดังนั้น ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ทุกตำแหน่งจะแปรผกผันกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม

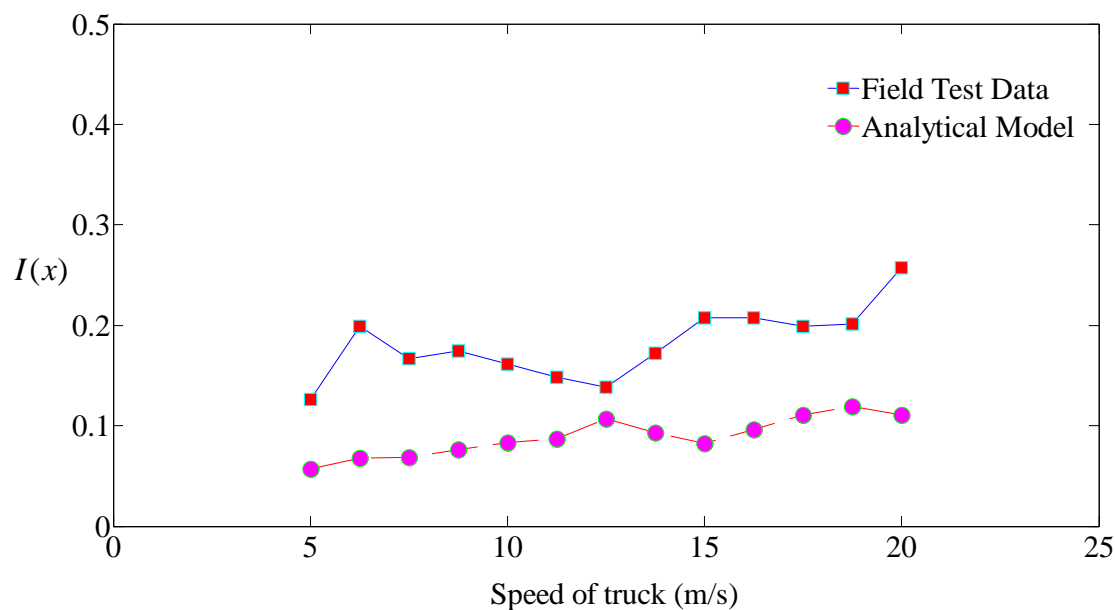
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุก

นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกจากผลการศึกษาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบ

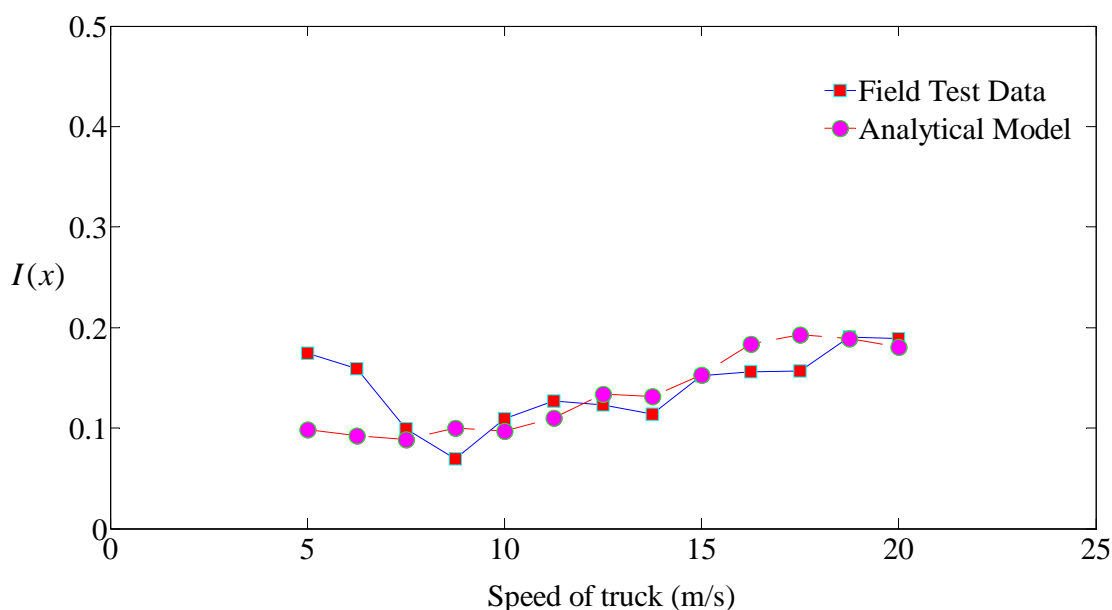
ภาคสนาม โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ตามความยาวสะพาน คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.40 – 4.42



ภาพที่ 4.40 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ ตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม



ภาพที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/2$ ตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม



ภาพที่ 4.42 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ ตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

จากภาพที่ 4.40 - 4.42 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามลำดับ ตามความเร็วต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าที่ตำแหน่ง $L/3$ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มไม่ชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่เมื่อความเร็วของรถบรรทุกสูงขึ้น ส่วนที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ มีแนวโน้มไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วของรถบรรทุกสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $L/2$ มีค่าน้อยกว่าการทดสอบภาคสนามอยู่ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $L/2$ ส่วนที่ตำแหน่ง $2L/3$ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบภาคสนาม อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม พบว่าที่ตำแหน่ง $L/3$ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มไม่ชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วรถเพิ่มขึ้น ขณะที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเร็วของรถบรรทุกสูงขึ้น

เนื่องจากการเปรียบเทียบผลการศึกษายังไม่ค่อยชัดเจนกันเท่าใดนัก จึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบภาคสนาม ดังแสดงในตารางที่ 4.9

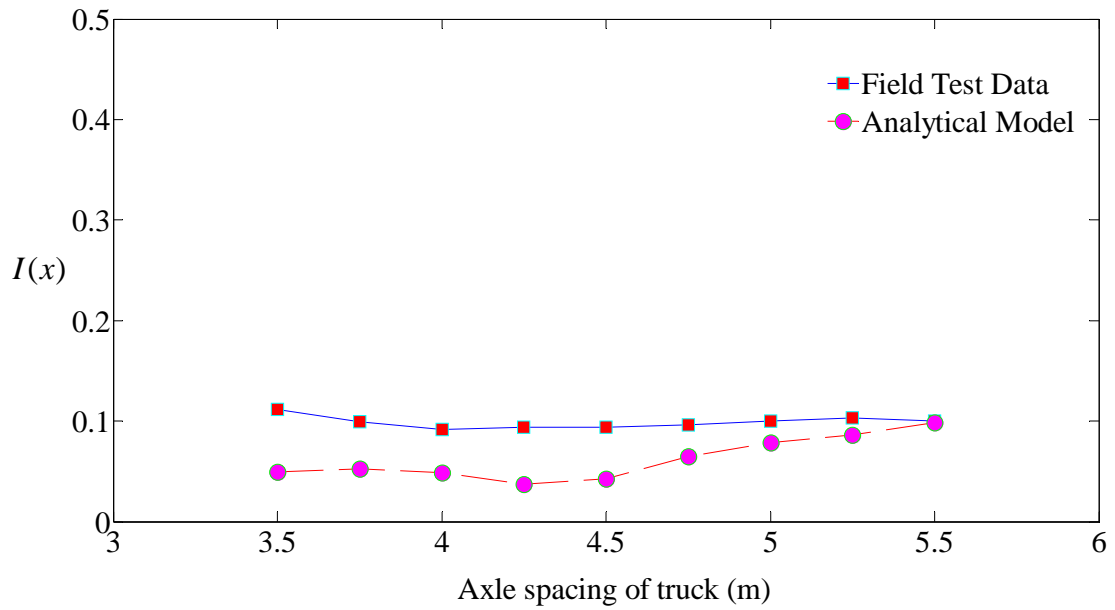
ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบภาคสนาม

ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r	
		แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	การทดสอบภาคสนาม
X : ตัวประกอบการกระทำ กับ	L/3	-0.0474	0.2078
	L/2	0.1347	0.2824
Y : ความเร็วของรถบรรทุก	2L/3	0.2203	0.2031

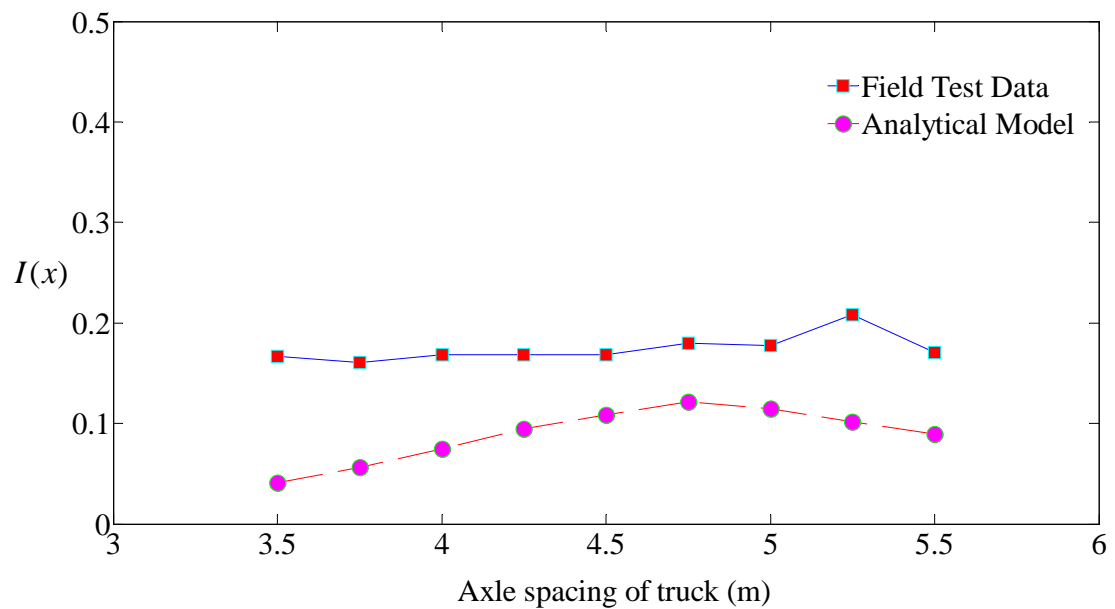
จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ของสะพาน พบว่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตำแหน่ง L/3 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งดังกล่าวจึงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วของรถบรรทุก แต่ที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 มีค่าเป็นบวก ดังนั้น ตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผันตามกับความเร็วของรถบรรทุก กล่าวคือ มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็วของรถบรรทุกทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่า ตัวประกอบการกระทำมีแนวโน้มยังไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านบริเวณปลายสะพาน ซึ่งแตกต่างกับการทดสอบภาคสนามที่มีค่าเป็นบวกทั้งหมด ซึ่งตัวประกอบการกระทำที่ทุกตำแหน่งจะแปรผันตามกับความเร็วของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระทำมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงขึ้น ดังนั้น ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเฉพาะที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 เท่านั้น

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก

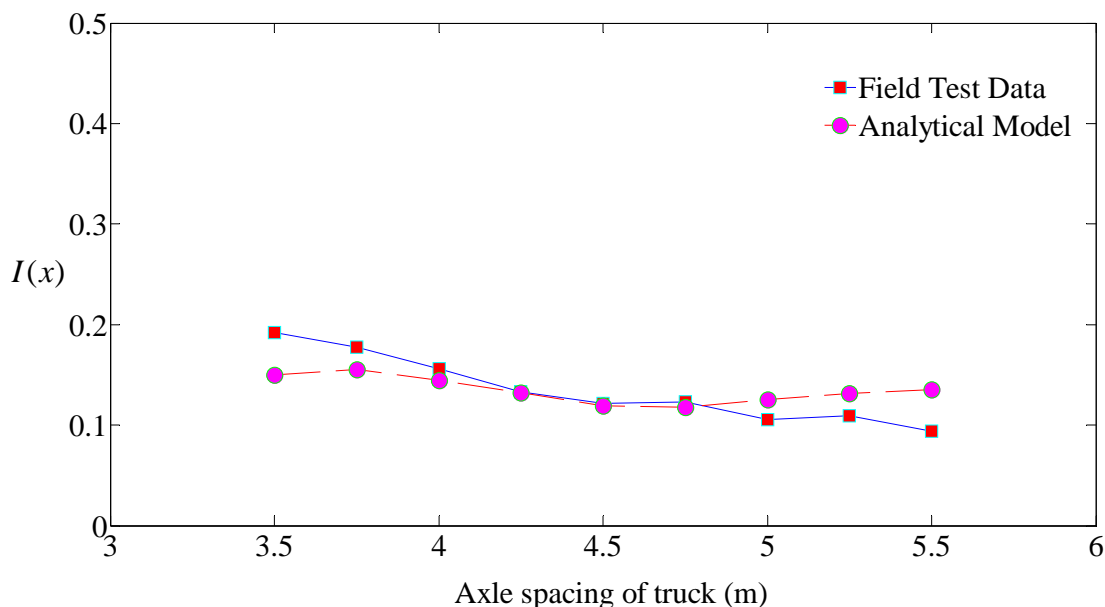
นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากผลการศึกษาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.43 – 4.45



ภาพที่ 4.43 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ ตามระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม



ภาพที่ 4.44 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/2$ ตามระยะห่างเพลลาต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม



ภาพที่ 4.45 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ ตามระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

จากภาพที่ 4.43 - 4.45 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งทั้งหมด 3 ตำแหน่งตามความยาวสะพาน คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามลำดับ ตามระยะห่างเพลาด่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $L/2$ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มไม่ชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างเพลาของรถบรรทุกมากขึ้น ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีแนวโน้มไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่เมื่อระยะห่างเพลาของรถบรรทุกมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $L/2$ มีค่าน้อยกว่าการทดสอบภาคสนามอยู่ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $L/2$ ส่วนที่ตำแหน่ง $2L/3$ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบภาคสนาม อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม พบว่า ที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $L/2$ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่เมื่อระยะห่างเพลาของรถบรรทุกมากขึ้น ขณะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างเพลาของรถบรรทุกมากขึ้น

เนื่องจากการเปรียบเทียบผลการศึกษายังไม่ค่อยชัดเจนกันเท่าใดนัก จึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลาของ

รถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบภาคสนาม ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบภาคสนาม

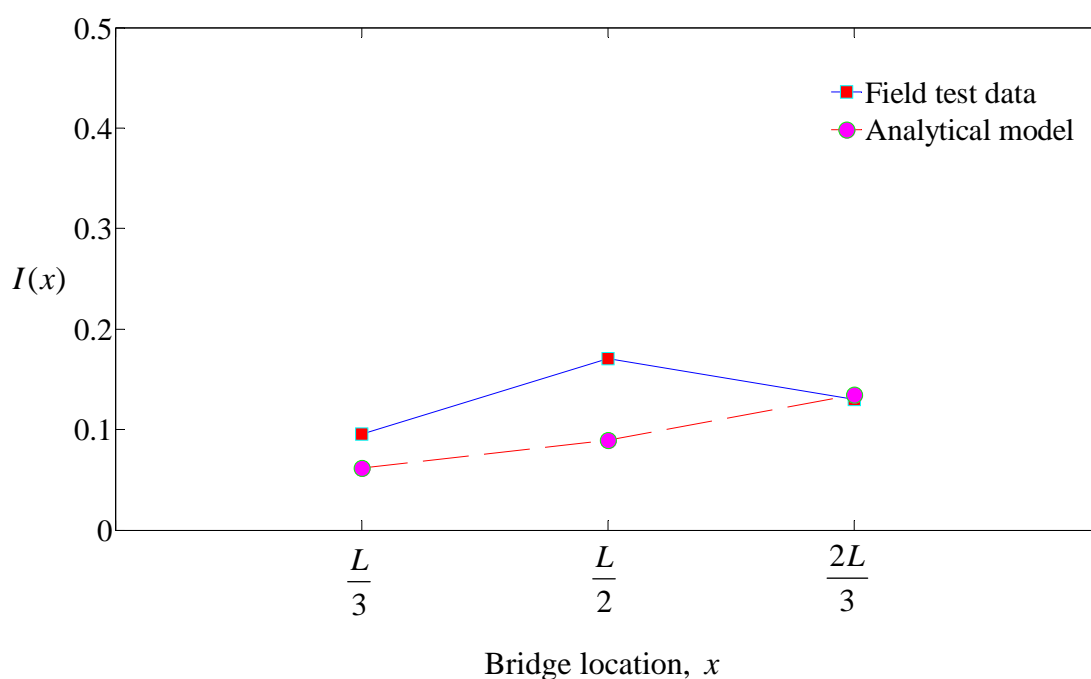
ตัวแปร	ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, r	
		แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	การทดสอบภาคสนาม
X : ตัวประกอบการกระทำกับ	L/3	0.1564	0.0154
	L/2	0.1512	0.0757
Y : ระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก	2L/3	-0.0473	-0.1988

จากตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ L/3, L/2 และ 2L/3 ของสะพาน พบว่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง L/3 และ L/2 มีค่าเป็นบวก ดังนั้น ตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผันตามกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระทำมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น แต่ที่ตำแหน่ง 2L/3 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งดังกล่าวจึงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่า ค่าตัวประกอบการกระทำมีแนวโน้มยังไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านบริเวณจุดเริ่มต้นของสะพาน ซึ่งแตกต่างกับผลการศึกษากการทดสอบภาคสนามที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นลบที่ตำแหน่ง 2L/3 เท่านั้น ซึ่งค่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผกผันกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระทำมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลลามากขึ้น ดังนั้น ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของ

รถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเท่าใดนัก

4.3.4 พฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ

เพื่อศึกษาพฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ของสะพาน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำการหาค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ หลังจากนั้นนำตัวประกอบการกระแทกนั้นมาเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.46



ภาพที่ 4.46 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

จากภาพที่ 4.46 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่งของสะพาน คือ $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม พบว่า ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสจะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ โดยเฉพาะที่ตำแหน่งปลายสะพาน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทำให้สะพานสั่นด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่

รถบรรทุกจนเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ขนาดของการสั่นของสะพานและรถบรรทุกจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมายังบริเวณปลายสะพาน จึงพบการสั่นที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม

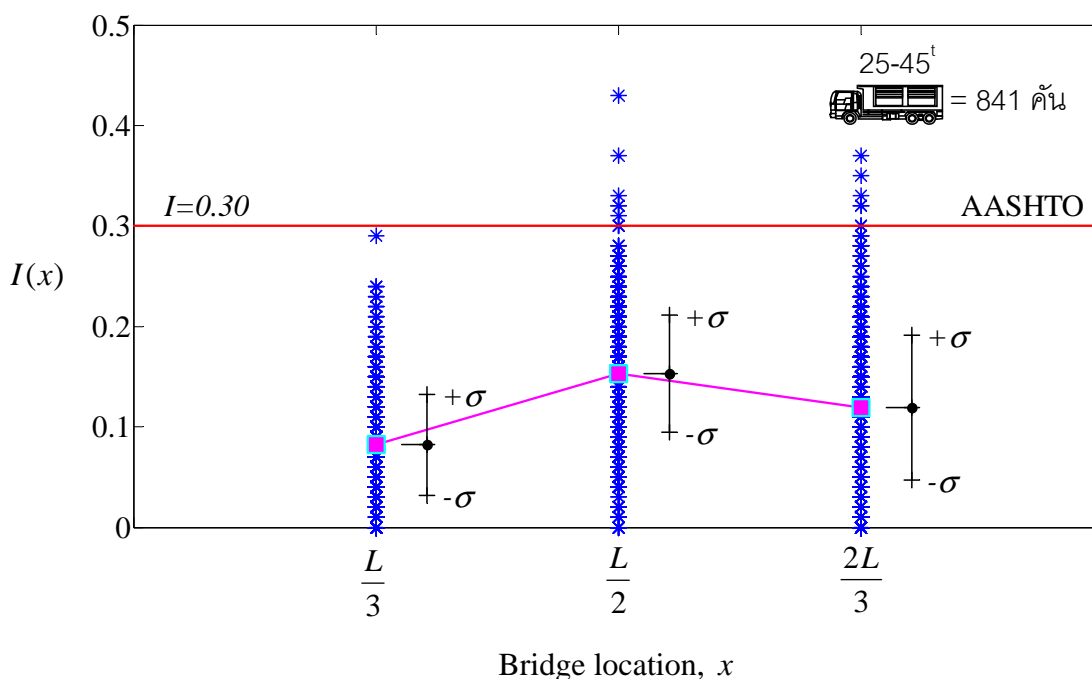
จากหัวข้อ 4.3.1 – 4.3.3 พบว่า ผลการศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม ขณะที่ผลการศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเฉพาะที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ แต่ผลการศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเท่าใดนัก อีกทั้งยังมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบการกระทำน้อยกว่าการทดสอบภาคสนาม และค่าตัวประกอบการกระทำที่ได้ส่วนใหญ่ยังมีค่าต่ำกว่าด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีเงื่อนไขและตัวแปรอื่น ๆ ที่อาจมีความแตกต่างหรือไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร

4.4 ผลเปรียบเทียบระหว่างตัวประกอบการกระทำจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามกับค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO

ตามข้อกำหนดและน้ำหนักตามกฎหมายสำหรับรถบรรทุกในประเทศไทย น้ำหนักของรถบรรทุกสิบล้อถูกควบคุมโดยกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ซึ่งมีข้อกำหนดว่าอนุญาตให้มีน้ำหนักเพลลาคู่หลังได้ไม่เกิน 20 ตัน และน้ำหนักรวมจะต้องไม่เกิน 25 ตัน อย่างไรก็ตามพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นคือ มีการตรวจพบว่ารถบรรทุกสิบล้อในประเทศไทยส่วนใหญ่มักจะมีน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด จึงอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของสะพาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเกิดการกระทำที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ

เนื่องจากการศึกษาก่อนหน้า พิจารณาจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 10 ตันขึ้นไป ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งมีแนวโน้มที่ให้ค่าตัวประกอบการกระทำที่สูงกว่าค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ประเทศไทยนิยมใช้ในการออกแบบสำหรับสะพาน และเมื่อนำค่าตัวประกอบการกระทำดังกล่าวไปพิจารณากับค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติที่มีค่าไม่สูงมาก อันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกที่ค่อนข้างน้อย จึงไม่น่าส่งผลกระทบต่อ

ต่อความปลอดภัยของสะพาน การพิจารณาจึงควรศึกษาเฉพาะจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25 ตันขึ้นไป ซึ่งในประเทศไทยถือว่าเป็นรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด โดยพิจารณาจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน ซึ่งมีรถบรรทุกจำนวนทั้งสิ้น 841 คัน และมีค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.47



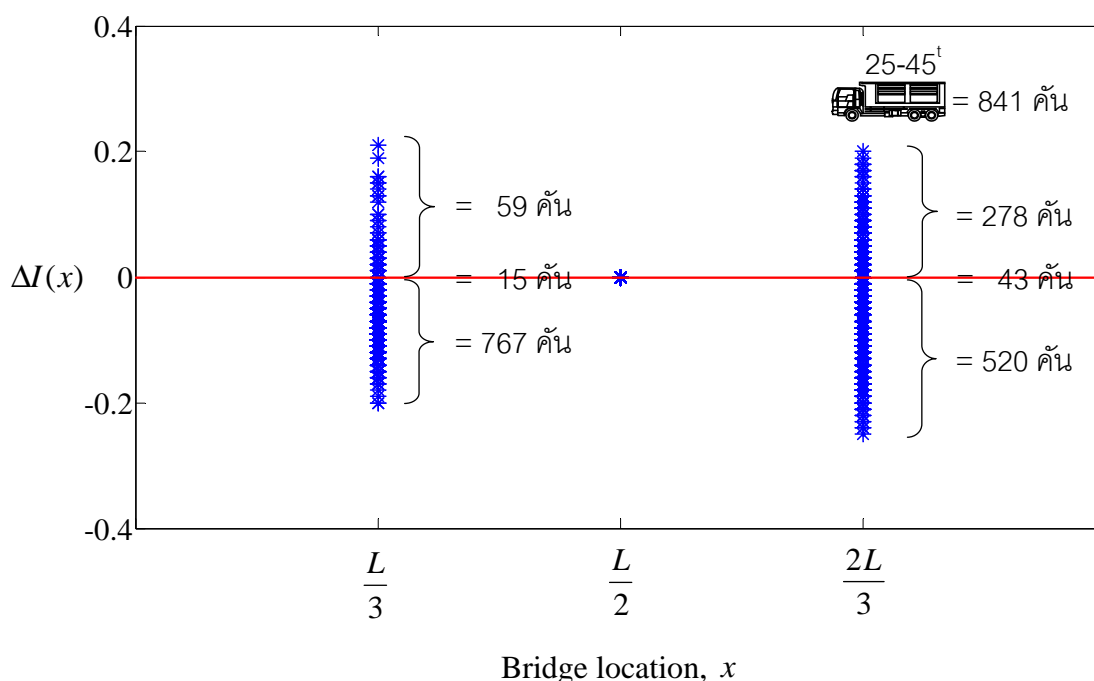
ภาพที่ 4.47 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 คัน

จากภาพที่ 4.47 แสดงตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน ซึ่งมีรถบรรทุกจำนวนทั้งสิ้น 841 คัน เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้ว พบว่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงและโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกจะมีค่ามากกว่า 0.30 มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 10 ตันขึ้นไป โดยมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดที่ตำแหน่ง $L/2$ เท่ากับ 0.43 แต่อย่างไรก็ดี ยังมีกรณีที่ตัวประกอบการกระแทกมากกว่า 0.30 คือ ที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ ทั้งนี้ผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง $L/3$ พบมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.29 ที่ตำแหน่ง $L/2$ มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.43 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 0.30 คิดเป็นร้อยละ 0.7 และที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.37 และมีจำนวนข้อมูลที่มี

ค่ามากกว่า 0.30 คิดเป็นร้อยละ 0.6 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จะเห็นได้ว่าทั้งที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ มีกรณีที่ตัวประกอบการกระแทกมากกว่าค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน ซึ่งหากพิจารณาถึงปริมาณรถบรรทุกที่แล่นผ่านสะพานเฉลี่ยประมาณ 5,000 คันต่อวัน (1,825,000 คันต่อปี) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรร้อยละ 2 ต่อปี (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008) ประกอบกับความต้องการให้สะพานมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 75 ปี พบว่าจะมีรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกิน 25 ตัน ตามพิกัดของกฎหมายและมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 4,000 คันต่อปีและคาดว่าจะมีจำนวนมากขึ้นในแต่ละปี

4.5 ความเป็นได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

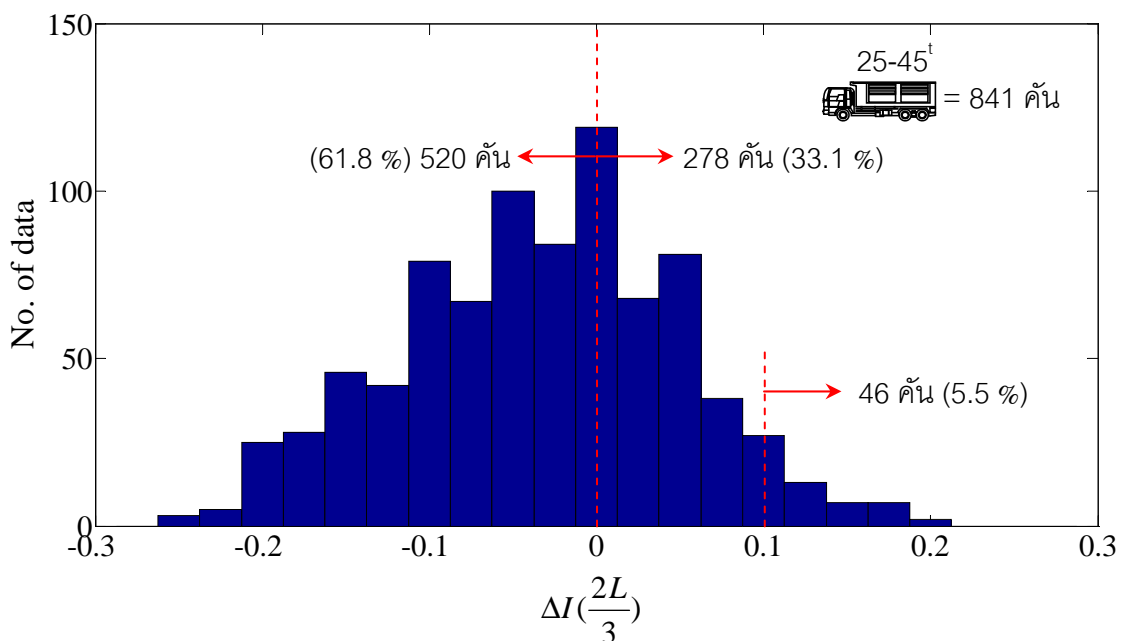
นอกจากนี้ ยังทำการศึกษาความเป็นได้ที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานของรถบรรทุกคันเดียวกัน จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25 ตันขึ้นไป ตามสมการที่ 4.2 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.48



ภาพที่ 4.48 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x ใด ๆ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 ชุดข้อมูล

จากภาพที่ 4.48 แสดงผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน พบว่า การตรวจวัดที่ตำแหน่ง $L/3$ มีค่าผลต่างสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกเท่ากับ 0.21 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่าที่ตำแหน่ง $L/2$ คิดเป็นร้อยละ 7.0 ส่วนที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีค่าผลต่างสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกเท่ากับ 0.20 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่าที่ตำแหน่ง $L/2$ คิดเป็นร้อยละ 33.1 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า มีโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ไม่น้อย โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทำให้สะพานสั่นด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของรถบรรทุกจนเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมายังบริเวณปลายสะพาน

เนื่องจากมีโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ จึงได้ทำการพิจารณาความเป็นไปได้ที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยทำการจำแนกจำนวนข้อมูลตามค่าผลต่างระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.49



ภาพที่ 4.49 กราฟแท่งแสดงการกระจายตัวของจำนวนข้อมูลตามค่าผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $2L/3$ กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 คัน

จากภาพที่ 4.49 แสดงการกระจายตัวของจำนวนข้อมูลตามค่าผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจากข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25-45 ตัน จำนวน 841 ชุดข้อมูล พบว่ามีจำนวนกรณีที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 น้อยกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเท่ากับ 520 คัน คิดเป็นจำนวนกรณีร้อยละ 61.8 และมีจำนวนกรณีที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง 2L/3 สูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเท่ากับ 278 คัน คิดเป็นจำนวนกรณีร้อยละ 33.1 ทั้งนี้ พบว่ามีกรณีซึ่งค่าตัวประกอบการกระแทกที่ 2L/3 สูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานไม่น้อยกว่า 0.10 คิดเป็นจำนวนกรณีร้อยละ 5.5 ซึ่งถือว่ามีความสำคัญ หากพิจารณาถึงจำนวนรถและอายุการใช้งานสะพาน ดังนั้น ความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ อาจมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จึงมีค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่ง 2L/3 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะผลจากสภาพรอยต่อสะพานและการสั่นพ้องระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิเคราะห์ตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลจากการทดสอบสะพานตัวอย่างแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นสะพานคอนกรีตที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปและมีช่วงความยาว 9.43 เมตร ภายใต้การจราจรปกติเป็นระยะเวลาราว 3 เดือน ซึ่งทดสอบโดยภาคผู้ฟุ้งซุย และธีระชัย ดีสมสุข ในการทดสอบได้ทำการบันทึกข้อมูลผลตอบสนองด้านความเครียดของสะพานที่ตำแหน่ง $L/3$, $L/2$ และ $2L/3$ ตามความยาวของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกประเภทรถสิบล้อ จำนวน 4,975 คัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวที่บันทึกได้จากการทดสอบภาคสนามสามารถนำมาประมาณค่าตัวประกอบการกระแทกต่าง ๆ ได้จากความสัมพันธ์ของผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และทางด้านสถิติในรูปของโมเมนต์ดัด ค่าตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการกระแทก ทั้งยังนำไปเปรียบเทียบกับแนวโน้มพฤติกรรมของตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากผลการศึกษาในอดีตด้วย (ปานนท์ ลาชาโรจน์, 2010) นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการทดสอบภาคสนามกับค่าที่กำหนดตามเกณฑ์ในการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO และศึกษาความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน อันเนื่องมาจากสมมติฐานว่าค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุด อาจมิได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ซึ่งจากผลการศึกษาทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ เช่น น้ำหนักรวม ความเร็วและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม พบว่า

1) ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ทุกตำแหน่งจะแปรผกผันกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโดยละเอียดตามช่วงน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจะพบว่าที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ รถบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมอยู่ในช่วงน้ำหนักรถบรรทุก 10 – 25 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกเปลี่ยนแปลงเร็วมาก โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ค่าตัว

ประกอบการกระแทกมีค่าลดลงถึงร้อยละ 49.3 เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าตัว แต่เมื่อน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 45 ตัน ค่าตัวประกอบการกระแทกค่อนข้างคงที่ โดยค่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าลดลงเพียงร้อยละ 6.9 เท่านั้น

2) ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ทุกตำแหน่งจะแปรผันตามกับความเร็วของรถบรรทุก โดยค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีความเร็วสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโดยละเอียดตามช่วงความเร็วของรถบรรทุกจะพบว่าที่ตำแหน่ง L/3 และ L/2 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มไม่ชัดเจนเท่าใดนัก แต่ก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วรถเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่ตำแหน่ง 2L/3 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะความเร็วของรถบรรทุกที่อยู่ในช่วง 8.75 – 20 เมตรต่อวินาที (31.5 – 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ค่าตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงขึ้นถึงร้อยละ 74.9 เมื่อความเร็วของรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่าตัว

3) ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง L/3 และ L/2 ค่าตัวประกอบการกระแทกไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงร้อยละ 1.5 เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มเท่าตัว แต่ที่ตำแหน่ง 2L/3 ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงถึงร้อยละ 32.6 เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเพิ่มเท่าตัว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโหมดการสั่นของรถบรรทุกและสะพานเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้โมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์มีค่าลดลง เมื่อระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกมีค่าห่างกันมากขึ้น ค่าตัวประกอบการกระแทกจึงมีแนวโน้มลดลง

5.1.2 พฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากผลการศึกษาพฤติกรรมภาพรวมของตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่า

1) ที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 ของสะพานมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.47 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ

2) ที่ตำแหน่ง L/3, L/2 และ 2L/3 ของสะพานยังมีกรณีในตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งคิดเป็นจำนวนข้อมูลร้อยละ 0.2, 3.1 และ 2.0 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปริมาณการจราจรเฉลี่ย 5,000 คันต่อวันและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรร้อยละ 2 ต่อปี (ธีระชัย ดีสมสุข, 2008) โดยพิจารณาอายุการใช้งาน

สะพาน 75 ปี จะเห็นว่าโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบอยู่พอสมควร โดยเฉพาะที่ตำแหน่งตั้งแต่กึ่งกลางสะพานเป็นต้นไป

3) จากการตรวจวัดที่ตำแหน่ง $L/3$ มีค่าผลต่างสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกเทียบกับค่าที่กึ่งกลางสะพานเท่ากับ 0.23 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคิดเป็นร้อยละ 8.5 และที่ตำแหน่ง $2L/3$ มีค่าผลต่างสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกเท่ากับ 0.26 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกมากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคิดเป็นร้อยละ 29.8 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า มีโอกาสที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสั่นพ้อง (Resonance) ระหว่างรถบรรทุกและสะพาน ทำให้เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมาอยู่บริเวณปลายสะพาน จึงมีค่าโมเมนต์ดัดเชิงพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่าง ๆ เช่น น้ำหนักรวมและความเร็วของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม พบว่า

1) ค่าตัวประกอบการกระแทกมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก โดยตัวประกอบการกระแทกที่ทุกตำแหน่งจะแปรผกผันกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุก กล่าวคือค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีน้ำหนักรวมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม

2) จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกทั้ง 3 ตำแหน่ง พบว่า ตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มยังไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านบริเวณปลายสะพาน ซึ่งแตกต่างกับการทดสอบภาคสนามที่มีค่าเป็นบวกทั้งหมด ซึ่งตัวประกอบการกระแทกที่ทุกตำแหน่งจะแปรผันตามกับความเร็วของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกมีความเร็วสูงขึ้น ดังนั้น ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเฉพาะที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ เท่านั้น

3) จากผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มไม่ค่อยชัดเจนเท่าใดนัก เพิ่มขึ้นเมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลามากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านบริเวณจุดเริ่มต้นของสะพาน ซึ่งแตกต่างกับผลการศึกษาการทดสอบภาคสนามที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นลบที่ตำแหน่ง $2L/3$ เท่านั้น ซึ่งค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแปรผกผันกับระยะห่างเพลาของรถบรรทุก กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานมีระยะห่างเพลามากขึ้น ดังนั้น ผลการศึกษาค่าสัมพันธระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเท่าใดนัก

4) ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสจะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ โดยเฉพาะที่ตำแหน่งหลังกึ่งกลางสะพาน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทำให้สะพานสั่นด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่รถบรรทุกจนเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ขนาดของการสั่นของสะพานและรถบรรทุกจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนมายังบริเวณปลายสะพาน จึงพบการสั่นที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม

จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบภาคสนาม พบว่า ผลการศึกษานำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนาม ขณะที่ผลการศึกษาแนวโน้มนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเฉพาะที่ตำแหน่ง $L/2$ และ $2L/3$ แต่ผลการศึกษาแนวโน้มนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับระยะห่างเพลาของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ค่อยสอดคล้องกับผลการศึกษาจากการทดสอบภาคสนามเท่าใดนัก อีกทั้งยังมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบการกระแทกน้อยกว่าการทดสอบภาคสนามและค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้ส่วนใหญ่ยังมีค่าต่ำกว่าด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีเงื่อนไขและตัวแปรอื่น ๆ ที่อาจมีความแตกต่างหรือไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร

5.1.4 ผลเปรียบเทียบระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามกับค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกระแทกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามกับค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO โดยพิจารณาเฉพาะข้อมูลรถบรรทุกที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 25 ตันขึ้นไป ซึ่งในประเทศไทยถือว่าเป็นรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดและอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของสะพาน ซึ่งมีรถบรรทุกจำนวนทั้งสิ้น 841 คัน พบว่ายังมีกรณีในตัวประกอบการกระแทกมากกว่า 0.30 คือ ที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 ทั้งนี้ ผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง L/3 พบมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.29 และไม่มีจำนวนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 0.30 ที่ตำแหน่ง L/2 มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.43 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 0.30 คิดเป็นร้อยละ 0.7 และที่ตำแหน่ง 2L/3 มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดเท่ากับ 0.37 และมีจำนวนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 0.30 เป็นร้อยละ 0.6 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จะเห็นได้ว่า ทั้งที่ตำแหน่ง L/2 และ 2L/3 มีกรณีในตัวประกอบการกระแทกมากกว่าค่าที่กำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน ซึ่งหากพิจารณาถึงปริมาณรถบรรทุกที่แล่นผ่านสะพานเฉลี่ยประมาณ 5,000 คันต่อวัน (1,825,000 คันต่อปี) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรร้อยละ 2 ต่อปี (ธีระชัย ดิสมสุข, 2008) อีกทั้งความต้องการให้สะพานมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 75 ปี พบว่าจะมีรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกิน 25 ตัน ตามพิกัดของกฎหมายและมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 4,000 คันต่อปีและคาดว่าจะมีจำนวนมากขึ้นในแต่ละปี ดังนั้นสะพานอาจจะมีความปลอดภัยไม่เพียงพอและอายุการใช้งานอาจจะไม่ยาวนานเท่าที่ควร

5.1.5 ความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตรวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องมักพิจารณาตัวประกอบการกระแทกของสะพานเป็นค่าคงที่ตลอดความยาวสะพานเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน โดยคำนึงเฉพาะตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ด้วยอาจมีสมมติฐานว่าตำแหน่งดังกล่าวมีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุด ซึ่งอาจไม่ถูกต้องและนำไปสู่การวิเคราะห์หรือออกแบบสะพานที่ไม่สอดคล้องความเป็นจริงและไม่ปลอดภัย ดังนั้นจึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้จากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ มีโอกาสที่

จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ โดยที่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/3$ และ $2L/3$ มีบางกรณีที่สูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2L/3$ ที่มีค่าตัวประกอบการกระแทกสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานไม่น้อยกว่า 0.10 คิดเป็นจำนวนข้อมูลร้อยละ 5.5 ซึ่งถือว่าเป็นอัตราที่มีนัยสำคัญยิ่ง ดังนั้นความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจึงมีค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่ง $2L/3$ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลจากสภาพรอยต่อสะพานและการสั่นพ้องระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ดังนั้นในการวิเคราะห์หอคอกแบบสะพานจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ ประกอบด้วย เพื่อให้การวิเคราะห์หอคอกแบบสะพานมีความถูกต้องและปลอดภัยยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การคำนวณหอคอกแบบสะพานจำเป็นต้องพิจารณาผลตอบสนองที่ตำแหน่งต่าง ๆ อย่างรอบคอบ เนื่องจากค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่น ๆ อาจมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้

2) ควรมีการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีเงื่อนไขและตัวแปรต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการสถานการณ์จริงมากยิ่งขึ้น เพื่อให้การวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

3) การคำนวณหอคอกแบบสะพานของประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO โดยใช้หน้าหนักบรรทุกออกแบบของรถบรรทุกประเภท HS20-40 ซึ่งแตกต่างจากประเภทของรถบรรทุกโดยส่วนใหญ่ของประเทศไทย จึงอาจไม่ถูกต้องและปลอดภัยเท่าที่ควร ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมและกำหนดค่าตัวประกอบการกระแทกที่เหมาะสมกับการออกแบบในประเทศไทยโดยผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เพื่อให้การวิเคราะห์หอคอกแบบสะพานมีความถูกต้องและปลอดภัยยิ่งขึ้น

4) งานวิจัยนี้ยังมีขอบเขตจำกัดในแง่ของจำนวน ความยาวและรูปแบบของสะพาน จำนวนและตำแหน่งการตรวจวัดค่าของสะพาน ซึ่งควรมีการศึกษาโดยการขยายขอบเขตและพิจารณาตัวแปรที่มีแนวโน้มส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต เพื่อความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

5) ควรมีการศึกษาและทดสอบสะพานที่มีระบบโครงสร้างลักษณะอื่น ๆ เช่น ระบบพื้น – คาน ระบบ Box – girder เป็นต้น อีกทั้งควรมีการศึกษาค้นคว้าผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ผ่านสะพานของรถบรรทุกประเภทอื่น ๆ เช่น รถบรรทุกหนัก และรถบรรทุกกึ่งพ่วง เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ธีระชัย ดีสมสุข. การหาน้ำหนักขณะเคลื่อนที่จากโมเมนต์ดัดของสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา
ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2008.
- ภาณุ ฟุ้งสุข. การหาน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบภาคสนาม.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2004.
- ปานนท์ ลาชโรจน์. ตัวประกอบการกระจายน้ำหนักตามตำแหน่งต่างๆ บนคานสะพาน. วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2011.

ภาษาอังกฤษ

- American Associate of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Standard
Specifications for Highway Bridge, Washington D.C., USA, 2002.
- Ashebo, D.B. Evaluation of dynamic loads for highway bridges. Doctoral dissertation,
Department of Civil and Structural Engineering, The Hongkong Polytechnic
University, 2006.
- Ashebo, D.B., Chan, H.T., and Yu, L. Evaluation of dynamic loads on a skew box girder
continuous bridge. Engineering Structures, 29(2007) : 1052-1073.
- Brady, S.P., O'Brien, E.J., and Znidaric, A. Effect of vehicle velocity on the dynamic
amplification of a vehicle crossing a simply supported bridge. Journal of Bridge
Engineering, 11(2)(2006) : 241-249.
- Chan, T.H.T., and O'Conner, C. Wheel loads from highway bridge strains field studies.
Journal of Structural Engineering, 116(7)(1989) : 1751-1771.
- Chang, D., and Lee, H. Impact factors for simple-span highway girder bridges. Journal
of Structural Engineering, 120(3)(1994) : 704-715.

- Chopra, A. K. Dynamics of Structures. New Jersey : Prentice-Hall, 1995.
- Da Silva, J.G.S. Dynamical performance of highway bridge decks with irregular pavement surface. Computers & Structures, 82(2004) : 871-881.
- Daniel, J. I. Engineering Vibration. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- Deng, L., and Cai, C.S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridge. Engineering Structures, 32(2010) : 21-31.
- Gary, C. H., and Wong, K. Structural Dynamics for Structural Engineers. New York: John Wiley&Sons, 1999.
- Gonzalez, A., O'Brien, E.J., Li, Y.Y., and Cashell, K. The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. Vehicle system dynamics, 46(2000) : 483-499.
- ISO 8608. Road Roughness Profiles, Mechanical Vibration, 1995.
- Kim, S. Bridge evaluation based on field measurements. Doctoral dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, 1997.
- Kim, S., and Nowak, S. Load distribution and impact factors for I-girder bridges. Journal of Bridge Engineering, 2(3)(1997) : 97-104.
- Kwasniewski, L., and et al. Experimental evaluation of dynamic effects for a selected highway bridge. Journal of Performance of Constructed Facilities, 20(3)(2006) : 253-260.
- Law, S.S., and Zhu, X.Q. Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle. Journal of Sound and Vibration, 282(2005) : 805-830.
- Li, H. Dynamic response of highway bridges subjected to heavy vehicles. Doctoral dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Famu-Fsu College of Engineering, The Florida State University, 2005.
- Li, H., Wekezer, J., and Kwasniewski, L. Dynamic response of a highway bridge subjected to moving vehicles. Journal of Bridge Engineering, 13(5)(2008) : 439-448.

- Liu, C., Huang, D., and Wang, T.L. Analytical dynamic impact study based on correlated road roughness. Computers & Structures, 80(2002) : 1639-1650.
- Moghim, H., and Ronagh, H.R. Impact factors for a composite steel bridge using non-linear dynamic simulation. International Journal of Impact Engineering, 35(2008) : 1228-1243.
- Pinkaew, T. Identification of vehicle axle loads from bridge responses using updated static component technique. Engineering Structures, 28(11)(2006) : 1599-1608.
- Pinkaew, T. and Asnachinda, P. Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicles from the bending moments of bridges. Engineering Structures, 29(9)(2007) : 2282-2293.
- Potisuk, T., and Higgins, C. Field testing and analysis of CRC deck girder bridges. Journal of Bridge Engineering, 12(1)(2007) : 53-63.
- Shi, X. Structural performance of approach slab and its effect on vehicle induced bridge dynamic response. Doctoral dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Agricultural and Mechanical College, The Louisiana State University, 2006.
- Shi, X., Cai, C.S., and Chen, S. Vehicle induced dynamic behavior of short-span slab bridges considering effect of approach slab condition. Journal of Bridge Engineering, 13(2008) : 83-92.
- Sukhavarsh, J., and Sanjay, G. Road Surface Roughness Generation by Power Spectral Density in Bridge Design. Structure Congress. ASCE, 2008.
- Yang, Y.B., Liao, S.S., and Lin, B.H. Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams. Journal of Structural Engineering, 121(11) (1995) : 1644-1650.
- Zhang, X., Sennah K., and Kennedy, J.B. Evaluation of impact factor for composite concrete-steel cellular straight bridges. Engineering Structures, 25(2003) : 313-321.

ภาคผนวก

ตารางที่ ผ.1 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตาม น้ำหนักรวมของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน

น้ำหนักรวม (ตัน)	จำนวน (คัน)	ค่า ขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน						
			L/8	L/4	3L/8	L/2	5L/8	3L/4	7L/8
10	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.09	0.11	0.19	0.28	0.30	0.30	0.26
		Max	0.38	0.46	0.69	0.91	0.96	1.15	1.02
12.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.06	0.07	0.12	0.19	0.21	0.22	0.19
		Max	0.33	0.47	0.56	0.67	0.77	0.79	0.74
15	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.05	0.04	0.08	0.14	0.16	0.17	0.14
		Max	0.27	0.28	0.39	0.55	0.61	0.55	0.55
17.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.03	0.06	0.11	0.12	0.13	0.11
		Max	0.21	0.18	0.31	0.48	0.49	0.39	0.41
20	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.02	0.04	0.08	0.09	0.10	0.09
		Max	0.16	0.15	0.26	0.42	0.41	0.31	0.32
22.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.02	0.03	0.07	0.08	0.09	0.08
		Max	0.12	0.12	0.22	0.37	0.36	0.28	0.28
25	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.01	0.03	0.06	0.06	0.08	0.08
		Max	0.10	0.12	0.20	0.33	0.31	0.27	0.26
27.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.01	0.02	0.05	0.05	0.07	0.07
		Max	0.09	0.11	0.16	0.29	0.28	0.27	0.26

ตารางที่ ผ.1 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามน้ำหนักรวมของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน (ต่อ)

น้ำหนักรวม (ตัน)	จำนวน (คัน)	ค่า ขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน						
			L/8	L/4	3L/8	L/2	5L/8	3L/4	7L/8
30	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07
		Max	0.09	0.09	0.14	0.26	0.25	0.28	0.26
32.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.01	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06
		Max	0.09	0.08	0.13	0.23	0.22	0.28	0.26
35	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06
		Max	0.09	0.08	0.12	0.21	0.20	0.29	0.25
37.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.06
		Max	0.08	0.08	0.12	0.19	0.18	0.29	0.25
40	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.06	0.06
		Max	0.08	0.07	0.11	0.18	0.17	0.29	0.25

ตารางที่ ผ.2 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามความเร็วของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน

ความเร็ว (เมตร/วินาที)	จำนวน (คัน)	ค่า ขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน						
			L/8	L/4	3L/8	L/2	5L/8	3L/4	7L/8
5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.04	0.04	0.06	0.07	0.08	0.06
		Max	0.38	0.47	0.44	0.36	0.62	0.64	0.64
6.25	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.03	0.06	0.07	0.07	0.08	0.06
		Max	0.31	0.35	0.43	0.43	0.62	0.63	0.44
7.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.01	0.03	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06
		Max	0.18	0.27	0.46	0.48	0.40	0.30	0.36
8.75	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.03	0.07	0.08	0.07	0.09	0.07
		Max	0.25	0.46	0.57	0.56	0.38	0.51	0.47
10	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.04	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07
		Max	0.34	0.46	0.69	0.65	0.56	0.53	0.54
11.25	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.03	0.05	0.09	0.08	0.09	0.08
		Max	0.36	0.42	0.65	0.59	0.62	0.40	0.32
12.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.02	0.04	0.11	0.10	0.09	0.09
		Max	0.27	0.30	0.54	0.53	0.71	0.56	0.39
13.75	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.01	0.03	0.09	0.09	0.11	0.10
		Max	0.25	0.22	0.33	0.55	0.82	0.75	0.64

ตารางที่ ผ.2 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามความเร็วของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน (ต่อ)

ความเร็ว (เมตร/วินาที)	จำนวน (คัน)	ค่า ขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน						
			L/8	L/4	3L/8	L/2	5L/8	3L/4	7L/8
15	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.01	0.06	0.08	0.11	0.12	0.11
		Max	0.21	0.17	0.38	0.61	0.84	0.88	0.73
16.25	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.02	0.07	0.10	0.15	0.11	0.13
		Max	0.24	0.25	0.49	0.81	0.91	0.96	0.81
17.5	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.02	0.06	0.11	0.14	0.15	0.15
		Max	0.20	0.37	0.61	0.89	0.95	1.05	0.95
18.75	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
		Mean	0.02	0.03	0.04	0.12	0.13	0.18	0.17
		Max	0.21	0.38	0.63	0.91	0.96	1.15	1.02
20	351	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
		Mean	0.02	0.05	0.03	0.11	0.12	0.18	0.19
		Max	0.21	0.37	0.58	0.82	0.87	1.15	1.01

ตารางที่ ผ.3 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คัน

ระยะห่างเพลลา (เมตร)	จำนวน (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน						
			L/8	L/4	3L/8	L/2	5L/8	3L/4	7L/8
3.5	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.03	0.04	0.04	0.12	0.10	0.10
		Max	0.24	0.37	0.43	0.48	0.85	0.70	0.59
3.75	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.02	0.04	0.06	0.12	0.10	0.11
		Max	0.26	0.46	0.34	0.59	0.95	0.73	0.67
4	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.02	0.04	0.07	0.11	0.09	0.12
		Max	0.31	0.36	0.44	0.69	0.96	0.73	0.78
4.25	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.02	0.03	0.09	0.10	0.09	0.13
		Max	0.36	0.30	0.50	0.79	0.92	0.75	0.95
4.5	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.02	0.03	0.11	0.09	0.10	0.13
		Max	0.33	0.33	0.54	0.86	0.85	0.88	1.01
4.75	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.02	0.04	0.04	0.12	0.08	0.11	0.11
		Max	0.38	0.36	0.60	0.89	0.77	0.96	1.02
5	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.04	0.06	0.11	0.08	0.13	0.09
		Max	0.33	0.40	0.67	0.91	0.70	1.05	1.01
5.25	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.03	0.03	0.08	0.10	0.09	0.14	0.08
		Max	0.29	0.43	0.69	0.82	0.75	1.15	0.97

ตารางที่ ผ.3 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 4,563 คั่น (ต่อ)

ระยะห่างเพลลา (เมตร)	จำนวน (คั่น)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน						
			L/8	L/4	3L/8	L/2	5L/8	3L/4	7L/8
5.5	507	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.04	0.03	0.10	0.09	0.09	0.14	0.07
		Max	0.33	0.47	0.64	0.71	0.82	1.15	0.91

ตารางที่ ผ.4 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตาม น้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

น้ำหนักรวมเฉลี่ย (ตัน)	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน		
			L/3	L/2	2L/3
10	9	Min	0.06	0.12	0.12
		Mean	0.17	0.28	0.28
		Max	0.27	0.40	0.47
12.5	116	Min	0.00	0.00	0.02
		Mean	0.14	0.24	0.22
		Max	0.37	0.50	0.44
15	254	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.13	0.20	0.17
		Max	0.32	0.46	0.44
17.5	537	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.11	0.18	0.15
		Max	0.29	0.42	0.42
20	1,025	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.10	0.17	0.13
		Max	0.40	0.41	0.42
22.5	1,766	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.09	0.17	0.12
		Max	0.32	0.37	0.43
25	654	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.09	0.16	0.11
		Max	0.29	0.43	0.35
27.5	227	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.08	0.15	0.12
		Max	0.22	0.28	0.37

ตารางที่ ๘.4 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตาม น้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน (ต่อ)

น้ำหนักรวมเฉลี่ย (ตัน)	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน		
			L/3	L/2	2L/3
30	138	Min	0.00	0.01	0.00
		Mean	0.08	0.15	0.12
		Max	0.24	0.27	0.32
32.5	135	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.07	0.15	0.12
		Max	0.24	0.33	0.28
35	84	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.08	0.15	0.12
		Max	0.22	0.31	0.25
37.5	20	Min	0.00	0.04	0.00
		Mean	0.07	0.14	0.10
		Max	0.16	0.25	0.27
40	9	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.08	0.15	0.07
		Max	0.17	0.26	0.19

ตารางที่ ผ.5 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามความเร็วเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน		
			L/3	L/2	2L/3
5	4	Min	0.10	0.07	0.11
		Mean	0.14	0.13	0.18
		Max	0.25	0.19	0.21
6.25	7	Min	0.05	0.09	0.08
		Mean	0.17	0.20	0.16
		Max	0.40	0.31	0.33
7.5	28	Min	0.02	0.07	0.00
		Mean	0.11	0.17	0.10
		Max	0.25	0.34	0.26
8.75	91	Min	0.00	0.01	0.00
		Mean	0.11	0.17	0.07
		Max	0.32	0.34	0.41
10	307	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.08	0.16	0.11
		Max	0.25	0.32	0.35
11.25	741	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.07	0.15	0.13
		Max	0.29	0.44	0.42
12.5	1,158	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.08	0.14	0.12
		Max	0.32	0.43	0.39
13.75	1,109	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.11	0.17	0.11
		Max	0.40	0.39	0.44

ตารางที่ ผ.5 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามน้ำหนักรวมเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน (ต่อ)

ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน		
			L/3	L/2	2L/3
15	810	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.12	0.21	0.15
		Max	0.32	0.43	0.42
16.25	460	Min	0.00	0.03	0.00
		Mean	0.11	0.21	0.16
		Max	0.37	0.46	0.37
17.5	192	Min	0.00	0.00	0.01
		Mean	0.10	0.20	0.16
		Max	0.33	0.50	0.36
18.75	54	Min	0.00	0.05	0.08
		Mean	0.11	0.20	0.19
		Max	0.27	0.44	0.47
20	12	Min	0.00	0.14	0.07
		Mean	0.12	0.26	0.19
		Max	0.28	0.49	0.43

ตารางที่ ผ.6 ค่าตัวประกอบการระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามระยะห่างเพลลาเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน

ระยะห่างเพลลาเฉลี่ย (เมตร)	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน		
			L/3	L/2	2L/3
3.5	49	Min	0.01	0.03	0.06
		Mean	0.11	0.17	0.19
		Max	0.27	0.33	0.41
3.75	207	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.10	0.16	0.18
		Max	0.26	0.37	0.41
4.0	466	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.09	0.17	0.16
		Max	0.32	0.40	0.47
4.25	1,396	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.09	0.17	0.13
		Max	0.40	0.44	0.43
4.50	1,883	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.09	0.17	0.12
		Max	0.40	0.43	0.44
4.8	605	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.10	0.18	0.12
		Max	0.29	0.39	0.34
5.0	192	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.10	0.18	0.11
		Max	0.32	0.46	0.42
5.25	129	Min	0.00	0.03	0.00
		Mean	0.10	0.21	0.11
		Max	0.33	0.50	0.38

ตารางที่ ผ.6 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน จำแนกตามระยะห่างเพลลาเฉลี่ยของรถบรรทุกจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม จำนวน 4,975 คัน (ต่อ)

ระยะห่างเพลลาเฉลี่ย (เมตร)	จำนวนรถบรรทุก (คัน)	ค่าขอบเขต	ตำแหน่งตามความยาวสะพาน		
			L/3	L/2	2L/3
5.5	48	Min	0.00	0.00	0.00
		Mean	0.10	0.17	0.09
		Max	0.30	0.39	0.27

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกวิทย์ ชันแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2524 มีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดอำนาจเจริญ บิดาและมารดามีอาชีพเป็นข้าราชการ มีพี่น้องจำนวน 3 คน โดยเป็นพี่ชาย คนโต สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จังหวัด อุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546 และมี ประสบการณ์การทำงาน ระหว่างปี พ.ศ. 2547 - 2552 ดังนี้

1. บริษัท พี.เค.ที เอ็นจิเนียริง เซอร์วิส จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรโยธา ทำหน้าที่ ออกแบบ ถอดแบบและประมาณราคา
2. บริษัท เพอร์ม่า สตีลลิซ่า (ไทยแลนด์) จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรโครงสร้าง ทำหน้าที่ วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างรับผนังกระจก
3. บริษัท เคอเทิลเวล จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรโครงสร้าง ทำหน้าที่ วิเคราะห์และออกแบบ โครงสร้างรับผนังกระจก
4. บริษัท ซีวิล แอนด์ สตรัคเจอร์ล เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรโครงสร้าง ทำ หน้าที่ วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคารและโครงสร้างชั้นวางท่อแรงดันสูง
5. บริษัท ฮาลโครว (ไทยแลนด์) จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรโครงสร้าง ทำหน้าที่ วิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทำเทียบเรือและโครงสร้างสถานีรถไฟใต้ดินสายสีน้ำเงิน

จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2553