

ตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่างๆบนคานสะพาน



นายปานนท์ ลาขโรจน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPACT FACTOR AT DIFFERENT LOCATIONS ON A BRIDGE GIRDER



Mr.Panon Latcharote

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่างๆบนคานสะพาน

โดย

นายปานนท์ ลาชโรจน์


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

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

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)

.....  กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. พัชรพงษ์ อาสนจินดา)

ปานนท์ लाखโรจน์ : ตัวประกอบการกระแทกตามตำแหน่งต่างๆบนคานสะพาน (IMPACT FACTOR AT DIFFERENT LOCATIONS ON A BRIDGE GIRDER) อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 151 หน้า.

ปกติการออกแบบสะพานจะสมมติให้แรงกระทำจากรถบรรทุกเป็นค่าคงที่เคลื่อนไปบนสะพานอย่างช้าๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ด้วยวิธีเชิงสถิต แล้วจึงพิจารณาผลขยายทางด้านพลศาสตร์ด้วยการคูณตัวประกอบการกระแทก มาตรฐานการออกแบบมักกำหนดตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงหรือความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยได้มาจากผลการศึกษาในอดีต อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวจำกัดการหาตัวประกอบการกระแทกเฉพาะที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานเท่านั้น จึงมีผลทำให้การออกแบบสะพานในตำแหน่งอื่นๆอาจไม่ถูกต้องปลอดภัย งานวิจัยนี้จึงต้องการขยายผลการศึกษาให้ครอบคลุมถึงตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆบนสะพาน ทั้งยังต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่างๆได้แก่ ความยาวช่วง ความถี่ธรรมชาติของสะพาน ความเร็วและน้ำหนักรถบรรทุก รวมทั้งพิจารณาผลจากสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ในการศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน แล้วทำการจำลองเหตุการณ์การแล่นข้ามสะพานของรถบรรทุกภายใต้เงื่อนไขแบบต่างๆในคอมพิวเตอร์ อาทิเช่น การเปลี่ยนความเร็วรถบรรทุก ความยาวช่วงสะพาน ระดับความขรุขระของผิวทาง ซึ่งผลการศึกษาในกลุ่มตัวอย่างพบว่า การพิจารณาสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงขึ้นจากที่ไม่มีการพิจารณา และตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะแปรผันตามความเร็วและแปรผกผันกับน้ำหนักรถบรรทุก นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของสะพานซึ่งก็คือมีความสัมพันธ์กับตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานแคนาดาด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ตัวประกอบการกระแทกสูงสุดของสะพานนั้นอาจไม่ได้เกิดบริเวณกึ่งกลางช่วงสะพาน โดยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่นๆมีโอกาสสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานได้ทุกตำแหน่งโดยเฉพาะบริเวณปลายสะพาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องปรับปรุงแนวทางในการพิจารณาตัวประกอบการกระแทกในการวิเคราะห์ออกแบบสะพานเพื่อให้มีความถูกต้องและปลอดภัยต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา...2553

ลายมือชื่อนิสิต..... *ชานนท์*.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *— ๒*.....

5270776421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: IMPACT FACTOR / DYNAMIC RESPONSE / INTERACTION / BRIDGE / TRUCK

PANON LATCHAROTE: IMPACT FACTOR AT DIFFERENT LOCATIONS ON A BRIDGE GIRDER. ADVISOR: ASSOC.PROF.TOSPOL PINKAEW, D.Eng. 151 pp.

Generally, bridges are designed assuming constant truck loads slowly travelling on the decks. The static analysis is applicable and the effects of bridge dynamics are taken into account using the impact factor. Based on the past studies, the design codes recommend the impact factor in term of span length or bridge's natural frequency. However, those studies considered the impact effect only at bridge's mid-span. Consequency, the bridge design at other locations might be unsafe. This research studies the impact factor at different locations along the bridge girders. The relationships between impact factor and relevant parameters such as span length, bridge's natural frequency, velocity and truck's weight are considered and the effect of initial condition of a vehicle is investigated. The mathematical model representing the vehicle-bridge interaction is formulated. The computer simulations under various conditions of passing vehicles including vehicle speed, span length and surface roughness are conducted. The obtained results indicate that the impact factor with considering initial condition is always higher than that without considering initial condition. The obtained impact factor seem to has significant correlation with the bridge's natural frequency as recommended by Canadian code (OHBCD). In addition, the maximum values of impact factor are found at other bridge positions, especially around bridge's supports, rather than at bridge mid-span. Therefore, it is necessary that the impact formula needs to be improved in order to guarantee the bridge safety.

Department : Civil Engineering

Student's Signature *Panon*

Field of Study : Civil Engineering

Advisor's Signature *T. P.*

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์กระผมที่อบรม สั่งสอน ให้การอุปถัมภ์จนกระผมมีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและมีหน้าที่การงาน โอกาสทางสังคม ตลอดจนอบรมด้านคุณธรรมจริยธรรม

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้วิชาพื้นฐานภาคทฤษฎีก่อนทำงานวิจัย หากปราศจากความกรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรีและปราศจากการให้คำปรึกษา แนะนำ การแก้ปัญหาและจุดประกายความคิดโดยอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว และความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์โดยผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ และดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา รวมทั้งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณดร.ธีระชัย ดีสมสุข นายธนวรรธน์ ไสภณมหาผล และนายไพโรจน์ วัชมานันท์ ที่คอยให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ศึกษาในระดับปริญญาโทด้วยกันที่คอยเป็นกำลังใจและร่วมทุกข์ร่วมสุขกันมา

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้ที่สนใจศึกษาและเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป กระผมขอขอบพระคุณและยินดีกับทุกท่านที่ตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจสร้างกุศลนี้โดยที่มีส่วนสร้างการศึกษาทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ขออัญเชิญอนุภาพคุณพระศรีรัตนตรัย โปรดอภิบาลดลบันดาลให้ท่านและครอบครัวผู้สร้างกุศลนี้เจริญด้วยจตุรพิธพรชัย ปฏิภาณบพิวาร ธนสาร สมบัติ สุขภาพแข็งแรงและประสบแต่สิ่งที่เป็นมงคลเทอญ...

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	14
1.4 ขอบเขต.....	15
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	15
1.6 การดำเนินงานวิจัย.....	15
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ตัวประกอบการกระแทก.....	17
2.1.1 นิยาม.....	17
2.1.2 มาตรฐานเกี่ยวกับตัวประกอบการกระแทก.....	18
2.2 ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน.....	20
2.2.1 การจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	21
2.2.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน.....	21
2.2.3 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก.....	28
2.2.4 การจำลองความขรุขระของผิวทาง.....	33
2.2.5 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน.....	45
2.3 การคำนวณค่าตัวประกอบการกระแทก.....	49

บทที่ 3 แบบจำลองรถบรรทุกกับสะพานในคอมพิวเตอร์.....	54
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	54
3.1.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสะพาน.....	54
3.1.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรถบรรทุก.....	54
3.2 คุณสมบัติของสะพาน.....	55
3.3 คุณสมบัติของรถบรรทุก.....	58
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	67
4.1 สภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก.....	67
4.2 การกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ.....	75
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่างๆ.....	86
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความยาวช่วง ของสะพาน.....	89
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความถี่ธรรมชาติ ของสะพาน.....	91
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุก... ..	98
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรถบรรทุก.....	100
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์ กับตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานต่างๆ.....	103
4.4 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆ.....	106
บทที่ 5 สรุปผล.....	131
รายการอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก.....	138
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่า PSD ที่นำไปใช้จำลองรูปแบบของผิวทางตามมาตรฐาน ISO.....	37
ตารางที่ 2.2	ค่า PSD ที่นำไปใช้จำลองสภาพพื้นผิว.....	38
ตารางที่ 3.1	มวลต่อความยาวสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ.....	56
ตารางที่ 3.2	ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ.....	57
ตารางที่ 3.3	สติฟเนสของสะพาน (<i>EI</i>) ที่ความยาวช่วงต่างๆ.....	58
ตารางที่ 3.4	คุณสมบัติของรถบรรทุกสิบล้อ.....	58
ตารางที่ 3.5	ค่าสติฟเนสของรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์.....	59
ตารางที่ 3.6	ความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุก.....	59
ตารางที่ 3.7	พลังงานเฉลี่ยที่ความเร็ว (<i>V</i>) น้ำหนักรถบรรทุก (<i>W</i>) และผิวทางประเภท A...	61
ตารางที่ 3.8	พลังงานเฉลี่ยที่ความเร็ว (<i>V</i>) น้ำหนักรถบรรทุก (<i>W</i>) และผิวทางประเภท B...	62
ตารางที่ 3.9	พลังงานเฉลี่ยที่ความเร็ว (<i>V</i>) น้ำหนักรถบรรทุก (<i>W</i>) และผิวทางประเภท C...	62
ตารางที่ 3.10	การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่ความเร็ว (<i>V</i>) น้ำหนัก (<i>W</i>) และผิวทาง ประเภท A.....	63
ตารางที่ 3.11	การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่ความเร็ว (<i>V</i>) น้ำหนัก (<i>W</i>) และผิวทาง ประเภท B.....	64
ตารางที่ 3.12	การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่ความเร็ว (<i>V</i>) น้ำหนัก (<i>W</i>) และผิวทาง ประเภท C.....	64
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกสำหรับ 16 กรณีที่นำมาวิเคราะห์.....	69
ตารางที่ 4.2	คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกสำหรับ 16 กรณีที่นำมาวิเคราะห์.....	71
ตารางที่ 4.3	คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกสำหรับ 16 กรณีที่นำมาวิเคราะห์.....	72
ตารางที่ 4.4	ค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C.....	80
ตารางที่ 4.5	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C	82
ตารางที่ 4.6	คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกของกรณีที่นำมาศึกษา.....	83
ตารางที่ 4.7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับ ความยาวช่วงของสะพาน.....	91

ตารางที่ 4.8	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน.....	94
ตารางที่ 4.9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับ ความถี่ธรรมชาติของสะพานในช่วง 0 - 3.2 Hz และช่วง 3.2-12 Hz.....	95
ตารางที่ 4.10	คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกของ 2 กรณีที่นำมาเปรียบเทียบ.....	97
ตารางที่ 4.11	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับ ความเร็วรถบรรทุก.....	100
ตารางที่ 4.12	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับ น้ำหนักรถบรรทุก.....	102
ตารางที่ 4.13	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจาก การวิเคราะห์และจากมาตรฐานต่างๆ.....	104
ตารางที่ 4.14	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจาก การวิเคราะห์และจากงานวิจัยต่างๆ.....	105
ตารางที่ 4.15	ตารางแจกแจงความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆสำหรับแต่ละ ประเภทผิวทาง.....	130
ตารางที่ ผ.1	ความถี่ธรรมชาติของสะพานจากการทดสอบในภาคสนาม.....	139
ตารางที่ ผ.2	มวลต่อความยาวสะพานจากแบบมาตรฐานต่างๆ.....	140
ตารางที่ ผ.3	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท A.....	142
ตารางที่ ผ.4	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท A.....	143
ตารางที่ ผ.5	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท A.....	144
ตารางที่ ผ.6	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท B.....	145
ตารางที่ ผ.7	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท B.....	146

ตารางที่ ผ.8	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท B.....	147
ตารางที่ ผ.7	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท C.....	148
ตารางที่ ผ.8	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท C.....	149
ตารางที่ ผ.9	ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับ ผิวทางประเภท C.....	150



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
ภาพที่ 2.1	ตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละความยาวช่วงตามมาตรฐานต่างๆ.....	19
ภาพที่ 2.2	ตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละความถี่ธรรมชาติตามมาตรฐานต่างๆ.....	20
ภาพที่ 2.3	ขึ้นส่วนคานสี่ดีกรีอิสระ.....	21
ภาพที่ 2.4	แรงกระทำที่ข้อซึ่งแปลงจากแรงกระทำภายนอก.....	26
ภาพที่ 2.5	แบบจำลองรถบรรทุก.....	28
ภาพที่ 2.6	แผนภาพอิสระของรถบรรทุกกับสะพาน.....	30
ภาพที่ 2.7	ตัวอย่างข้อมูลความขรุขระที่วัดได้จากภาคสนาม.....	34
ภาพที่ 2.8	ข้อมูลที่ราบเรียบ (Smoothed PSD) จากความขรุขระที่วัดได้จากภาคสนาม..	35
ภาพที่ 2.9	ค่า PSD ตามมาตรฐาน ISO.....	36
ภาพที่ 2.10	แบบจำลองผิวทางประเภท A.....	39
ภาพที่ 2.11	แบบจำลองผิวทางประเภท B.....	41
ภาพที่ 2.12	แบบจำลองผิวทางประเภท C.....	43
ภาพที่ 2.13	ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน.....	45
ภาพที่ 2.14	ตำแหน่งที่วัดผลตอบสนองในขึ้นส่วนของคาน.....	50
ภาพที่ 2.15	ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในรูปของ โมเมนต์ดัด.....	51
ภาพที่ 2.16	น้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ไปบนสะพาน.....	52
ภาพที่ 2.17	ผลตอบสนองทางด้านสถิติที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในรูปของโมเมนต์ดัด...	53
ภาพที่ 3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อความยาวสะพานกับความยาวช่วงจาก แบบสะพานมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท.....	55
ภาพที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความยาวช่วง.....	56
ภาพที่ 3.3	การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพาน.....	60
ภาพที่ 3.4	พลังงานสะสมที่เวลาต่างๆ ขณะรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนผิวทาง.....	60
ภาพที่ 3.5	แผนผังการทำงานของแบบจำลองในคอมพิวเตอร์.....	66
ภาพที่ 4.1	รถบรรทุกมีการกระจัดเริ่มต้นในลักษณะยุบตัว.....	67
ภาพที่ 4.2	รถบรรทุกมีการกระจัดเริ่มต้นในลักษณะยืดตัว.....	67

ภาพที่ 4.3	ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ 16 กรณี สำหรับผิวทางประเภท A.....	68
ภาพที่ 4.4	ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ 16 กรณี สำหรับผิวทางประเภท B.....	70
ภาพที่ 4.5	ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ 16 กรณี สำหรับผิวทางประเภท C.....	73
ภาพที่ 4.6	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A.....	74
ภาพที่ 4.7	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B.....	75
ภาพที่ 4.8	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C.....	76
ภาพที่ 4.9	แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A...	78
ภาพที่ 4.10	แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท B...	79
ภาพที่ 4.11	แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท C...	79
ภาพที่ 4.12	แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A.....	80
ภาพที่ 4.13	แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท B.....	81
ภาพที่ 4.14	แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท C.....	81
ภาพที่ 4.15	การกระจัดในแนวดิ่ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ.....	84
ภาพที่ 4.16	โมเมนต์ดัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ.....	85
ภาพที่ 4.17	การสั่นของเพลาน้ำรถบรรทุกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ.....	86
ภาพที่ 4.18	การสั่นของเพลาล้งรถบรรทุกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ.....	87
ภาพที่ 4.19	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A.....	89

ภาพที่ 4.20	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B.....	90
ภาพที่ 4.21	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C.....	90
ภาพที่ 4.22	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของสะพาน สำหรับผิวทางประเภท A.....	92
ภาพที่ 4.23	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของสะพาน สำหรับผิวทางประเภท B.....	92
ภาพที่ 4.24	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของสะพาน สำหรับผิวทางประเภท C.....	93
ภาพที่ 4.25	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A.....	95
ภาพที่ 4.26	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B.....	96
ภาพที่ 4.27	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C.....	96
ภาพที่ 4.28	การกระจัดในแนวตั้ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน.....	97
ภาพที่ 4.29	การสั่นของเพลาน้ำรถบรรทุก.....	98
ภาพที่ 4.30	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความเร็วต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A.....	98
ภาพที่ 4.31	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความเร็วต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B.....	99
ภาพที่ 4.32	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความเร็วต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C.....	99

ภาพที่ 4.33	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่น้ำหนักรถบรรทุก ต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A.....	101
ภาพที่ 4.34	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่น้ำหนักรถบรรทุก ต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B.....	101
ภาพที่ 4.35	ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่น้ำหนักรถบรรทุก ต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C.....	102
ภาพที่ 4.36	ตัวประกอบการกระแทกที่ถูกกำหนดในมาตรฐานต่างๆ.....	103
ภาพที่ 4.37	ตัวประกอบการกระแทกในมาตรฐานของประเทศแคนาดา.....	103
ภาพที่ 4.38	อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A.....	108
ภาพที่ 4.39	อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุด จากค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A	108
ภาพที่ 4.40	ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆสำหรับผิวทางประเภท A	109
ภาพที่ 4.41	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบ การกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A.....	111
ภาพที่ 4.42	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบ การกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท B.....	111
ภาพที่ 4.43	ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบ การกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท C.....	112
ภาพที่ 4.44	ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพาน สำหรับความยาวช่วงต่างๆ.....	114
ภาพที่ 4.45	ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพาน สำหรับความเร็วรถบรรทุกต่างๆ.....	115
ภาพที่ 4.46	ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพาน สำหรับน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ.....	116
ภาพที่ 4.47	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน.....	118
ภาพที่ 4.48	การกระจัดในแนวตั้งที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน.....	119

ภาพที่ 4.49	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/4$ ของสะพาน.....	119
ภาพที่ 4.50	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/2$ ของสะพาน.....	120
ภาพที่ 4.51	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $3L/4$ ของสะพาน.....	120
ภาพที่ 4.52	ค่าที่ 98^{th} ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับ ที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความยาวช่วงต่างๆ.....	122
ภาพที่ 4.53	ค่าที่ 98^{th} ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับ ที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความเร็วรถบรรทุกต่างๆ.....	123
ภาพที่ 4.54	ค่าที่ 98^{th} ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับ ที่กึ่งกลางสะพานสำหรับน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ.....	124
ภาพที่ 4.55	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน.....	127
ภาพที่ 4.56	การกระจัดในแนวดิ่งที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน.....	127
ภาพที่ 4.57	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/4$ ของสะพาน.....	128
ภาพที่ 4.58	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/2$ ของสะพาน.....	128
ภาพที่ 4.59	โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $3L/4$ ของสะพาน.....	123
ภาพที่ 4.60	แผนภาพการกระจายความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับ ผิวทางประเภท A.....	131
ภาพที่ 4.61	แผนภาพการกระจายความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับ ผิวทางประเภท B.....	131
ภาพที่ 4.62	แผนภาพการกระจายความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับ ผิวทางประเภท C.....	131

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสะพานทั้งในแง่ของความปลอดภัยและความคงทน ปกติการออกแบบสะพานจะสมมติให้แรงกระทำจากรถบรรทุกเป็นค่าคงที่เคลื่อนไปบนสะพานอย่างช้าๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ด้วยวิธีเชิงสถิต แล้วจึงพิจารณาผลขยายทางด้านพลศาสตร์ด้วยการคูณตัวประกอบการกระทำ (Impact factor) โดยตัวประกอบการกระทำเป็นผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นมาจากผลตอบสนองทางด้านสถิตซึ่งมาจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่วิศวกรต้องประเมินผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและกำหนดค่าตัวประกอบการกระทำได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ออกแบบสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

มาตรฐานการออกแบบสะพานมักกำหนดวิธีในการคำนวณหาตัวประกอบการกระทำให้มีค่าขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพานเช่น AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) หรือเป็นฟังก์ชันของความถี่ธรรมชาติของสะพานเช่น OHBD (Ontario Highway Bridge Design code) และ NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities) แต่ดูเหมือนว่าวิธีการนี้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงเนื่องจากในหลายๆกรณีจะมีความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยตัวแปรอื่นๆที่อาจจะเกี่ยวข้องกับค่าปัจจัยการกระทำคือ ความเร็วของรถบรรทุก ความถี่ในการสั่นของเพลลา ความหน่วงในระบบกันสะเทือน ความถี่ธรรมชาติและความหน่วงของสะพาน ความขรุขระของผิวทาง รอยต่อระหว่างแผ่นพื้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ว่าจะเป็น การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองหรือการทดสอบในภาคสนามพบว่า ตัวประกอบการกระทำที่ได้จากการคำนวณในมาตรฐานการออกแบบอาจจะไม่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงในหลายๆกรณี เหตุผลหนึ่งที่เป็นเช่นนั้นคือ ค่าตามมาตรฐานจะแนะนำสำหรับการออกแบบสะพานใหม่ซึ่งมีสภาพพื้นผิวที่ดี อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงอายุการใช้งานของสะพาน ไม่ว่าจะเป็นสภาพพื้นผิวที่ถูกทำลาย การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก หรือจากปัจจัยอื่นๆ ทำให้ต้องปรับใช้ตัวประกอบการกระทำให้

เหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งที่ผ่านมามีความพยายามของนักวิจัยที่จะนำเสนอตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และความขรุขระของผิวทาง

ยิ่งไปกว่านั้นสิ่งที่ยังคงเป็นประเด็นปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือ การที่ผลการศึกษาในอดีตทั้งหมดรวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง พิจารณาตัวประกอบการกระแทกของสะพานเป็นค่าคงที่ตลอดความยาวสะพานเพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยคำนึงถึงตัวประกอบการกระแทกเฉพาะบริเวณกึ่งกลางสะพาน ด้วยอาจมีสมมติฐานว่าบริเวณดังกล่าวจะให้ตัวประกอบการกระแทกที่ค่าสูงสุด ซึ่งอาจไม่ถูกต้องอันอาจนำไปสู่การวิเคราะห์หรือออกแบบสะพานที่ไม่สอดคล้องความเป็นจริงและไม่ปลอดภัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆตลอดความยาว โดยการจำลองสะพานเป็นคานช่วงเดียวที่มีรถบรรทุกสองเพลลาเพียงคันเดียวเคลื่อนที่ไปบนสะพานด้วยความเร็วคงที่ ทำการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆของสะพานโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

Chang และ Lee (1994) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นของสะพานเนื่องมาจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานซึ่งผิวทางมีความขรุขระ เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง โดยมีตัวแปรได้แก่ ความเร็วของรถบรรทุก ความยาวช่วง และความขรุขระของผิวทาง โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วน โดยมีแรงจากรถบรรทุกกระทำที่หัวของชิ้นส่วน ผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ในโดเมนของเวลาและของความถี่ มีการจำลองรถบรรทุกเป็น 4 แบบ คือ เป็นแรงกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ เป็นมวลเคลื่อนที่ เป็นระบบหนึ่งดีกรีอิสระเคลื่อนที่ และระบบสองดีกรีอิสระเคลื่อนที่ จากการศึกษาพบว่าจะได้ผลตอบสนองต่างกันในแต่ละแบบเมื่อผิวทางของสะพานมีความขรุขระ แต่ผลตอบสนองจะไม่ต่างกันเมื่อผิวทางของสะพานไม่มีความขรุขระ ในงานวิจัยนี้ใช้การจำลองรถบรรทุกแบบสองดีกรีอิสระ ในการหาว่าผลจากตัวแปรที่มีต่อค่าตัวประกอบการกระแทกเป็นอย่างไร พบว่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วของรถและความขรุขระของพื้นผิว แต่ความยาวช่วงของสะพานจะไม่มีผลต่อตัวประกอบการกระแทก

Yang, Liao และ Lin (1995) ได้ทำการจำลองรถบรรทุกที่มี 5 เพลาเป็นมวลเคลื่อนที่และจำลองสะพานเป็นชิ้นส่วนของคาน นำไปสร้างสมการการเคลื่อนที่แสดงถึงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถ เพื่อศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆที่อาจมีต่อค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) ตามมาตรฐานของ AASHTO และ OBCD ซึ่งเสนอสูตรที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบให้ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของสะพานหรือความถี่ธรรมชาติของการสั่นเท่านั้น แต่ยังมีตัวแปรอื่นๆที่ต้องนำมาพิจารณาเช่น ความเร็วของรถ ลักษณะในเชิงพลศาสตร์ของรถ ลักษณะและเงื่อนไขที่ขอบของสะพาน ความขรุขระของพื้นผิว เนื่องจากมีตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้องมากมาย ทำให้การหาค่าตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานข้างต้นอาจมีค่าต่ำเกินไปในหลายๆกรณี อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาไม่สามารถนำเสนอสูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกที่ง่ายพอที่จะนำมาใช้ และเนื่องจากการพัฒนาสูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกจะต้องทันกับสถานการณ์ในปัจจุบันทั้งในเรื่องของปริมาณการจราจรและลักษณะของรถบรรทุก งานวิจัยนี้ได้จำลองรถบรรทุกเป็นมวลที่รองรับโดยระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) ซึ่งประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง ในการจำลองสะพานจะมีทั้งเป็นแบบคานช่วงเดียว (Simple beam) และคานต่อเนื่อง (Continuous beam) ซึ่งมีสามช่วง โดยความยาวของคานช่วงเดียวและช่วงกลางของคานหลายช่วงเท่ากับ 30, 60, 90 เมตร ความยาวช่วงริมเท่ากับ 10, 30, 60 เมตร ใช้วิธีสติฟเนสโดยตรง (Direct stiffness method) สร้างสมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถ และทำการหาผลตอบสนองโดยวิธี Direct integration โดยทำการศึกษาทั้งลักษณะการเคลื่อนที่ของรถหนึ่งคันที่มาช่องทางเดียวและรถสองคันสวนกันที่สองช่องทาง นำไปหาตัวประกอบการกระแทกสำหรับการโก่งตัว โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน และหาตัวประกอบการกระแทกสำหรับแรงเฉือนที่ฐานเนื่องมาจากตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาค้นคว้าผลเนื่องจากแต่ละตัวแปร ซึ่งไม่มีผลจากหลายตัวแปรร่วมกัน แต่ในงานวิจัยนี้จะมีตัวแปรที่เรียกว่าตัวแปรความเร็ว (Speed parameter) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ในการเคลื่อนที่ของรถ ($\pi V / L$) ต่อความถี่ธรรมชาติของสะพาน (ω) โดย V คือ ความเร็วของรถ และ L คือ ความยาวช่วงของสะพาน ทำการศึกษาตัวประกอบการกระแทกเนื่องจากตัวแปรความเร็วโดยการให้ตัวแปรอื่นๆคงที่และพื้นผิวราบเรียบ แล้วแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรความเร็ว สำหรับการโก่งตัว โมเมนต์ดัด แรงเฉือนที่กึ่งกลางคานและแรงเฉือนที่ฐานในการเคลื่อนที่ของรถทั้งสองกรณี สร้างเส้นตรงครอบคลุมผลทั้งหมดทำให้ได้สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยการกระแทกกับ

ตัวแปรความเร็วในกรณีต่างๆ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของรถจะส่งผลที่แตกต่างกันไม่มากนัก ยกเว้นตัวประกอบการกระทบแก่สำหรับแรงเฉือนที่ฐาน ทั้งนี้ผลสรุปจากการศึกษาพบว่า

-ตัวประกอบการกระทบแก้อาจเกิน 0.3 ได้ (ASTHO กำหนดว่ามีค่าไม่เกิน 0.3) โดยเฉพาะกรณีในตัวแปรความเร็วเกิน 0.2 หรือความถี่ในการเคลื่อนที่ของรถ ($\pi V / L$) มากกว่า 20% ของความถี่ธรรมชาติของสะพาน (ω)

-ตัวประกอบการกระทบแกของสะพานช่วงเดียวจะมีค่าสูงกว่าค่าจากสะพานหลายช่วงประมาณสามเท่า

-ตัวประกอบการกระทบแก่สำหรับการโก่งตัวจะสูงกว่าค่าจากโมเมนต์ดัด

-ตัวประกอบการกระทบแก่สำหรับแรงเฉือนที่ฐานรองรับจะมีค่าสูงกว่าค่าที่กึ่งกลางสะพานประมาณ 2.5 เท่า

ทั้งนี้ยังพบว่าผลจากอัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของรถกับความถี่ธรรมชาติของสะพานจะน้อยมาก หมายความว่าระบบกันสะเทือนของรถและลักษณะของสะพานแทบจะไม่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระทบ และจากการศึกษาเพิ่มเติมพื้นผิวต่างๆ เช่น คอนกรีต แอสฟัลท์ ซึ่งจำลองจากฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) จะมีผลต่อค่าปัจจัยการกระทบน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นสิ่งที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระทบคือ ความเร็วรถและความยาวช่วงของสะพาน โดยตัวประกอบการกระทบจะแปรผันตามความเร็วรถและแปรผกผันกับความยาวช่วงของสะพาน

Kim และ Nowak (1998) ได้ทำการเก็บค่าความเครียดจากสะพานที่มีรถบรรทุกวิ่งผ่านภายใต้สภาพการจราจรปกติที่ไม่มีการควบคุมทางด้านจราจร (Traffic control) เพื่อจะหาตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) โดยจะนำไปใช้ประเมินสภาพการใช้งานของสะพานและนำไปปรับปรุงหลักการออกแบบสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติ งานวิจัยนี้เริ่มด้วยการทบทวนการหาค่าตัวประกอบการกระทบจากมาตรฐาน AASHTO ซึ่งจะขึ้นกับความยาวช่วงของสะพานเท่านั้น จากนั้นทำการเก็บค่าความเครียดจากสะพานช่วงเดียวสองสะพานที่มีลักษณะของสะพานและสภาพการจราจรต่างกันมาก โดยติดตั้งเครื่องมือเก็บค่าความเครียดที่ได้สะพาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง ทำการเก็บค่าความเครียดภายใต้สภาพการจราจรปกติซึ่งความถี่ในการเก็บข้อมูลจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ความเครียดสูงสุดอยู่ในข้อมูลที่เก็บมา จากการใช้เครื่องมือเก็บค่าความเครียดทำให้ได้ข้อมูลความเครียดจากรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานมา 900 ตัวอย่าง นำข้อมูลเหล่านี้ไปหาค่าตัวประกอบการกระทบ นอกจากนี้ยังทำการเก็บค่าความเครียด

ที่ได้จากรถบรรทุกที่ทราบน้ำหนักและลักษณะของรถ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรืออ้างอิงข้อมูล ความเครียดที่ได้จากสภาพจราจรปกติ ค่าความเครียดที่ได้นี้เป็นค่าที่ได้จากพฤติกรรมทางด้าน พลศาสตร์ของสะพาน เมื่อนำตัวกรองสัญญาณ (Filter) มาใช้กับข้อมูลชุดนี้ทำให้ได้ค่า ความเครียดจากพฤติกรรมทางด้านสถิตเทียบเท่าของสะพาน นำข้อมูลเหล่านี้ไปหาค่าตัว ประกอบการกระทบที่ตำแหน่งของคานาริมนอกสุด (Exterior girder) จะสูงมากเนื่องจากว่าผลตอบสนองทางสถิตที่ต่ำ โดยส่วนใหญ่ตัวประกอบการกระทบที่ ได้จะต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลความเครียด จากสภาพการจราจรปกติจะสามารถใช้ในการสังเกตพฤติกรรมของสะพานภายใต้สภาพน้ำหนักที่ เกิดขึ้นจริง ค่าความเครียดที่ต่ำสามารถบ่งบอกได้ว่าสะพานสามารถรับน้ำหนักไว้ได้เพียงพอ

Liu, Huang และ Wang (2002) ทำการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นสามมิติ เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานเนื่องจากความขรุขระของผิวทางและศึกษา สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวทางกับตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) งานวิจัยนี้ทำการจำลองสะพานคอนกรีตซึ่งเป็นสะพานช่วงเดี่ยวที่ออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO ที่มีความยาวช่วงตั้งแต่ 9.14 เมตร ถึง 42.67 เมตร สำหรับการจำลองรถบรรทุกจะ จำลองจากข้อมูลที่วัดได้ในภาคสนาม (Weigh-in-motion) ซึ่งเป็นรถบรรทุกประเภท HS20-44 โดยเก็บมาทั้งหมด 21444 ข้อมูล การจำลองความขรุขระของผิวทางจะใช้กระบวนการการสุ่มจาก พูเรียร์ทรานส์ฟอร์มของฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ในการสร้างรูปแบบของความขรุขระ ทำการศึกษาโดยให้รถบรรทุกคันเดียวเคลื่อนที่ผ่าน สะพานเนื่องจากโอกาสที่รถบรรทุกสองคันขึ้นไปเคลื่อนที่ผ่านสะพานในเวลาเดียวกันเป็นไปได้ น้อย จำลองให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสะพานโดยไม่มีการกระจัดและความเร็วเริ่มต้น โดยมีความเร็วของรถบรรทุกตั้งแต่ 24 ถึง 121 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำลองความขรุขระของผิวทางใน สภาพดี ทำการศึกษาตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสะพานโดยสนใจคาน (Girder) ที่รับแรงมากที่สุด ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของรถบรรทุกและความยาวสะพาน แต่ละ ความเร็วจะหาตัวประกอบการกระทบจากค่าเฉลี่ยของการจำลอง 20 ครั้ง พบว่าสำหรับ รถบรรทุกขนาดใหญ่จะได้ค่าตัวประกอบการกระทบที่ต่ำกว่ามาตรฐาน AASHTO และสำหรับ รถบรรทุกขนาดเล็กจะได้ค่าตัวประกอบการกระทบที่สูงกว่ามาตรฐาน AASHTO อยู่มาก แต่ เนื่องจากน้ำหนักของรถที่น้อยทำให้ไม่มีผลต่อโครงสร้างสะพานมากนัก จากนั้นเป็นการศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวทางกับตัวประกอบการกระทบ ซึ่งความสัมพันธ์แต่ละ รูปแบบจะกระตุ้นการสั่นของรถบรรทุกในรูปแบบที่ต่างกัน (Pitch mode และ Roll mode) ทำการ

หาค่าตัวประกอบการกระทบที่ความเร็วและความขรุขระของผิวทางรูปแบบต่างๆ โดยให้รถเคลื่อนที่ในช่องทางเดียวและสองช่องทางและมีสมมติฐานว่าความขรุขระเหมือนกันทั้งสองช่องทาง จากการศึกษาพบว่าค่าตัวประกอบการกระทบจะแปรผันตามความขรุขระของผิวทาง เพราะฉะนั้นความขรุขระของผิวทางจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลทางด้านพลศาสตร์ในระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานเพื่อหาค่าตัวประกอบการกระทบ

Zhang, Sennah และ Kennedy (2003) ทำการศึกษาว่าความเร็วของรถ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน และความยาวช่วงของสะพาน มีผลต่อตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) อย่างไร โดยใช้แบบจำลองสามมิติเพื่อหาค่าตัวประกอบการกระทบจากโมเมนต์ดัด แรงปฏิกิริยาที่ฐาน และระยะโก่งตัวของสะพาน เริ่มจากการจำลองสะพาน 120 ตัวอย่าง มีลักษณะเป็นสะพานช่วงเดียว แผ่นพื้นคอนกรีตวางอยู่บนคานเหล็ก (Girder) นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรมABAQUS จะทำการศึกษาทั้งแบบกรณีที่รถบรรทุกมาพร้อมกันทั้งสองช่องทางและแบบที่รถบรรทุกมาช่องทางเดียว ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ตัวประกอบการกระทบที่มีค่าสูงสุดสำหรับโมเมนต์ดัดและระยะโก่งตัวของสะพาน จะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง อีกทั้งตัวประกอบการกระทบที่มีค่าสูงสุดสำหรับแรงปฏิกิริยาที่ฐาน จะเกิดขึ้นเมื่อรถบรรทุกอยู่ใกล้ๆกับฐาน ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าตัวประกอบการกระทบจะแปรผันกับความเร็วของรถบรรทุก โดยถ้รถบรรทุกมาพร้อมกันทั้งสองช่องทางในทิศทางเคลื่อนที่เดียวกันจะให้ตัวประกอบการกระทบที่มีค่ามากที่สุด โดยตัวประกอบการกระทบสำหรับแรงปฏิกิริยาที่ฐานจะมากกว่าตัวประกอบการกระทบสำหรับโมเมนต์ดัดและระยะโก่งตัวของสะพานอยู่มาก ความถี่ธรรมชาติของสะพานเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของสะพาน โดยความถี่ธรรมชาติของสะพานจะแปรผันกับค่าตัวประกอบการกระทบ และผลเนื่องจากความยาวช่วงของสะพานที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระทบมากขึ้นด้วย ซึ่งขัดแย้งกับมาตรฐาน AASHTO และงานวิจัยอื่นๆ

Law และ Zhu (2005) ทำการศึกษาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน โดยการพิจารณาผลกระทบของผิวทางที่มีความขรุขระและการเบรกของรถ ในการวิเคราะห์จะจำลองรถบรรทุกสามเพลาและสะพานหลายช่วงที่มีหน้าตัดไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) จากตัวแปรต่างๆเช่น ตำแหน่งที่รถเริ่มเบรก ขนาดของแรงเบรก ระยะเวลาที่ทำการเบรก อัตราเร็วเริ่มต้นของรถ ผิวทางแต่ละประเภทตามมาตรฐาน ISO ทั้งนี้ยังมีการทดลองในภาคสนามเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วย ทำการ

สร้างแบบจำลองสองมิติของรถบรรทุกสามเพลาที่มี 7 องศาอิสระ แต่ละเพลาจะมีระบบกันสะเทือน (Suspension system) ที่ประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองของสะพานเป็นคานสามช่วงที่มีหน้าตัดไม้คองที่ ทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ค่าปัจจัยการกระแทกจะคำนวณจากการโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วง จากการศึกษพบว่า

-เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำผ่านผิวทางที่มีความขรุขระมาก จะทำให้เกิดการกระตุ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน นำไปสู่การเกิดผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์อย่างมากในโครงสร้าง

-ระบบกันสะเทือนของรถเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรถเกิดการเบรกบนสะพานซึ่งการเบรกนี้จะทำให้ผลตอบสนองของสะพานเพิ่มมากขึ้น

-ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์จะแตกต่างกันในแต่ละช่วงของสะพาน โดยความแตกต่างจะน้อยที่สุดในช่วงที่สองของสะพานสามช่วง ซึ่งความแตกต่างนี้จะมีมากขึ้นเมื่อมีการเบรกของรถบรรทุก ดังนั้นการหาค่าปัจจัยการกระแทกที่ถูกต้องจึงควรมาจากผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์และทางด้านสถิติที่สูงสุด ณ ช่วงสะพานเดียวกันกับการเบรกเกิดขึ้น

-ผลตอบสนองในสะพานช่วงแรกจะต่ำกว่าช่วงอื่นๆ เพราะสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกขณะเข้าสู่สะพานยังมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอื่นๆ

-การเบรกของรถบรรทุกจะทำให้เกิดแรงกระแทกเทียบเท่าในช่วงความถี่ที่กว้างมาก ดังนั้นหลายๆ โหมดของการสั่นจึงต้องนำมาพิจารณาเพื่อความถูกต้องของผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์

Brady, O'Brien และ Znidaric (2006) ทำการทดลองในภาคสนามให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน และทำการจำลองสะพานกับรถในรูปแบบสามมิติ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วยานพาหนะที่มีต่อค่าตัวประกอบคูณขยายเนื่องจากผลทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic amplification factor) หรือเรียกว่าค่า DAF คือค่าอัตราส่วนระหว่างผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์กับผลตอบสนองทางด้านสถิติ ดังนั้นค่า DAF จึงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) งานวิจัยนี้เริ่มด้วยการจำลองรูปแบบอย่างง่ายโดยให้น้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ผ่านสะพานช่วงเดียว (Simply supported bridge) ด้วยความเร็วกงที่ เพื่อทำการศึกษปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า DAF ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง เช่น

ความเร็วของรถบรรทุก ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ค่าความหน่วง ผลการศึกษาพบว่า แต่ละสะพานที่มีความถี่ธรรมชาติต่างกันจะเกิดค่า DAF สูงสุดที่ความเร็วต่างกัน อีกทั้งยังพบว่าความเร็วของรถบรรทุกที่สูงมากจะทำให้ช่วงเวลาที่น้ำหนักกระทำอยู่บนสะพานเป็นช่วงเวลาที่สั้นกว่าช่วงเวลาที่จะทำให้สะพานเกิดการสั่น ดังนั้นจะได้ค่า DAF ที่ต่ำ และค่าความหน่วงของสะพานที่น้อยจะทำให้เกิดค่า DAF ที่สูง หลังจากนั้นทำการทดสอบในภาคสนามโดยให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานโดยใช้รถบรรทุกสองเพลลาและสามเพลลา ทำการติดตั้งเครื่องวัดค่าความเครียดบริเวณใต้สะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง จากการทดสอบพบว่าค่า DAF ที่ได้จากรถบรรทุกสองเพลลาจะมากกว่าค่า DAF ที่ได้จากรถบรรทุกสามเพลลาเนื่องมาจากมวลของรถที่น้อยทำให้ผลตอบสนองทางด้านสถิติน้อยกว่าผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์อยู่มาก แต่เนื่องจากว่าจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีน้อยเกินไป จึงทำให้ไม่เพียงพอที่สรุปอะไรได้มากนัก ดังนั้นจึงได้มีการจำลองเป็นรูปแบบสามมิติขึ้นมาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการจำลองสะพานให้มีความถี่ธรรมชาติเหมือนสะพานจริงและจำลองพื้นผิวสะพาน จากนั้นทำการจำลองรถเป็นแบบรถสองเพลลาและสามเพลลาประกอบด้วยระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) และล้อรถซึ่งจำลองเป็นสปริงและตัวหน่วง นำเทคนิคการงานจมาใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถ จากสมการนี้ทำให้ได้แรงปฏิกริยาระหว่างล้อรถกับสะพาน นำแรงที่ได้นี้ไปกระจายลงข้อของแต่ละชิ้นส่วนแล้วใช้สมการการเคลื่อนที่หาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบสะพานจริงพบว่ามีความใกล้เคียงกันจึงสามารถหาค่า DAF ของสะพานจริงได้จากแบบจำลองสามมิตินี้ จากการหาค่า DAF ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง พบว่าขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ค่า DAF มีทั้งต่ำและสูง โดยค่า DAF สูงสุดสำหรับรถสองเพลลาจะมีค่าเท่ากับ 1.4 เกิดที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และค่า DAF สูงสุดสำหรับรถสามเพลลาจะมีค่าเท่ากับ 1.3 เกิดที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สุดท้ายเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า DAF ที่ได้จากสองผิวทางที่ต่างกันพบว่า สภาพผิวทางมีผลเป็นอย่างมากต่อค่า DAF ซึ่งจะเกิดค่าสูงสุดที่ตำแหน่งความเร็วเดียวกันคือ 50 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงสำหรับรถสองเพลลาและรถสามเพลลาตามลำดับ

Kwasniewski, Wekezer, Roufa, Li, Ducher และ Malachowski (2006) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สำหรับสะพานทั่วไป โดยมีจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ การหาตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นต่อตัวประกอบการกระแทกที่ควรจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบ โดยทำการทดลองด้วยรถบรรทุกหัวเพลลา (HS20-44) เคลื่อนที่ไปบนสะพานคอนกรีตสามช่วงโดยแต่ละช่วงยาว 21.7

เมตรและมีสองช่องทางจราจร เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจะถูกติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งที่มีความสำคัญโดยจะต้องได้ข้อมูลของสะพานและรถบรรทุกตามเวลาต่างๆที่มีความสัมพันธ์กัน เครื่องมือที่ติดตั้งจะเก็บค่าการกระจัด ความเร่งและความเครียด การทดลองทางสถิตจะให้รถบรรทุกอยู่ที่กึ่งกลางช่วงของความยาวสะพานตามรูปแบบต่างๆเพื่อหาผลตอบสนองที่กระจายลงสู่คาน (Girder) เนื่องมาจากน้ำหนักกระทำของรถบรรทุกทั้งยังนำไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบการกระแทก การทดลองทางด้านพลศาสตร์จะมีตัวแปรคือ การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกคันเดียวและสองคันสวนกัน ความเร็วของรถบรรทุกเท่ากับ 48 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความขรุขระของผิวทางที่ปกติและผิวทางที่ไม่สมบูรณ์โดยการนำแผ่นไม้มาขวาง ทำการทดลองซ้ำไปซ้ำมาเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ค่าความเร่งที่วัดได้จะนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และความถี่ธรรมชาติของสะพานจะได้เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) จากฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม ทั้งยังสามารถหารูปร่างโหมด (Mode shape) ตามความถี่ธรรมชาติเหล่านั้น จากนั้นจึงนำผลตอบสนองที่ได้ไปหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน พบว่าตัวประกอบการกระแทกของคานที่ตำแหน่งขอบของสะพานมีค่าสูงมากแต่เนื่องจากผลตอบสนองทั้งทางด้านสถิตและพลศาสตร์ที่ต่ำจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งนี้ ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงความยาวสะพานที่วัดจากค่าความเครียดถูกนำมาพิจารณาซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วและสภาพผิวทางที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงขึ้น จากนั้นทำการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภาคสนามและหาปัจจัยเพิ่มเติมที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทก พบว่าปัจจัยที่จะส่งผลต่อการสั่นของรถบรรทุกคือ ความเร็ว น้ำหนักและระบบกันสะเทือน (Suspension system) ของรถบรรทุก รวมถึงความขรุขระของผิวทาง และปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบสนองของสะพานคือ รูปแบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก จำนวนคานและระยะห่าง ความยาวช่วงของสะพาน การทดลองในภาคสนามทำให้ได้ข้อแนะนำในการลดผลกระทบจากการกระแทก เช่น การจำกัดความเร็วของรถบรรทุก การห้ามรถบรรทุกเคลื่อนที่ข้ามช่องทาง และการซ่อมแซมสภาพของผิวทาง

Li, Wekezer และ Kwasniewski (2008) ทำการทดลองต่อจากงานวิจัยในปี 2006 โดยการทดลองภาคสนามจะให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานแล้วบันทึกค่าความเครียด ความเร่งและการกระจัดของสะพาน ในการทดลองจะมีทั้งการทดลองทางด้านสถิตและการทดลองทางด้านพลศาสตร์ เพื่อประเมินค่าการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน และสร้าง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งแสดงระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานและใช้วิธีหาเชิงเลขหาผลตอบสนองของสะพานจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก นำผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการทดลองภาคสนามทั้งในโดเมนของความถี่และโดเมนของเวลาพบว่ามีความสอดคล้องกัน จึงสามารถหาค่าตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) จากแบบจำลองนี้ได้ สะพานที่ใช้ในการทดลองเป็นสะพานเดียวกันกับปี 2006 โดยเป็นสะพานสามช่วงมีความยาวช่วงละ 21.7 เมตร มีสองช่องทาง ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดบริเวณใต้คาน (Girder) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน เครื่องมือวัดการโก่งตัวของคานตัวกลางที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน และเครื่องมือวัดความเร่งที่แผ่นพื้นของสะพานและเพลาจร ลักษณะของรถบรรทุกเป็นรถเทรลเลอร์สามเพลา แต่ละเพลา มีน้ำหนัก 50, 100 และ 169 กิโลนิวตัน การทดลองทางด้านสถิติจะทำการหาผลตอบสนองที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานแล้วนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระแทก และการทดลองทางด้านพลศาสตร์จะใช้รถบรรทุก 1 และ 2 คัน เคลื่อนที่มาตามช่องทางที่ความเร็วและลักษณะผิวทางที่ต่างกันไป ลักษณะผิวทางที่ไม่ดีจะใช้แผ่นไม้มาขวางผิวทางไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพาน ในแต่ละครั้งของการทดลองจะเก็บค่าความเครียด ความเร่งและการกระจัดของสะพานตามช่วงเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน ทำให้สามารถหาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าปัจจัยการกระแทก นอกจากนี้ค่าความถี่ธรรมชาติ รูปร่างโหมดและความหน่วงของสะพานจะสามารถหาค่าความถี่ที่เก็บข้อมูลมาได้ จากนั้นเป็นส่วนของการสร้างแบบจำลองแสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน เพื่อศึกษาผลจากตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าตัวประกอบการกระแทก โดยทำการจำลองรถบรรทุกเป็นสามมิติประกอบด้วยมวล สปริง และตัวหน่วงซึ่งมี 11 องศาอิสระ เพื่อสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก และจำลองสะพานเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน เนื่องจากแรงปฏิริยาระหว่างรถบรรทุกกับสะพานทำให้สามารถสร้างสมการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ทำการแก้สมการหาผลตอบสนองโดยใช้วิธีเชิงเลข พบว่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดที่ได้จากการทดลองในภาคสนามกับแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน ผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองในภาคสนามกับแบบจำลองที่ความเร็วรถบรรทุก 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมงมีความสอดคล้องกันดี แต่ที่ความเร็วรถบรรทุก 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากในการทดลองภาคสนามล้อรถจะไม่ได้สัมผัสกับผิวทางตลอดเวลาที่ความเร็วสูงและเนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่ายจึงไม่ได้คำนึงถึงเรื่องนี้ อย่างไรก็ตามผลตอบสนองสูงสุดยังมีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบการกระแทกได้ซึ่งจะหาจากผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติและ

ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ การจำลองสภาพของผิวทางจะใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) จากการศึกษาดัชนีประกอบการกระแทกจากการโก่งตัวของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วงพบว่า ผลของความเร็วดังกล่าวต่อตัวประกอบการกระแทกจะมีมากในสภาพผิวทางที่แฉะโดยจะแปรผันตามกัน ตัวประกอบการกระแทกที่ได้ในหลายกรณีโดยเฉพาะเมื่อผิวทางไม่ได้จัดอยู่ในสภาพที่ดีจะมีค่าเกิน 0.3 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดโดย AASHTO และตัวประกอบการกระแทกจากการโก่งตัวจะสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกจากโมเมนต์ดัดซึ่งความแตกต่างนี้จะน้อยลงเมื่อน้ำหนักของรถบรรทุกมากขึ้น

Rattigan, Obrien และ Gonzalez (2008) ทำการสร้างแบบจำลองของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน เพื่อหาตัวประกอบคูณขยายเนื่องจากผลทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic amplification factor) หรือเรียกว่าค่า DAF งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองของรถบรรทุก แบบจำลองของสภาพพื้นผิวสะพาน และแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่แสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆอีกมากมายที่อาจจะส่งผลต่อค่า DAF เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกนำไปใช้ในการออกแบบมีความถูกต้องยิ่งขึ้น สะพานที่นำมาจำลองเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสะพานช่วงเดียวที่มีความยาว 32 เมตร มี 2 ช่องทางจราจร ซึ่งมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการติดตั้งเครื่องวัดความเครียดไว้ที่สะพานจริง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแบบจำลอง จำลองรถบรรทุกโดยให้ล้อและระบบกันสะเทือน (Suspension system) เป็นระบบสปริง-ตัวหน่วง (Spring dashpot system) ซึ่งจะมีทั้งรถบรรทุก 2, 3 และ 5 เพลา วิเคราะห์ผลตอบสนองของสะพานภายใต้รูปแบบการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกที่ต่างกันไปรวมทั้งรูปแบบของการเคลื่อนที่ที่น่าจะทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุดเช่นรถบรรทุกสวนกันที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยต้องหาผลตอบสนองที่เป็นไปได้ทั้งหมดในทุกๆ ตำแหน่งทั้งตามขวางและตามยาวของสะพานและหาความสำคัญของตัวแปรต่างๆเช่น ความเร็วของรถบรรทุก น้ำหนักของรถบรรทุก ที่มีต่อค่า DAF จากนั้นจำลองความขรุขระของผิวทางตามฟังก์ชันความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) แล้วสร้างระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกคันเดียวไปบนสะพานพบว่า ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระยะ 21 เมตรจากตำแหน่งเริ่มต้นของสะพานและค่า DAF ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจากรถบรรทุก 3 เพลาจะสูงกว่าค่าจากรถบรรทุก 5 เพลาโดยทั้งสองกรณีจะเกิดค่า DAF สูงสุดที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนผลการวิเคราะห์ของรถบรรทุก 5 เพลาเคลื่อนที่สวนกันบริเวณกึ่งกลางสะพานพบว่า ที่กึ่งกลาง

สะพานซึ่งความขรุขระของผิวทางอยู่ในสภาพดีจะมีค่า DAF มากกว่าค่าที่ได้จากมาตรฐานสำหรับ สะพานช่วงเดี่ยวยาว 32 เมตร

Shi, Cai และ Chen (2008) ได้สร้างแบบจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นระบบ ปฏิสัมพันธ์กันเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น โดยศึกษา ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานเนื่องจากความยาวช่วงที่ต่างกัน ภายใต้ความเร็วและ สภาพพื้นผิวต่างๆโดยจะหาความเร็วที่จะทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุด ทั้งยังมีการพิจารณารอย แยกระหว่างแผ่นพื้นว่าจะมีผลต่อสะพานอย่างไรซึ่งพบว่าจะมีผลอย่างมากในสะพานที่มีความ ยาวช่วงสั้น รถบรรทุกสามเพลาถูกจำลองให้ล้อรถและระบบกันสะเทือน (Suspension system) เป็นสปริงและตัวหน่วงที่มี 11 องศาอิสระ จากนั้นจึงจำลองสะพานเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้าง ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของรถบรรทุกและการกระจัดของสะพาน ทำให้ได้สมการการ เคลื่อนที่แสดงระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ในการวิเคราะห์จะแยกเป็นแต่ละ โหมดตามความถี่ธรรมชาติของสะพาน การจำลองสภาพพื้นผิวจะใช้ฟังก์ชันความหนาแน่น พลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ทั้งยังมีการพิจารณารอยแยกระหว่างแผ่นพื้น จากการศึกษาค้นคว้าผลของความเร็วรถบรรทุกที่มีต่อการกระจัดที่กึ่งกลางสะพานความยาวช่วง 8 เมตร พบว่า ความเร็วที่สูงขึ้นอาจจะไม่ได้ทำให้การกระจัดมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในกรณีนี้การกระจัดจะ มากที่สุดที่ความเร็วเท่ากับ 40 เมตรต่อวินาทีโดยส่วนใหญ่จะถูกกระตุ้นในโหมดที่ 1 ของสะพาน แต่ถ้าสะพานมีความยาวช่วงที่ต่างกันทำให้ความถี่ธรรมชาติต่างกันเพราะฉะนั้นความเร็วที่ทำให้ เกิดการกระจัดสูงสุดจึงต่างกันซึ่งความเร็วนี้อาจจะไม่ได้ทำให้เกิดความเร่งสูงสุดที่กึ่งกลางสะพาน โดยความเร่งของสะพานจะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก จากนั้นทำการศึกษาค้นคว้าผลของรอย แยกระหว่างแผ่นพื้นที่มีต่อการกระจัดและความเร่งที่กึ่งกลางสะพานความยาวช่วง 8 เมตรพบว่า ถ้าความต่างระดับที่รอยแยกระหว่างแผ่นพื้นมากขึ้นจะส่งผลให้การกระจัดและความเร่งของ สะพานมากขึ้น ทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้นด้วย จากนั้นทำการศึกษาค้นคว้าผลของ ความขรุขระของผิวทางพบว่า ยิ่งผิวทางมีความขรุขระมากจะทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากไป ด้วย ทั้งยังได้ว่ายิ่งสะพานมีความยาวช่วงมากจะทำให้ค่าตัวประกอบการกระแทกลดลง ซึ่งตัว ประกอบการกระแทกในงานวิจัยนี้พบว่ามีหลายกรณีที่จะมากกว่าค่าตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

Moghimi และ Ronagh (2008) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ายอมให้ของน้ำหนัก พลศาสตร์ (Dynamics load allowance) หรือค่า DLA ซึ่งคล้ายกับตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) โดยการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นแบบสามมิติ แล้วใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

มาวิเคราะห์ งานวิจัยนี้เริ่มด้วยการหาค่า DLA ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วงด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยตรงจากการจำลองอย่างง่าย โดยให้สะพานเป็นคานช่วงเดียว และมีน้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ไปตามคานด้วยความเร็วคงที่ จะได้ว่าค่า DLA จะแปรผันตามความเร็ว แต่ในกรณีที่มีการคิดมวลของรถบรรทุกจะได้ว่า ค่า DLA จะขึ้นอยู่กับความเร็ว มวลของรถบรรทุก และสะพาน ความถี่ และระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) จากนั้นทำการจำลองสะพานและรถบรรทุกเป็นแบบสามมิติ โดยเป็นสะพานช่วงเดียวประกอบด้วยคาน (Girder) 5 ตัวที่มีอยู่ในประเทศอิหร่าน พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของรถบรรทุกจะมี 2 ส่วนคือ การสั่นของมวลเหนือระบบกันสะเทือนของรถ และการสั่นของเพลานี้เนื่องมาจากความขรุขระของผิวทาง ความขรุขระนี้ได้สร้างมาจากวิธีความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) แก่สมการการเคลื่อนที่โดยวิธี Direct integration ได้ผลตอบสนองที่คาน นำไปใช้ในการหาค่า DLA ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง ทำให้ได้ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อค่า DLA เป็นดังนี้

- ความเร็วของรถบรรทุกมีผลต่อเวลาที่รถอยู่บนสะพาน นอกจากนั้นความเร่งของสะพานยังแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก และพบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงปฏิกริยาระหว่างล้อรถและสะพานเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่โหมดต่างๆจะถูกกระตุ้นที่ความเร็วต่างกัน จึงสรุปได้ว่าค่า DLA จะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุก

- ความยาวช่วงของสะพานจะแปรผกผันกับค่า DLA

- มวลของรถบรรทุกจะแปรผกผันกับค่า DLA เนื่องจากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ไม่เกี่ยวข้องกับความยาวของรถบรรทุก แต่ผลตอบสนองทางสถิติจะแปรผันตามมวลของรถบรรทุก

- ถ้ารถบรรทุกเคลื่อนที่ไปตามกึ่งกลางของความกว้างสะพาน จะทำให้ได้ค่า DLA สูงสุด

- ความขรุขระของผิวถนนที่เชื่อมต่อกับสะพาน ทำให้รถเกิดการสั่นเริ่มต้นก่อนที่จะเข้าสู่สะพาน แต่พลังงานส่วนนี้ก็จะถูกสลายไปในเวลาอันสั้น จึงมีผลต่อสะพานในช่วงเวลาอันสั้น อาจทำให้เกิดค่า DLA ที่สูงบริเวณใกล้ๆทางเข้า

Deng และ Cai (2010) ได้จำลองโครงสร้างสะพานเป็นแบบสามมิติ เพื่อจะหาตัวประกอบการกระแทก (Impact factor) โดยต้องการศึกษาผลกระทบต่อค่าตัวประกอบการกระแทก อันเนื่องมาจากความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และสภาพพื้นผิวของสะพาน ซึ่งที่ผ่านมาพบว่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้โดยวัดจากสะพานจริง จะมีค่ามากกว่าค่าที่

ระบุไว้ในมาตรฐานของ AASHTO โดยสาเหตุหลักมาจากการเสื่อมสภาพของสะพานโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่พื้นผิวของสะพาน งานวิจัยนี้จึงต้องการหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างสะพานทั้งเก่าและใหม่ เริ่มต้นด้วยการจำลองโครงสร้างสะพานโดยใช้โปรแกรม ANSYS เป็นแบบสามมิติ 5 ตัวอย่างที่มีความยาวช่วงต่างกัน มีลักษณะเป็น 2 ช่องทางจราจร ประกอบด้วยคาน (Girder) 5 ตัว ซึ่งมีลักษณะเหมือนสะพานที่มีอยู่จริงในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ก็ได้ทำการจำลองรถบรรทุกเป็นแบบสามเพลา โดยแต่ละเพลาประกอบด้วยระบบกันสะเทือนของรถ (Suspension system) จากนั้นใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถ โดยสิ่งที่สัมพันธ์กันก็คือแรงคู่ปฏิกิริยาระหว่างสะพานกับรถ 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 นำผลที่ได้นี้ไปหาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวช่วง โดยงานวิจัยนี้จะหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากระยะโค้งตัว เนื่องจากจะทำให้ได้ตัวประกอบการกระแทกที่มีค่ามากที่สุด ผลจากการวิจัยพบว่า สะพานที่มีความยาวช่วงสั้น และสะพานที่มีอายุมากซึ่งมีสภาพพื้นผิวแย่ จะได้ตัวประกอบการกระแทกสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน AASHTO กำหนด โดยพบว่าสภาพพื้นผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญ ในปัจจุบันมาตรฐาน AASHTO กำหนดค่าตัวประกอบการกระแทกให้ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงของสะพานเท่านั้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึงเช่น สภาพของผิวทาง ลักษณะของรถและสภาพการจราจร

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีทั้งการทดสอบในภาคสนามและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง ซึ่งพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกคือ ความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วของรถบรรทุก และความขรุขระของผิวทาง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะแสดงให้เห็นว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุกและความขรุขระของผิวทาง และค่าตัวประกอบการกระแทกจะแปรผกผันกับความยาวช่วงของสะพาน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่อาจส่งผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกได้แก่ ลักษณะของรถบรรทุกคือ ระบบกันสะเทือน จำนวนเพลา น้ำหนัก ความถี่ธรรมชาติ การสั่นเริ่มต้น และลักษณะของสะพานคือ สติฟเนส ความถี่ธรรมชาติ ความหน่วง ทั้งยังพบว่าตัวประกอบการกระแทกจากหลายๆกรณีในงานวิจัยที่

ผ่านมากจะมากกว่าค่าที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามก็ดีทุกงานวิจัยที่ผ่านมากจะจำกัดความสนใจเฉพาะตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของสะพานเท่านั้น

1.3 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อตัวประกอบการกระทำ รวมถึงผลจากสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก
- 2) เพื่อศึกษาตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งต่างๆบนคานสะพาน

1.4 ขอบเขต

- 1) พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานที่มีลักษณะเป็นคานช่วงเดียว (Simply supported beam) ในระนาบสองมิติที่มีการกระจายของมวลและความแข็งแกร่งอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาว
- 2) พิจารณาการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานและรถบรรทุกในช่วงเวลาเชิงเส้น
- 3) ในการวิเคราะห์มีสมมติฐานว่าล้อรถบรรทุกสัมผัสกับพื้นผิวของสะพานตลอดเวลา
- 4) พิจารณาเป็นรถบรรทุกสองเพลลาที่มีสี่ล้อหรือสี่และเป็นน้ำหนักกระทำแบบจุดสองจุดเคลื่อนที่ไปบนสะพาน
- 5) รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานมีเพียงคันเดียวและมีความเร็วคงที่
- 6) ศึกษาตัวประกอบการกระทำที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดของสะพาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพานจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก
- 2) เพื่อเปรียบเทียบตัวประกอบการกระทำ ณ ตำแหน่งต่างๆตามความยาวสะพาน
- 3) เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวประกอบการกระทำ
- 4) สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบสะพานให้มีความถูกต้องและปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.6 การดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรวมไปถึงงานวิจัยที่ผ่านมาและความเป็นไปได้ของหัวข้อวิทยานิพนธ์
- 2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน
- 3) สร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
- 4) จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 5) ทำการศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของสะพานเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น
- 6) ทำการหาค่าตัวประกอบการกระแทกจากแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆตามความยาวของสะพานภายใต้ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง
- 7) วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการศึกษา
- 8) จัดทำวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) และการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ในส่วนแรกนั้นจะกล่าวถึงนิยามของตัวประกอบการกระทบและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่สองจะนำข้อมูลลักษณะของรถบรรทุกและสะพานไปสร้างแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของระบบรถบรรทุกและระบบสะพาน จากนั้นรวมผลของสองระบบทำให้ได้ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์หาผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว ก็จะสามารถนำไปหาค่าตัวประกอบการกระทบ

2.1 ตัวประกอบการกระทบ

โดยทั่วไปในการออกแบบสะพานจะต้องคำนึงถึงผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์จากรถบรรทุกที่เคลื่อนผ่าน โดยผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์นี้จะถูกพิจารณาให้เป็นผลตอบสนองทางด้านสถิติที่เพิ่มขึ้นโดยการคูณด้วยตัวประกอบการกระทบ (Impact factor) โดยตัวประกอบการกระทบจะได้จากผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์และผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติของสะพาน ซึ่งนำเสนอการเพิ่มขึ้นของผลตอบสนองจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

2.1.1 นิยาม

ตัวประกอบการกระทบจะหาได้จากผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์และผลตอบสนองทางด้านสถิติ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.1 จากงานวิจัยของ Lu Deng (2010)

$$I(x) = \frac{R_d(x) - R_s(x)}{R_s(x)} \quad (2.1)$$

โดยที่

$I(x)$ คือ ตัวประกอบการกระทบที่ตำแหน่ง x ไตปูนคานสะพาน

$R_d(x)$ คือ ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ที่ตำแหน่ง x ไตปูนคานสะพาน

$R_s(x)$ คือ ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติที่ตำแหน่ง x ไตปูนคานสะพาน

2.1.2 มาตรฐานเกี่ยวกับตัวประกอบการกระแทก

จากงานวิจัยของ Moghimi (2008) มาตรฐานต่างๆที่ใช้ในการออกแบบสะพาน ได้กำหนดตัวประกอบการกระแทกตามความยาวช่วงของสะพานและความถี่ธรรมชาติของสะพานไว้ดังสมการต่อไปนี้

มาตรฐานการทางสหรัฐอเมริกา (AASHTO)

$$I = \frac{50}{L(ft) + 125} = \frac{15.24}{L(m) + 38.1} \leq 0.3 \quad (2.2)$$

L คือ ความยาวช่วงของสะพานในหน่วยฟุตหรือเมตร

มาตรฐานการออกแบบของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Specification for Highway Bridge)

$$I = \frac{20}{L(m) + 50} \quad (2.3)$$

L คือ ความยาวช่วงของสะพานในหน่วยเมตร

มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศเยอรมัน (West German code)

$$I = 0.4 - 0.008L(m) \quad (2.4)$$

L คือ ความยาวช่วงของสะพานในหน่วยเมตร

มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศฝรั่งเศส (French Cahier des Prescription)

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

$$I = \frac{0.80}{0.2L(m) + 1} \leq 0.4 \quad (\text{Steel and composite bridge}) \quad (2.5)$$

L คือ ความยาวช่วงของสะพานในหน่วยเมตร

มาตรฐานการออกแบบสะพานของประเทศอิตาลี (Italian code)

$$I = \frac{(100 - L(m))^2}{100(250 - L(m))} \geq 0 \quad (2.6)$$

L คือ ความยาวช่วงของสะพานในหน่วยเมตร

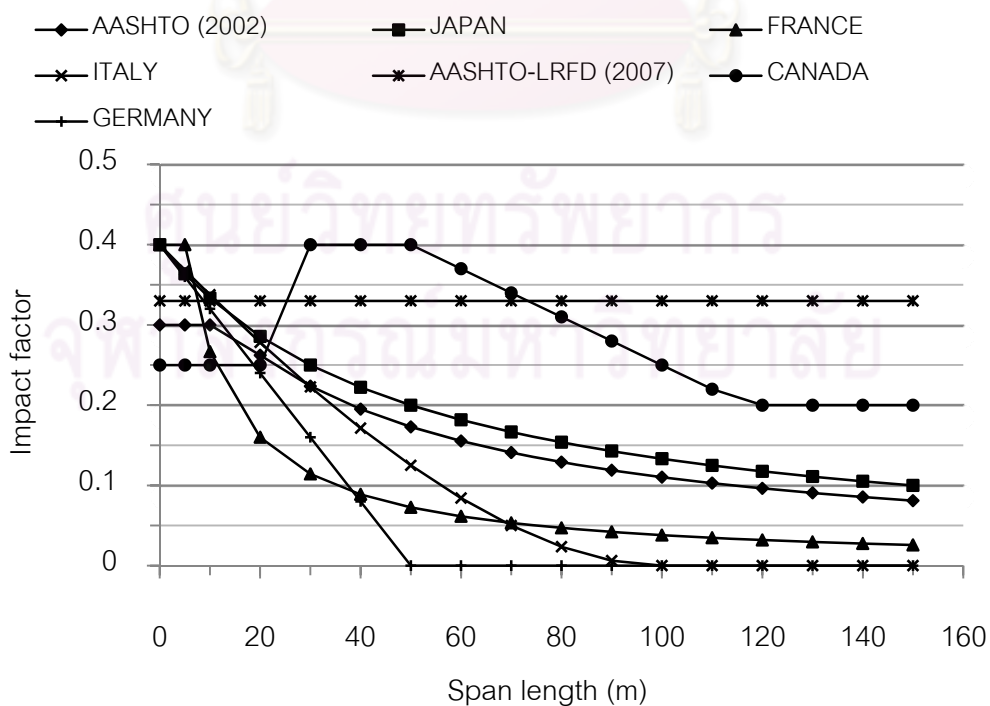
มาตรฐาน OHBD ของประเทศแคนาดา (Ontario Highway Bridge Design code)

$$\begin{aligned} I &= 0.2 & f &\leq 1 \text{ Hz} \\ &= 0.4 & 2.5 \text{ Hz} &\leq f \leq 4.5 \text{ Hz} \\ &= 0.25 & f &\geq 6 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2.7)$$

f คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานในหน่วยเฮิรตซ์

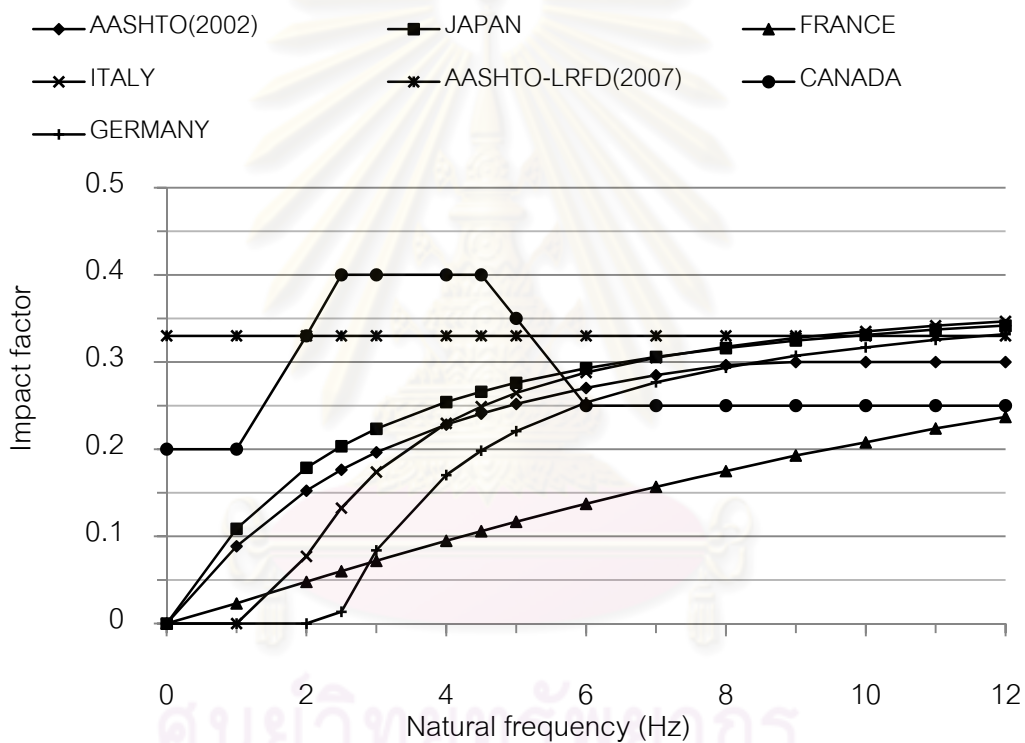
มาตรฐานต่างๆยกเว้นมาตรฐานของแคนาดาจะให้สูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพาน แต่มาตรฐานของแคนาดาจะให้ตัวประกอบการกระแทกตามความถี่ธรรมชาติของสะพานซึ่งสามารถแปลงเป็นความยาวช่วงสะพานดังสมการ 2.8 จากงานวิจัยของ Chaallal (1998) ทำให้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานต่างๆกับความยาวช่วงสะพานดังแสดงในรูปที่ 2.1

$$f = 82L^{-0.9} \quad (2.8)$$



ภาพที่ 2.1 ตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละความยาวช่วงตามมาตรฐานต่างๆ (Moghimi, 2008)

การแปลงความถี่ธรรมชาติตามมาตรฐานของแคนาดาให้เป็นความยาวช่วงสะพานดังสมการที่ 2.8 มีสมมติฐานว่า ความถี่ธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับความยาวช่วงสะพานเท่านั้น โดยมวลและสติฟเนสของสะพานที่แต่ละความยาวช่วงมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่ส่งผลมากนักต่อความถี่ธรรมชาติสะพาน นอกจากนี้ยังได้ทำการแปลงความยาวช่วงสะพานเป็นความถี่ธรรมชาติของสะพานสำหรับมาตรฐานต่างๆยกเว้นมาตรฐานแคนาดาโดยอาศัยสมมติฐานเดียวกัน ทำให้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการระเหกจากมาตรฐานต่างๆกับความถี่ธรรมชาติของสะพานดังแสดงในรูปที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ตัวประกอบการระเหกที่แต่ละความถี่ธรรมชาติตามมาตรฐานต่างๆ (Moghipi, 2008)

2.2 ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบสะพาน โดยทั่วไปแล้วจะมีสองวิธีในการจำลองระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน วิธีแรกคือวิธีการวนซ้ำแบบแยกจากกัน (Uncoupled iteration method) โดยรถบรรทุกและสะพานจะถูกแก้ปัญหาโดยแยกออกจากกัน แล้วใช้กระบวนการทำซ้ำในแต่ละช่วงเวลาเพื่อที่จะหาสมมูลของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกและสะพาน อีกวิธีก็คือ

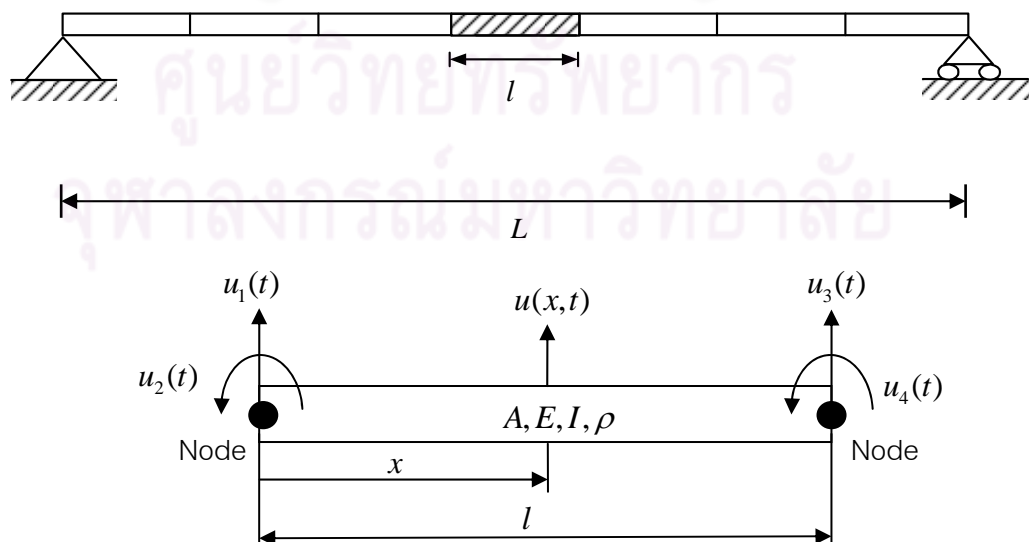
จำลองการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยที่การจำลองดังกล่าวจะแก้ปัญหาของรถบรรทุกกับสะพานไปพร้อมกัน ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถรวมสะพาน และรถบรรทุกให้เป็นระบบควบคู่ระบบเดียวซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้พร้อมกันในแต่ละช่วงเวลาโดยไม่ต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ

2.2.1 การจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับรถบรรทุก สามารถถูกจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบแยกโหมด (Modal decomposition) แต่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสมในผลตอบสนองทางพลศาสตร์ นอกจากนี้วิธีนี้ใช้พื้นฐานจากระบบต่อเนื่อง (Continuous system) และเทคนิคการรวมโหมด (Mode superposition technique) ซึ่งยากแก่การนำมาประยุกต์ใช้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ด้วยระบบแยกส่วน (Discrete system) ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้

2.2.2 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน

โครงสร้างสะพานถูกพิจารณาเป็นสะพานช่วงเดียวและแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นชิ้นส่วนคาน 2 ขั้ว (Node) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 แต่ละขั้วของชิ้นส่วนคานจะมี 2 องศาอิสระ (Degree of freedom) คือ การกระจัดในแนวตั้งและการหมุน



ภาพที่ 2.3 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 ใดๆ โดยที่จะต้องสอดคล้องกับสมการของคานที่ตำแหน่ง x และที่เวลา t ดังแสดงในสมการ 2.9

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (2.9)$$

สำหรับในกรณี EI มีค่าคงที่ สมการ 2.9 จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} = 0 \quad (2.10)$$

ซึ่งสามารถหาปริพันธ์ (Integrate) ได้เป็น

$$u(x,t) = c_1(t)x^3 + c_2(t)x^2 + c_3(t)x + c_4(t) \quad (2.11)$$

โดยที่ $c_i(t)$ คือ ค่าคงที่ของการหาปริพันธ์

สมการ 2.11 สามารถใช้ในการประมาณค่าการกระจัดในแนวดิ่งของชิ้นส่วนคานได้ ซึ่งมีเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary condition) ดังนี้

$$\begin{aligned} u(0,t) &= u_1(t) & u(l,t) &= u_3(t) \\ \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} &= u_2(t) & \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} &= u_4(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นเมื่อแทนลงในสมการ 2.11 จะสามารถหาค่าคงที่ของการหาปริพันธ์ได้ คือ

$$c_4(t) = u_1(t)$$

$$c_3(t) = u_2(t)$$

$$\begin{aligned}
 c_2(t) &= \frac{1}{l^2} [3(u_3 - u_1) - l(2u_2 + u_4)] \\
 c_1(t) &= \frac{1}{l^3} [2(u_1 - u_3) + l(u_2 + u_4)]
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

แทนสมการ 2.13 ลงในสมการ 2.11 และทำการจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของการกระจัดเชิงขั้ว (Nodal displacement) จะได้สมการการกระจัดในแนวตั้งของชิ้นส่วนคานที่ระยะ x และเวลา t ใดๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u(x,t) &= \left[1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \right] u_1(t) + l \left[\frac{x}{l} - \frac{2x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right] u_2(t) \\
 &+ \left[\frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \right] u_3(t) + l \left[-\frac{x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right] u_4(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

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

เมทริกซ์มวล (Mass matrix) ของชิ้นส่วนคานสามารถคำนวณได้จากการแทนสมการ 2.14 ลงไปใน สมการของพลังงานจลน์ (Kinetic energy)

$$T(t) = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left[\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right]^2 dx
 \tag{2.15}$$

และสมการ 2.15 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของการกระจัดเชิงขั้วคือ

$$T(t) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{u}}
 \tag{2.16}$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix}
 \tag{2.17}$$

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

$$\mathbf{M} = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ในทำนองเดียวกัน สามารถหาเมทริกซ์สติฟเนส (Stiffness matrix) ได้จากการแทนสมการ 2.14 ลงในสมการพลังงานความเครียด (Strain energy) 2.19

$$V(t) = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left[\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right]^2 dx \quad (2.19)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของการกระจัดเชิงขั้วได้เป็น

$$V(t) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (2.20)$$

โดยที่ \mathbf{u} ได้กำหนดไว้ในสมการ 2.17 ดังนั้นเมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนคานคือ

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

เมื่อได้เมทริกซ์มวลและเมทริกซ์สติฟเนสของแต่ละชิ้นส่วนคานแล้ว จึงรวมชิ้นส่วนคานแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันตามองศาอิสระที่ตรงกัน ซึ่งจะได้เมทริกซ์มวล และเมทริกซ์สติฟเนสของระบบ

เมทริกซ์ความหน่วงของสะพานสามารถสังเคราะห์ได้โดยพิจารณาการสั่นอิสระของระบบดังแสดง

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (2.22)$$

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

$$\ddot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u} = 0 \quad (2.23)$$

โดยที่

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

แปลงเวกเตอร์การเคลื่อนที่ชั่ว \mathbf{u} ให้เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนที่ในพิกัดเชิงโหมด

$$\mathbf{u} = \mathbf{V}\mathbf{q} \quad (2.24)$$

โดยที่

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

\mathbf{q} คือ เวกเตอร์การเคลื่อนที่ในพิกัดเชิงโหมด

แทนสมการ 2.24 ลงในสมการ 2.23 และคูณตลอดด้วย \mathbf{V}^{-1} จะได้

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{C}}\mathbf{V}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{K}}\mathbf{V}\mathbf{q} = 0 \quad (2.25)$$

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^*\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^*\mathbf{q} = 0 \quad (2.26)$$

โดยที่

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

$$= \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

สมมติให้เมทริกซ์ \mathbf{C}^* มีคุณสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonality) เช่นเดียวกับ

\mathbf{K}^* จะได้

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{V}^{-1}\bar{\mathbf{C}}\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\xi_2\omega_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 2\xi_n\omega_n \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

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

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{V}\mathbf{C}^*\mathbf{V}^{-1} \quad (2.29)$$

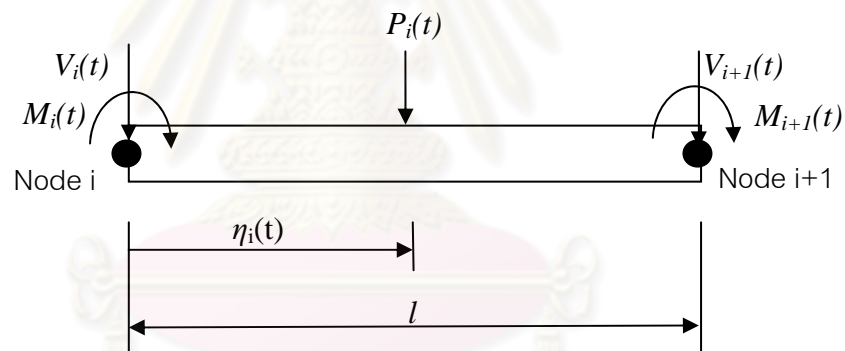
$$\mathbf{C} = \mathbf{M}\bar{\mathbf{C}} \quad (2.30)$$

จากสมการข้างต้นหากกำหนดให้ระบบสมการอธิบายเฉพาะส่วนการเคลื่อนที่ของสะพาน ก็จะสามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{U}(t) = \mathbf{P}_b(t) \quad (2.31)$$

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 2.4 แรงกระทำที่ขั้วซึ่งแปลงจากแรงกระทำภายนอก

จากภาพที่ 2.4 แรงกระทำภายนอกของสะพานคือแรงปฏิกิริยาที่ถูกแปลงเป็นแรงกระทำที่ขั้วขององศาอิสระของสะพานโดยที่ $\eta_i(t)$ คือ ระยะจากขั้วซ้ายของชิ้นส่วนคานถึงตำแหน่งของแรงกระทำ $P_i(t)$ ดังนั้นแรงกระทำที่ขั้วสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_i(t) = \left(1 - \frac{3\eta_i(t)^2}{l^2} + \frac{2\eta_i(t)^3}{l^3} \right) P_i(t)$$

$$M_i(t) = \left(\eta_i(t) - \frac{2\eta_i(t)^2}{l} + \frac{\eta_i(t)^3}{l^2} \right) P_i(t)$$

$$\begin{aligned}
 V_{i+1}(t) &= \left(\frac{3\eta_i(t)^2}{l^2} - \frac{2\eta_i(t)^3}{l^3} \right) P_i(t) \\
 M_{i+1}(t) &= \left(\frac{\eta_i(t)^3}{l^2} - \frac{\eta_i(t)^2}{l} \right) P_i(t)
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

โดยที่

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

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

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

$$\mathbf{H}_j = \left\{ \left[1 - 3\left(\frac{\eta}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{\eta}{l}\right)^3 \right] \left[\eta\left(\frac{\eta}{l} - 1\right)^2 \right] \left[3\left(\frac{\eta}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{\eta}{l}\right)^3 \right] \left[\eta\left(\frac{\eta}{l}\right)^2 - \frac{\eta}{l} \right] \right\}^T \tag{2.33}$$

โดยที่ฟังก์ชันพื้นฐานของแรงกระทำภายนอกในพิกัดครอบคลุม (Global external load shape function) สมการ 2.33 สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$\mathbf{H}_c = \left\{ \begin{array}{cccccccc} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{H}_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \mathbf{H}_i & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \mathbf{H}_M & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{array} \right\}^T \tag{2.34}$$

โดยที่

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

N คือ จำนวนขององศาอิสระของสะพานหลังจากการพิจารณาภาวะเงื่อนไขขอบเขต

M คือ จำนวนของแรงกระทำภายนอก

จากสมการที่ 2.34 แรงปฏิกริยาระหว่างสะพานกับรถบรรทุกสามารถแปลงเป็นแรงกระทำที่ข้อ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ข้อ (Nodal load) และแรงกระทำในพิกัดครอบคลุม (Global load) ดังนี้

$$\mathbf{P}_b(t) = \mathbf{H}_c(x(t)) \cdot \mathbf{P}_{int}(t) \tag{2.35}$$

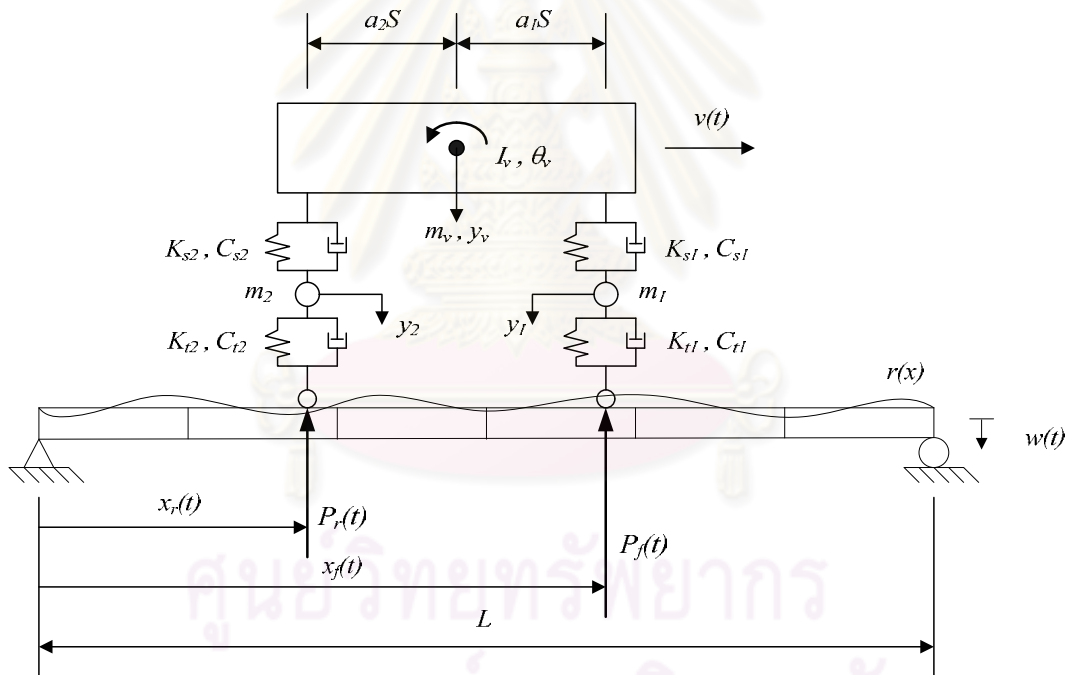
โดยที่ $\mathbf{P}_{int}(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_M(t)\}^T$ (2.36)

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

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของสะพานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{U}(t) = \mathbf{H}_c(x(t)) \mathbf{P}_{int}(t) \quad (2.37)$$

2.2.3 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก



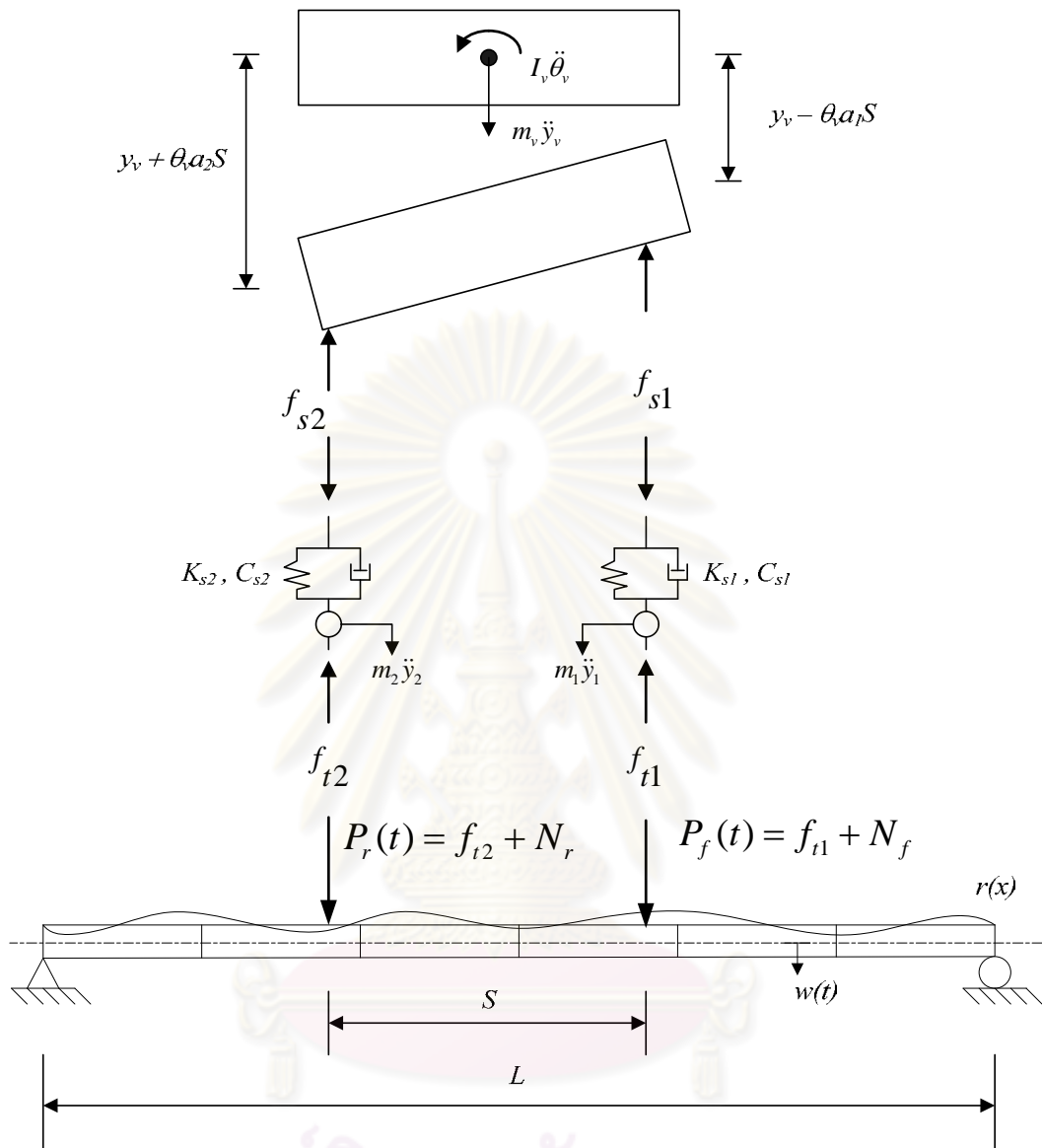
ภาพที่ 2.5 แบบจำลองรถบรรทุก

ภาพที่ 2.5 แสดงแบบจำลองรถบรรทุกกับสะพาน ซึ่งรถบรรทุกแล่นข้ามสะพานด้วยความเร็ว $v(t)$ แบบจำลองรถบรรทุกมี 4 องศาอิสระประกอบด้วย 3 องศาอิสระสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งคือ การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเพลลาหน้า การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของเพลลาหลัง การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวลรถ และ 1 องศาอิสระสำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุนของมวลรถ

โดยสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ระบบสมการทางด้านพลศาสตร์ของรถบรรทุกในแต่ละองศาอิสระดังแสดงในภาพที่ 2.6

โดยที่	m_v	คือ มวลของรถบรรทุก
	I_v	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยมวลหมุนของรถบรรทุก
	m_1	คือ มวลของระบบกันสะเทือนเพลาหน้า
	m_2	คือ มวลของระบบกันสะเทือนเพลาหลัง
	K_{s1}, K_{s2}	คือ สติฟเนสของระบบกันสะเทือนเพลาหน้าและหลัง
	C_{s1}, C_{s2}	คือ ความหน่วงของระบบกันสะเทือนเพลาหน้าและหลัง
	K_{t1}, K_{t2}	คือ สติฟเนสของล้อหน้าและหลัง
	C_{t1}, C_{t2}	คือ ความหน่วงของล้อหน้าและหลัง
	S	คือ ระยะระหว่างเพลา
	L	คือ ความยาวช่วงของสะพาน
	$x_f(t), x_r(t)$	คือ ตำแหน่งของเพลาหน้าและหลังที่เวลา t ใดๆ
	$P_f(t), P_r(t)$	คือ แรงของเพลาหน้าและหลังที่เวลา t ใดๆ
	v	คือ ความเร็วรถบรรทุก
	θ_v	คือ การหมุนของมวลรถบรรทุก
	y_v	คือ การกระจัดในแนวตั้งของรถบรรทุก
	y_1, y_2	คือ การกระจัดในแนวตั้งของเพลาหน้าและหลัง
	$w(t)$	คือ การแอ่นตัวพลศาสตร์ในแนวตั้งของสะพาน
	$r(x)$	คือ ความขรุขระของพื้นถนนที่ตำแหน่ง x
	a_1, a_2	คือ อัตราส่วนระหว่างระยะจากศูนย์กลางของรถบรรทุก

ถึงเพลาหน้าและเพลาหลังกับระยะระหว่างเพลา



ภาพที่ 2.6 แผนภาพอิสระของรถบรรทุกกับสะพาน

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่งที่มวลรถบรรทุก

$$\sum F = m_v \ddot{y}_v \quad ; \quad -f_{s1} - f_{s2} = m_v \ddot{y}_v \quad (2.38)$$

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} ลงในสมการ 2.39 ได้สมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของ

รถบรรทุก

$$\begin{aligned}
& m_v \ddot{y}_v + (C_{s1} + C_{s2}) \dot{y}_v + (K_{s1} + K_{s2}) y_v \\
& + (-C_{s1} a_1 S + C_{s2} a_2 S) \dot{\theta}_v + (-K_{s1} a_1 S + K_{s2} a_2 S) \theta_v \\
& + (-C_{s1}) \dot{y}_1 + (-K_{s1}) y_1 + (-C_{s2}) \dot{y}_2 + (-K_{s2}) y_2 = 0
\end{aligned} \tag{2.39}$$

พิจารณาการหมุนของมวลที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง

$$\sum M_c = I_v \ddot{\theta}_v \quad ; \quad f_{s1} a_1 S - f_{s2} a_2 S = I_v \ddot{\theta}_v \tag{2.40}$$

แทนค่า f_{s1}, f_{s2} ลงในสมการ 2.41 ได้สมการการเคลื่อนที่แบบหมุนของ
รถบรรทุก

$$\begin{aligned}
& I_v \ddot{\theta}_v + (-C_{s1} a_1 S + C_{s2} a_2 S) \dot{y}_v + (-K_{s1} a_1 S + K_{s2} a_2 S) y_v \\
& + (C_{s1} a_1^2 S^2 + C_{s2} a_2^2 S^2) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1^2 S^2 + K_{s2} a_2^2 S^2) \theta_v \\
& + (C_{s1} a_1 S) \dot{y}_1 + (K_{s1} a_1 S) y_1 + (-C_{s2} a_2 S) \dot{y}_2 + (-K_{s2} a_2 S) y_2 = 0
\end{aligned} \tag{2.41}$$

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่งของมวล m_1 (ส่วนของล้อหน้า)

$$\sum F = m_1 \ddot{y}_1 \quad ; \quad f_{s1} - f_{t1} = m_1 \ddot{y}_1 \tag{2.42}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
f_{t1} &= K_{t1} (y_1 - \Delta_1) + C_{t1} (\dot{y}_1 - \dot{\Delta}_1) \\
\Delta_1 &= (w_1(x_f(t), t) + r(x_f(t))) \\
\dot{\Delta}_1 &= (\dot{w}_1(x_f(t), t) + \dot{r}(x_f(t)))
\end{aligned} \tag{2.43}$$

แทนค่า f_{s1}, f_{t1} ลงในสมการ 2.42 ได้สมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวล m_1

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{y}_1 + (-C_{s1}) \dot{y}_v + (-K_{s1}) y_v + (C_{s1} a_1 S) \dot{\theta}_v + (K_{s1} a_1 S) \theta_v \\
& + (C_{s1}) \dot{y}_1 + (K_{s1}) y_1 = -f_{t1}
\end{aligned} \tag{2.44}$$

พิจารณาสมดุลของแรงในแนวดิ่งของมวล m_2 (ส่วนของล้อหลัง)

$$\sum F = m_2 \ddot{y}_2 \quad ; \quad f_{s2} - f_{t2} = m_2 \ddot{y}_2 \quad (2.45)$$

โดยที่

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

$$\Delta_2 = (w_2(x_r(t), t) + r(x_r(t))) \quad (2.46)$$

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

แทนค่า f_{s2}, f_{t2} ลงในสมการที่ 2.37 ได้สมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของมวล m_2

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{y}_2 + (-C_{s2}) \dot{y}_v + (-K_{s2}) y_v + (-C_{s2} a_2 S) \dot{\theta}_v + (-K_{s2} a_2 S) \theta_v \\ + (C_{s2}) \dot{y}_2 + (K_{s2}) y_2 = -f_{t2} \end{aligned} \quad (2.47)$$

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้โดยใช้สมการที่ 2.30, 2.41, 2.44 และ 2.47 ดังนี้

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}(t) = \mathbf{P}_v(t) \quad (2.48)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_v &= \begin{bmatrix} m_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_v &= \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & (-C_{s1} a_1 + C_{s2} a_2) S & -C_{s1} & -C_{s2} \\ (-C_{s1} a_1 + C_{s2} a_2) S & (C_{s1} a_1^2 + C_{s2} a_2^2) S^2 & C_{s1} a_1 S & -C_{s2} a_2 S \\ -C_{s1} & C_{s1} a_1 S & C_{s1} & 0 \\ -C_{s2} & -C_{s2} a_2 S & 0 & C_{s2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_v &= \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & (-K_{s1} a_1 + K_{s2} a_2) S & -K_{s1} & -K_{s2} \\ (-K_{s1} a_1 + K_{s2} a_2) S & (K_{s1} a_1^2 + K_{s2} a_2^2) S^2 & K_{s1} a_1 S & -K_{s2} a_2 S \\ -K_{s1} & K_{s1} a_1 S & K_{s1} & 0 \\ -K_{s2} & -K_{s2} a_2 S & 0 & K_{s2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y}(t) &= \{y_v(t) \quad \theta_v(t) \quad y_1(t) \quad y_2(t)\}^T \end{aligned}$$

\mathbf{P}_v คือ พจน์ของแรงประกอบด้วยเวกเตอร์ของแรงปฏิกิริยาและเวกเตอร์ของแรงทางสถิติ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$\mathbf{P}_v(t) = -\left\{ \begin{matrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{int}(t) \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s \end{matrix} \right\} = -\left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ P_f(t) \\ P_r(t) \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ N_f \\ N_r \end{matrix} \right\} \quad (2.49)$$

โดยที่

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

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

และ

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

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

2.2.4 การจำลองความขรุขระของผิวทาง

ความขรุขระของพื้นผิวสะพานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน จากผลการศึกษาในอดีตแสดงให้เห็นว่ามีผลต่อการสั่นไหวของสะพานเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้สมการตามมาตรฐาน ISO 8608 (1995) โดยอธิบายในรูปของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ของการกระจัด (Displacement power spectral density) เป็นตัวบ่งบอกระดับความขรุขระ ดังสมการ 2.50

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (2.50)$$

$G_d(n)$ คือ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ความถี่ของความขรุขระใดๆของการกระจัด (m^3)

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

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

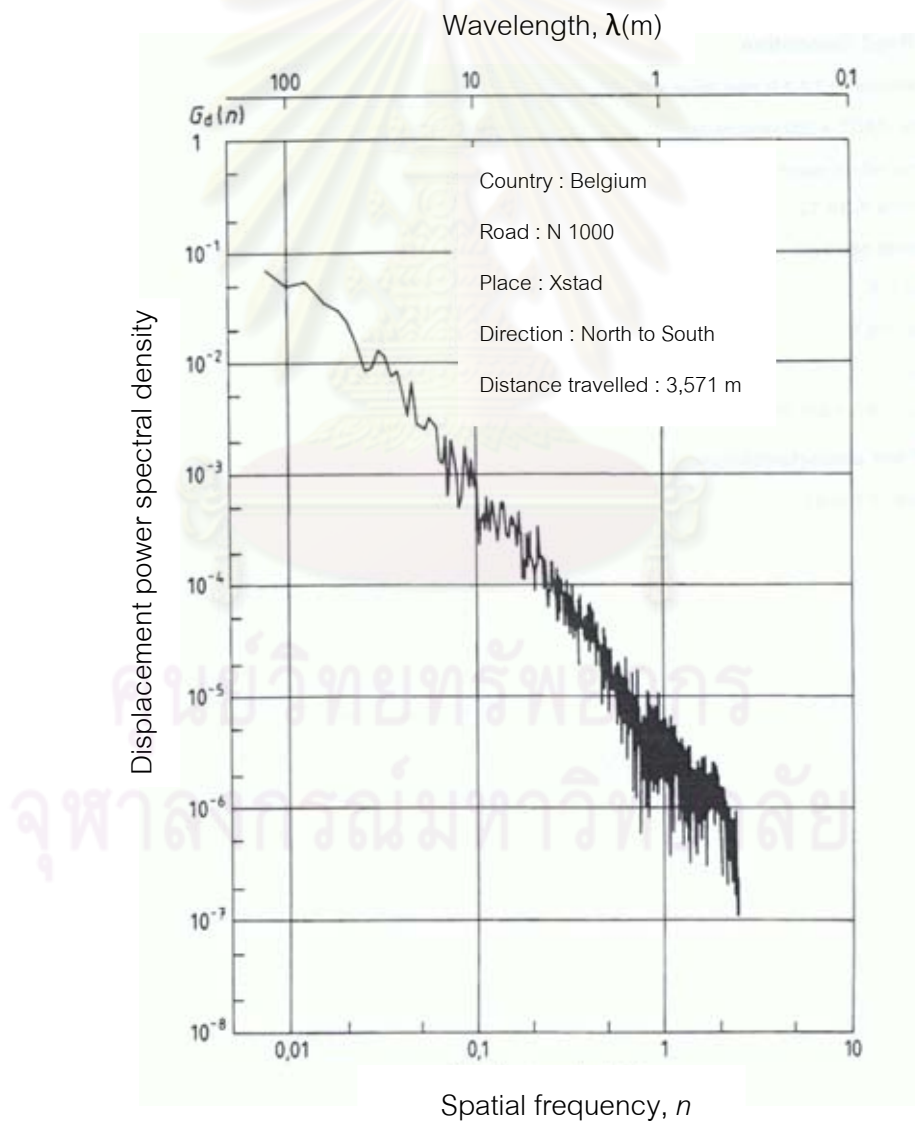
n คือ ความถี่ของความขรุขระ (Spatial frequency, Cycle/m)

w คือ เลขยกกำลังของ PSD ซึ่งเป็นค่าคงที่

การจัดแบ่งประเภทของพื้นผิวตามระดับของความขรุขระ จะมีการประมาณระดับของความขรุขระจากค่า $G_d(n_0)$ โดยตามมาตรฐานของ ISO จะให้กราฟและตารางความสัมพันธ์

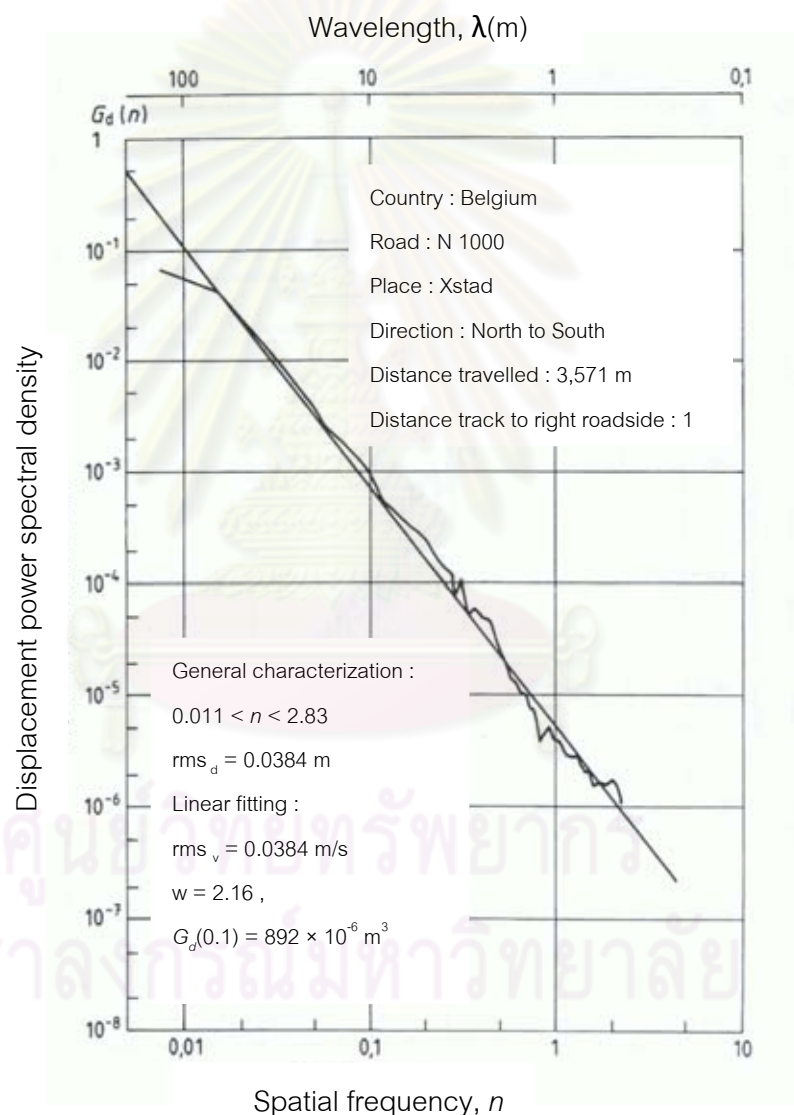
ระหว่างการกระจัดของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมกับความถี่ของความขรุขระสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ ซึ่งจะใช้ค่า $n_0 = 0.1$ รอบต่อเมตร และ $w = 2$ โดยมีการสมมติว่าความเร็วของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมมีค่าคงที่ (Constant velocity power spectral density)

จากการเก็บข้อมูลผิวทางในภาคสนาม ทำให้สามารถนำมาพัฒนาเป็นกราฟและตารางความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมกับความถี่ของความขรุขระ โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองผิวทางในคอมพิวเตอร์ โดยการกระจัดของ PSD คือ การกระจัดในแนวดิ่งของพื้นผิวตามความยาวถนน ซึ่งจากการใช้เครื่องมือเก็บข้อมูลในภาคสนาม ทำให้ได้ลักษณะข้อมูลดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 2.7 จาก ISO 8608



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างข้อมูลความขรุขระที่วัดได้จากภาคสนาม (ISO 8608, 1995)

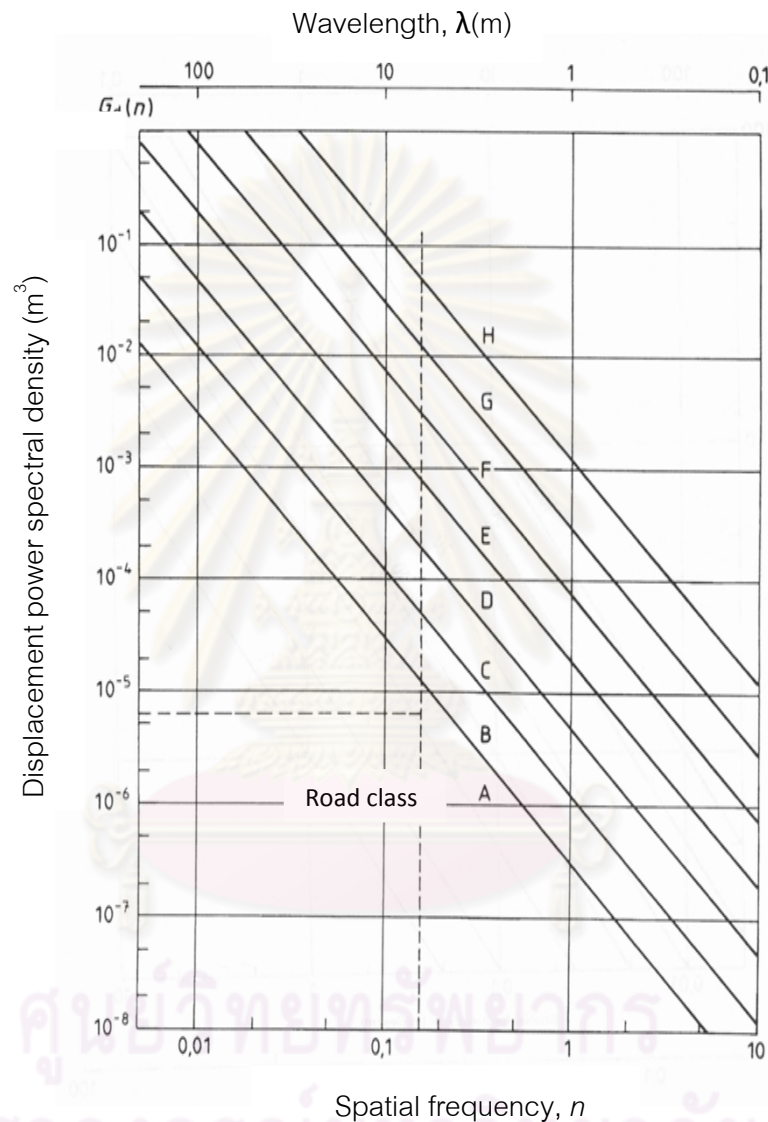
ข้อมูลความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบภาคสนามเป็นข้อมูลที่ไม่ราบเรียบ (Non-smoothed PSD) จึงใช้กระบวนการหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square value) ทำให้ได้ข้อมูลที่ราบเรียบ (Smoothed PSD) จากนั้นทำกราฟให้เป็นเส้นตรงโดยวิธี Least-mean-square โดยช่วงของความถี่ (Spatial frequency) ที่สนใจจะอยู่ระหว่าง 0.011 ถึง 2.83 รอบต่อเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ข้อมูลที่ราบเรียบ (Smoothed PSD) จากความขรุขระที่วัดได้จากภาคสนาม (ISO 8608, 1995)

มาตรฐาน ISO ได้จัดแบ่งประเภทพื้นผิวเป็น A, B, C, D, E, F, G, H ตามลำดับจากพื้นผิวดีที่สุดไปพื้นผิวแย่ที่สุด โดยใช้ความถี่อ้างอิง (Reference spatial frequency) เท่ากับ

0.1 รอบต่อเมตร ทำให้ช่วงการกระจัดของความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ความถี่อ้างอิงตามประเภทพื้นผิวต่างๆ เป็นไปตามภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ค่า PSD ตามมาตรฐาน (ISO 8608, 1995)

นอกจากนี้มาตรฐาน ISO ได้ให้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ความถี่อ้างอิงของการกระจัด (Displacement power spectral density) สำหรับผิวทางประเภทต่างๆ เพื่อจะนำไปใช้ในการจำลองรูปแบบของผิวทาง โดยแต่ละประเภทของผิวทางจะให้ค่ามา 3 ค่าคือ ค่าที่ขอบล่าง ค่าเฉลี่ย และค่าที่ขอบบน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า PSD ที่นำไปใช้จำลองรูปแบบของผิวทางตามมาตรฐาน (ISO 8608, 1995)

Road class	Degree of roughness			
	$G_d(n_0) 10^{-6} m^3$			$G_v(n) 10^{-6} m^3$
	Lower limit	Geometric mean	Upper limit	Geometric mean
A	-	16	32	6.3
B	32	64	128	25.3
C	128	256	512	101.1
D	512	1024	2048	404.3
E	2048	4096	8192	1617.0
F	8192	16384	32768	6468.1
G	32768	65536	131072	25872.6
H	131072	262144	-	103490.3

$n_0 = 0.1$ cycles/m

นอกจากมาตรฐาน ISO ที่ได้ให้วิธีการจำลองผิวทางและจัดแบ่งประเภทผิวทางไว้แล้ว งานวิจัยของ Sukhvarsh (2008) ยังได้ให้วิธีการจำลองรูปแบบผิวทางตามสมการที่ 2.51 และค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมที่ความถี่อ้างอิงของการกระจัดตามประเภทผิวทางซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและสภาพผิวทางดังตารางที่ 2.2 ทำให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปใช้ในการจำลองผิวทาง

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w_1} \quad n \leq n_0$$

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w_2} \quad n \geq n_0$$
(2.51)

ตารางที่ 2.2 ค่า PSD ที่นำไปใช้จำลองสภาพพื้นผิว (Sukhvarsh, 2008)

Road class		$G_d(n_0)$ Range ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cycle}$)	w1	w2
Motorways	Very good	2-8	1.945	1.360
	Good	8-12		
Principal Roads	Very good	2-8	2.050	1.440
	Good	8-32		
	Average	32-128		
	Poor	128 - 512		
Minor Roads	Average	32-128	2.280	1.428
	Poor	128-512		
	Very poor	512-2048		

จากทฤษฎีความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัม สามารถนำมาจำลองรูปแบบของความขรุขระตามความยาวสะพานที่ตำแหน่งต่างๆโดยประยุกต์ใช้การแปลงผกผันฟูเรียร์ (Inverse fast Fourier transformation) ที่ความถี่อ้างอิง จากงานวิจัยของ Deng (2010) และ Silva (2004) ดังสมการ 2.52

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_d(n_i) \Delta n} \cos(2\pi n_i x + \theta_i) \quad (2.52)$$

โดยที่ $y(x)$ คือ ระดับของความขรุขระบนสะพานที่ระยะ x ใดๆ

n_i คือ ค่าความถี่ที่จุดกึ่งกลางของช่วงที่ i

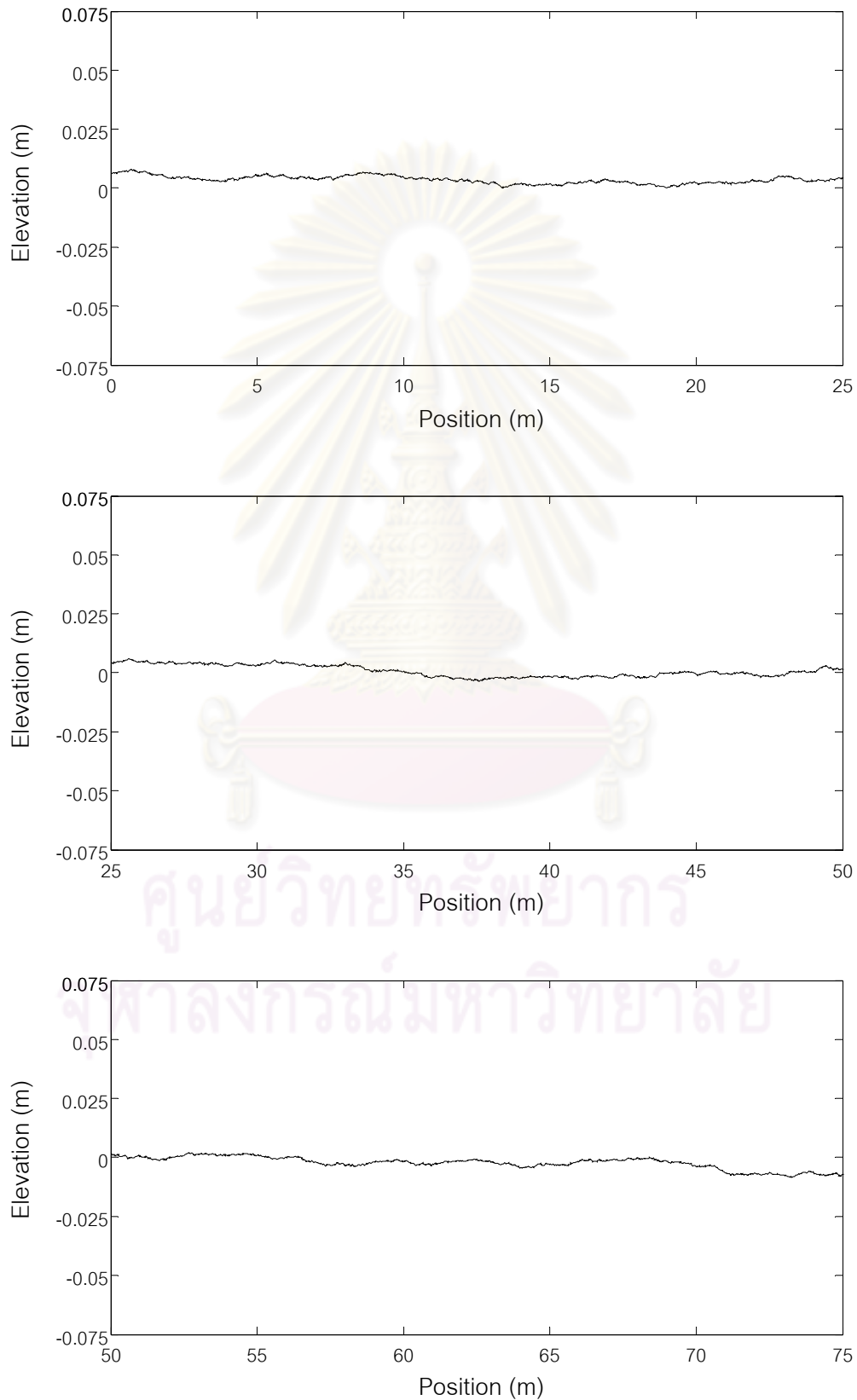
$$\Delta n = 1 / N \Delta$$

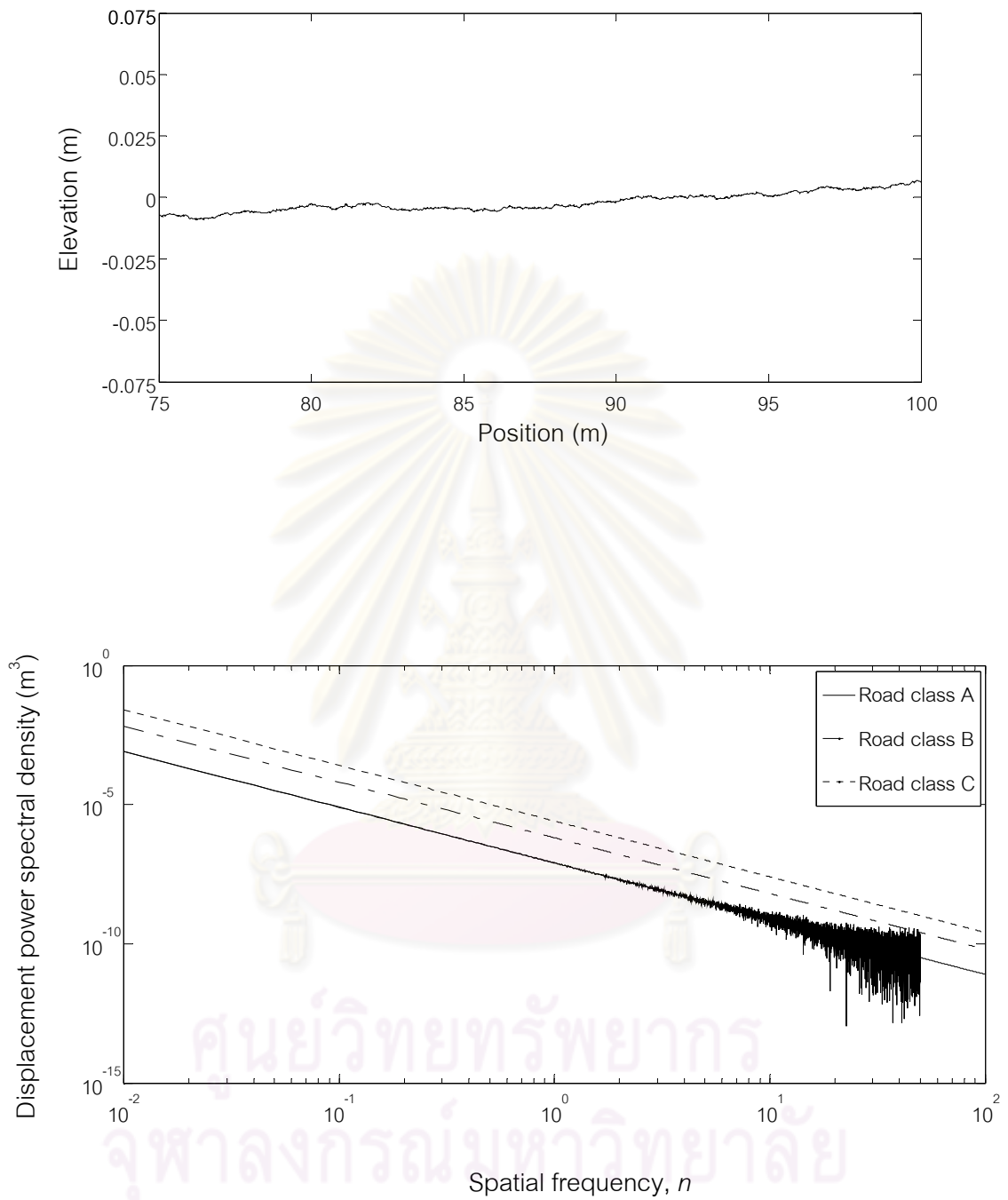
Δ = ระยะห่างช่วงระหว่างพิกัดของแนวพื้นผิว

N คือ จำนวนชุดข้อมูล

θ_i คือ ค่ามุมเฟสสุ่มอิสระระหว่าง 0 ถึง 2π

การจำลองผิวทางประเภท A จากสมการที่ 2.52 โดยใช้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของการกระจัด (PSD) ตามมาตรฐาน ISO 8608 (1995) แสดงในภาพที่ 2.10

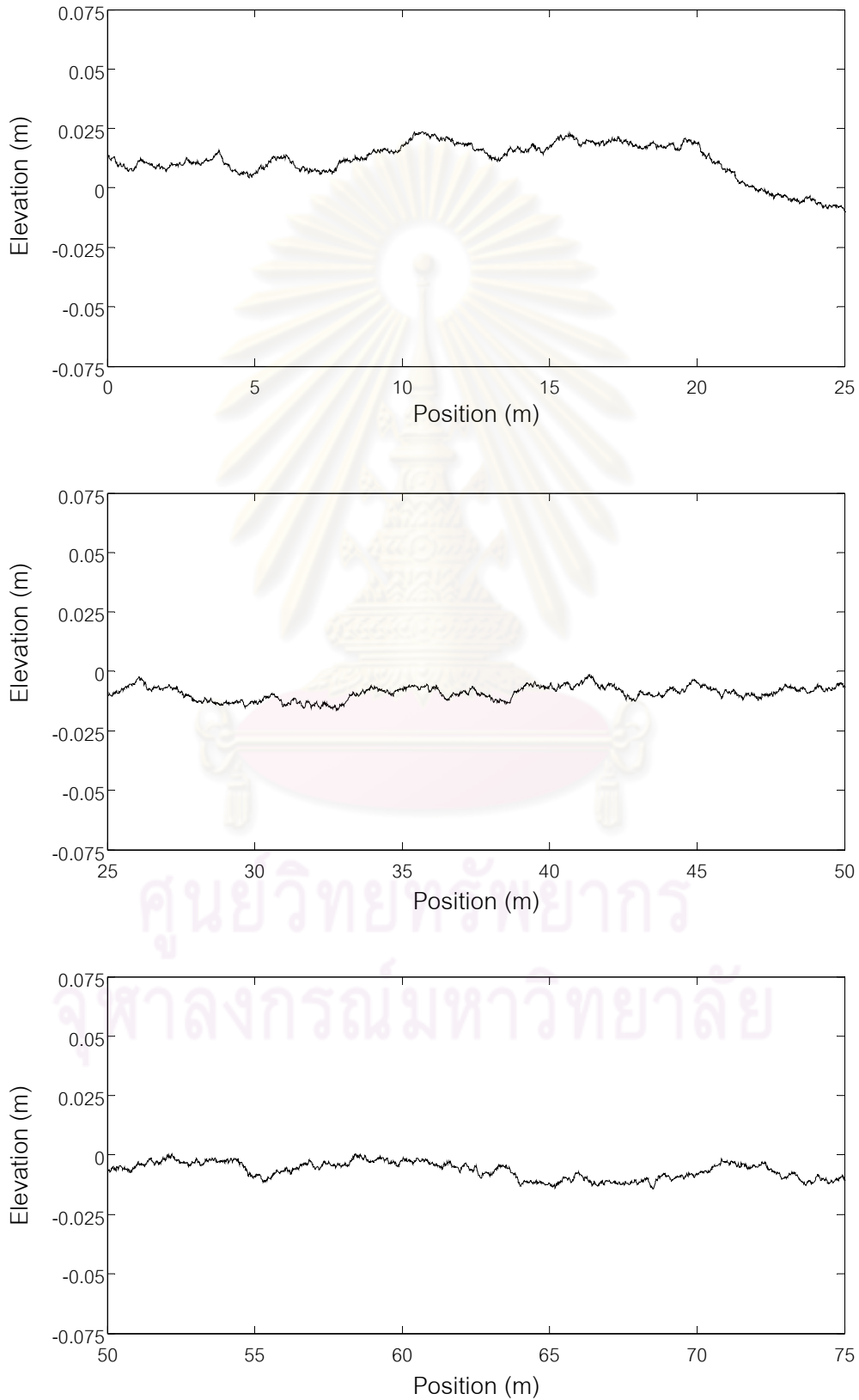


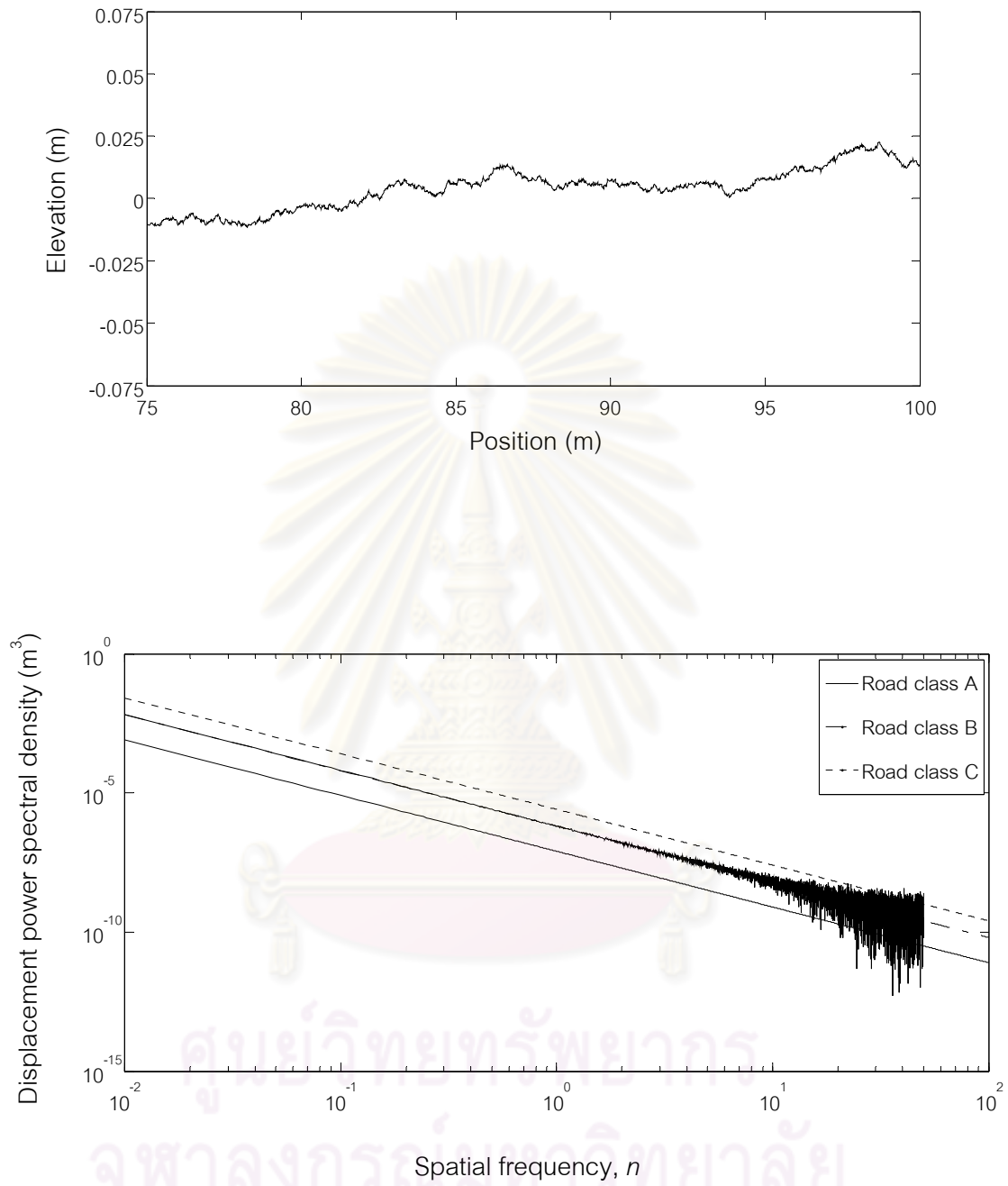


ภาพที่ 2.10 แบบจำลองผิวทางประเภท A

ภาพที่ 2.10 เป็นการจำลองผิวทางประเภท A ระยะทาง 100 เมตร และทำการหาสเปกตรัมย้อนกลับได้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของการกระจัด สอดคล้องกับเส้นที่มาตรฐานกำหนด

การจำลองผิวทางประเภท B จากสมการที่ 2.52 โดยใช้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของการกระจัด (PSD) ตามมาตรฐาน ISO 8608 (1995) แสดงในภาพที่ 2.11

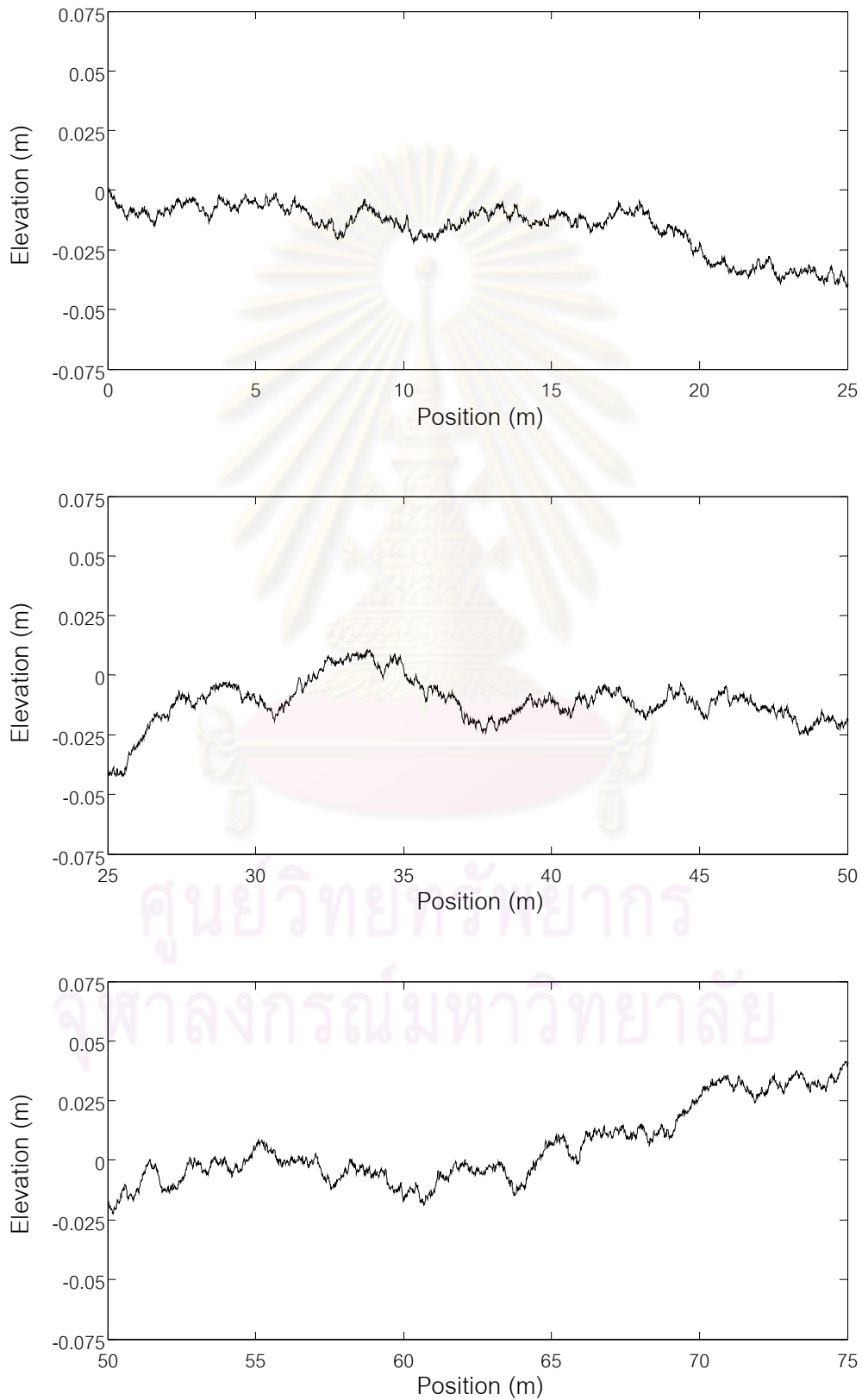


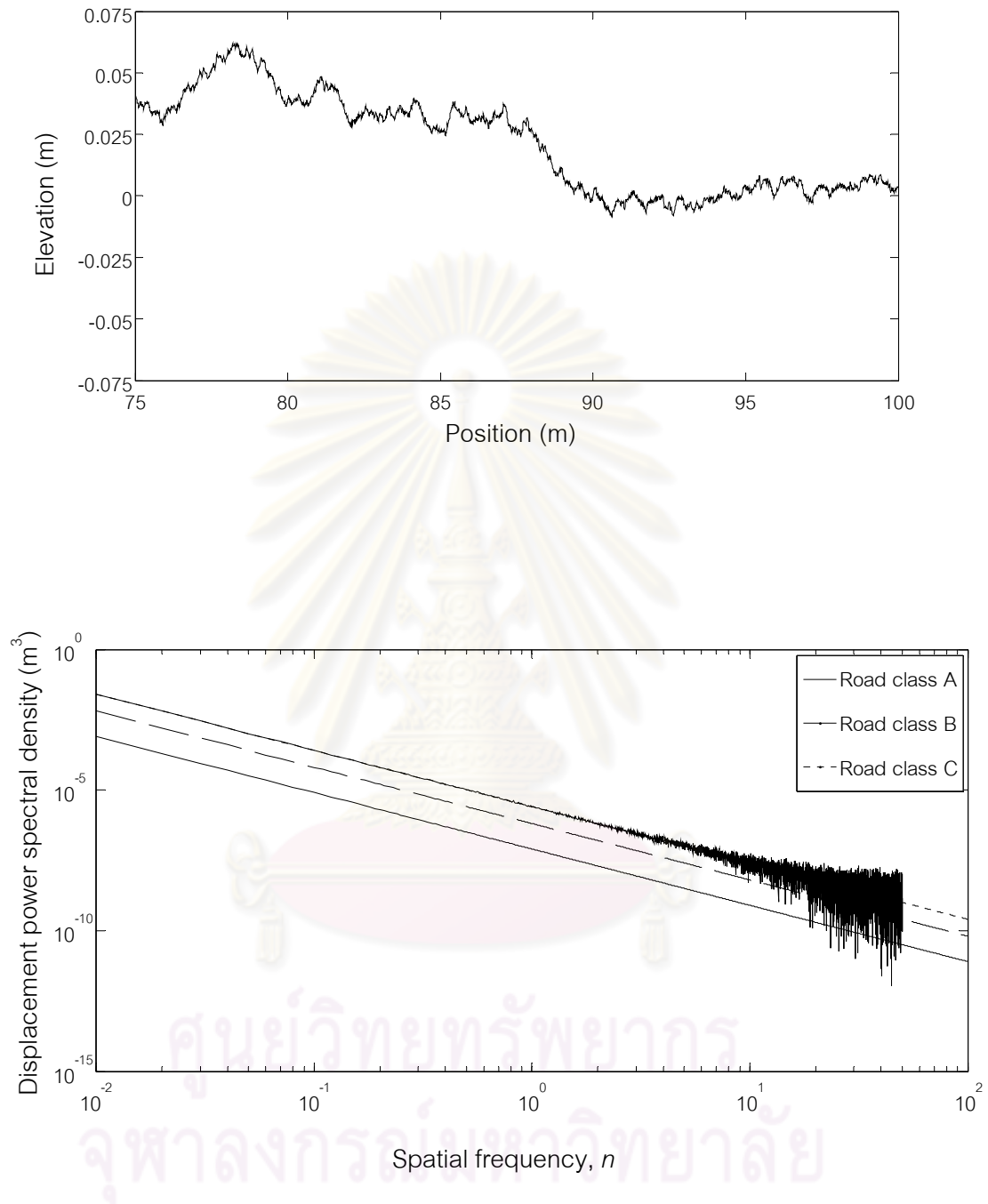


ภาพที่ 2.11 แบบจำลองผิวทางประเภท B

ภาพที่ 2.11 เป็นการจำลองผิวทางประเภท B ระยะทาง 100 เมตร และทำการหาสเปกตรัมย้อนกลับได้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของการกระจัด สอดคล้องกับเส้นที่มาตรฐานกำหนด

การจำลองผิวทางประเภท C จากสมการที่ 2.52 โดยใช้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของการกระจัด (PSD) ตามมาตรฐาน ISO 8608 (1995) แสดงในภาพที่ 2.12

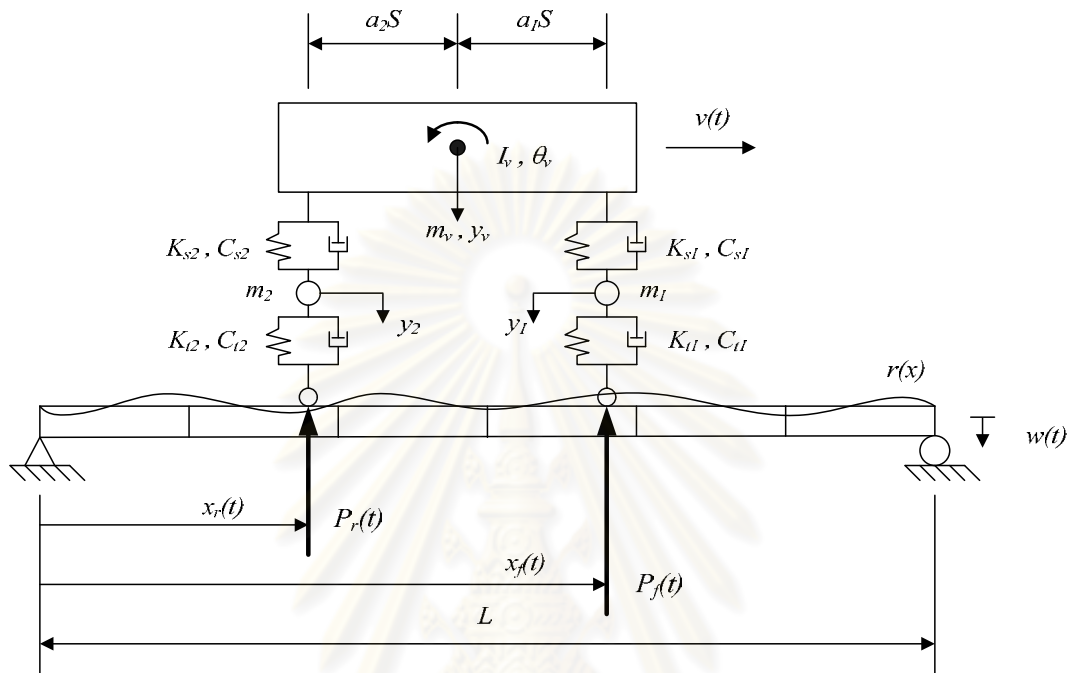




ภาพที่ 2.12 แบบจำลองผิวทางประเภท C

ภาพที่ 2.12 เป็นการจำลองผิวทางประเภท C ระยะทาง 100 เมตร และทำการหาสเปกตรัมย้อนกลับได้ค่าความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของการกระจัด สอดคล้องกับเส้นที่มาตรฐานกำหนด

2.2.5 แบบจำลองและการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน



ภาพที่ 2.13 ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน

จากการจำลองสะพานในหัวข้อ 2.2.2 การจำลองรถบรรทุกในหัวข้อ 2.2.3 และการจำลองความขรุขระของผิวทางในหัวข้อ 2.2.4 นำไปสร้างการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานให้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุกกับสะพาน ทุกๆองศาอิสระทั้งของรถบรรทุกและสะพานจะต้องถูกแก้สมการพร้อมๆกัน ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุกกับสะพานคือ การรวมมวล, ความหน่วง, สติฟเนสและพจน์ของแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับทุกๆองศาอิสระเข้าด้วยกัน

จากสมการเคลื่อนที่ของระบบรถบรรทุกกับสะพาน ในกรณีที่จำนวนเพลลา (M) เท่ากับ 2 สามารถเขียนเวกเตอร์แรงปฏิสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_{int}(t) &= \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} \\
&= \begin{Bmatrix} K_{t1}(y_1(t) - w_1(x_f(t), t) - r(x_f(t))) + C_{t1}(\dot{y}_1(t) - \dot{w}_1(x_f(t), t) - \dot{r}(x_f(t))) \\ K_{t2}(y_2(t) - w_2(x_r(t), t) - r(x_r(t))) + C_{t2}(\dot{y}_2(t) - \dot{w}_2(x_r(t), t) - \dot{r}(x_r(t))) \end{Bmatrix} \\
&\quad + \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) g \\ (m_2 + a_1 m_v) g \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.53}$$

สามารถสังเกตได้ว่าพจน์ของแรงปฏิกริยาของสมการ 2.53 ประกอบด้วยองค์ประกอบอิสระทั้งของรถบรรทุก และ สะพาน ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกและสะพานจะถูกจัดเรียงใหม่ได้ดังนี้

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

$$w(x, t) = \mathbf{H}_c^T(x(t)) \cdot \mathbf{U}(t) \tag{2.54}$$

ทำการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของการแอนตัวของสะพานเทียบกับเวลาได้

$$\dot{w}(x, t) = \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{U}(t) \cdot \dot{x}(t) + \mathbf{H}_c^T(x(t)) \cdot \dot{\mathbf{U}}(t) \tag{2.55}$$

แทนค่าสมการ 2.54 และ 2.55 ลงในสมการ 2.50 ได้

$$\begin{aligned}
P_f(t) &= K_{t1}(y_1(t) - \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \cdot \mathbf{U}(t) - r(x_f(t))) \\
&\quad + C_{t1} \left(\dot{y}_1(t) - \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_f(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{U}(t) \cdot v(t) - \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \cdot \dot{\mathbf{U}}(t) \right) + (m_1 + a_2 m_v) g \\
P_r(t) &= K_{t2}(y_2(t) - \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \cdot \mathbf{U}(t) - r(x_r(t))) \\
&\quad + C_{t2} \left(\dot{y}_2(t) - \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_r(t))}{\partial x} \cdot \mathbf{U}(t) \cdot v(t) - \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \cdot \dot{\mathbf{U}}(t) \right) + (m_2 + a_1 m_v) g
\end{aligned} \tag{2.56}$$

สมการ 2.56 สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังแสดง

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ P_r(t) \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \end{Bmatrix} \\
 &- \begin{bmatrix} K_{t1} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) + C_{t1} \cdot v(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_f(t))}{\partial x} \\ K_{t2} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) + C_{t2} \cdot v(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_c^T(x_r(t))}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \{\mathbf{U}(t)\} \\
 &- \begin{bmatrix} C_{t1} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_f(t)) \\ C_{t2} \cdot \mathbf{H}_c^T(x_r(t)) \end{bmatrix} \cdot \{\dot{\mathbf{U}}(t)\} - \begin{Bmatrix} K_{t1} \cdot r(x_f(t)) \\ K_{t2} \cdot r(x_r(t)) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} (m_1 + a_2 m_v) \cdot g \\ (m_2 + a_1 m_v) \cdot g \end{Bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

นำสมการ 2.57 ไปแทนในสมการการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก 2.49 จะได้สมการสำหรับองศาอิสระของรถบรรทุก

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) - \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

โดยที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ทำการแทนสมการที่ 2.57 ลงในสมการการเคลื่อนที่ของสะพาน 2.38 เหมือนในสมการที่ 2.58 จะได้สมการสำหรับองศาอิสระของสะพาน

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

(2.59)

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

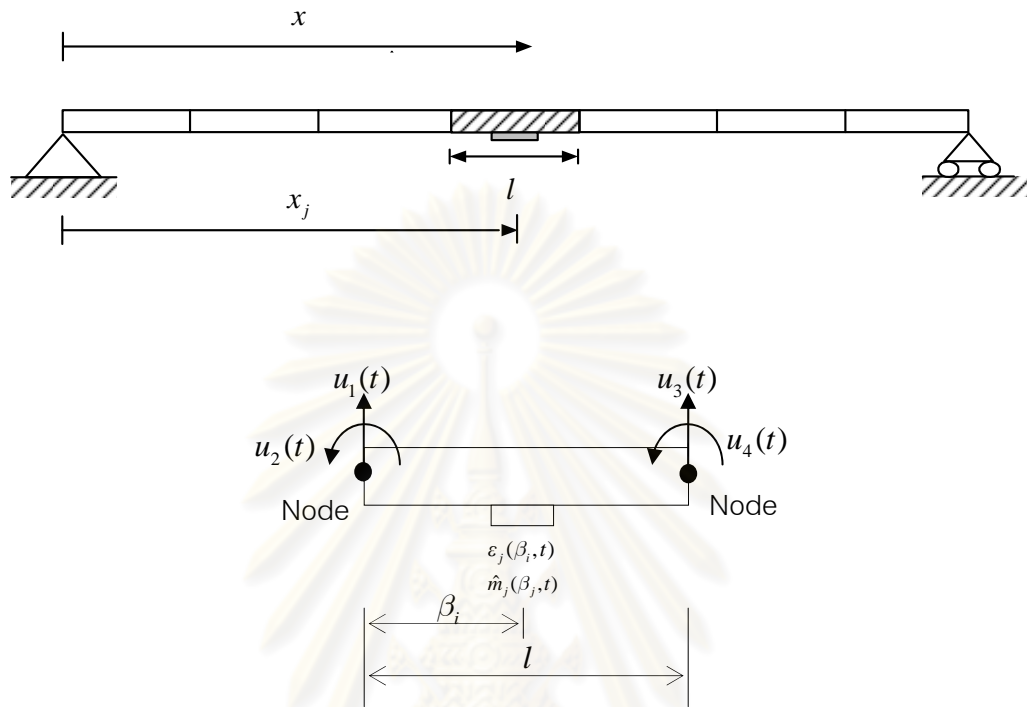
ทำการรวมสมการที่ 2.58 และ 2.59 สมการเคลื่อนที่ในพิกัดครอบคลุมของระบบ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{M}_b & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{v2} \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} + \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{C}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{C}_{v11} & \mathbf{C}_{v12} \\ -\mathbf{C}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) & \mathbf{C}_{v21} & \mathbf{C}_{v22} + \mathbf{C}_t \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{Bmatrix} \\ & + \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{K}_b + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{0} & -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{K}_{v11} & \mathbf{K}_{v12} \\ -\mathbf{K}_t \cdot \mathbf{H}^T(x) - \mathbf{C}_t \cdot v \cdot \frac{\partial \mathbf{H}^T(x)}{\partial x} & \mathbf{K}_{v21} & \mathbf{K}_{v22} + \mathbf{K}_t \end{array} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} -\mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) + \mathbf{H}(x) \cdot \mathbf{M}_s \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{r}(x) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.60)$$

สมการที่ 2.48 คือสมการแสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน และสมการที่ 2.45 คือสมการของน้ำหนักที่เพลาน้ำและหลัง ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักทางสถิตของรถบรรทุกและแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน การปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพานสามารถแก้ปัญหาได้ที่ละขั้นๆ โดยวิธีการหาปริพันธ์โดยตรง (The direct integration method) ซึ่งได้แก่วิธีการของนิวมาร์คเบต้า (The Newmark's β method) หรือ วิธีการแบบแยก โดยการสร้างสเตท-สเปซ (The state-space formulation)

2.3 การคำนวณค่าตัวประกอบการกระแทก

ตัวประกอบการกระแทกจะหาได้จากสมการที่ 2.1 ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน (R_d) และผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิตของสะพาน (R_s) ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 มาทำการวิเคราะห์หาผลตอบสนองภายใต้เงื่อนไขต่างๆของสะพาน และรูปแบบต่างๆของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่าน แล้วจึงคำนวณหาค่า R_d และ R_s ดังนี้

1) ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านพลศาสตร์ของสะพาน (R_d)

ภาพที่ 2.14 ตำแหน่งที่วัดผลตอบสนองในชิ้นส่วนของคาน

พิจารณาสะพานในชิ้นส่วนซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัด ที่ต้องการทราบค่าผลตอบสนอง ความเครียด หรือโมเมนต์ดัดของสะพาน ดังภาพที่ 2.14 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งผิวล่างของชิ้นส่วนคานในรูป สามารถพิจารณาได้จาก

$$\epsilon_j(x_j, t) = -\gamma_j \left. \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right|_{x=x_j} \quad (2.61)$$

โดยที่ γ_j คือระยะระหว่างผิวล่างของสะพานกับแกนสะเทินของหน้าตัดคานที่ตำแหน่งวัด x_j แทนค่า $w(x, t)$ ลงในสมการที่ 2.61 ได้

$$\epsilon_j(\beta_i, t) = -\left(\frac{\gamma_j}{l^3}\right) \cdot [(12\beta_j - 6l)u_1(t) + l(6\beta_j - 4l)u_2(t) - (12\beta_j - 6l)u_3(t) + l(6\beta_j - 2l)u_4(t)] \quad (2.62)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด $\hat{m}_j(t)$ และความเครียด $\epsilon_j(t)$ สมการที่ 2.62 สามารถแปลงกลับเป็นโมเมนต์ดัดได้

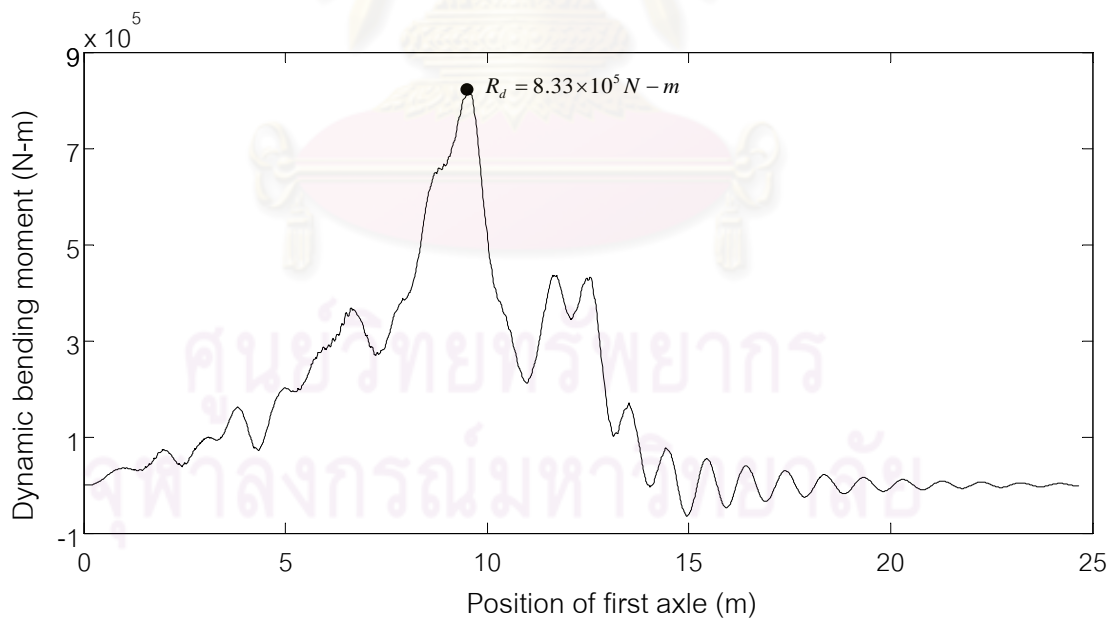
$$\hat{m}_j(t) = EI \cdot \frac{\varepsilon_j(t)}{\gamma_j} \quad (2.63)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.63 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\hat{m}_j(\beta_j, t) = -\left(\frac{EI}{l^3}\right) \left\{ \begin{matrix} (12\beta_j - 6l) & l(6\beta_j - 4l) & -(12\beta_j - 6l) & l(6\beta_j - 2l) \end{matrix} \right\} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{Bmatrix} \quad (2.64)$$

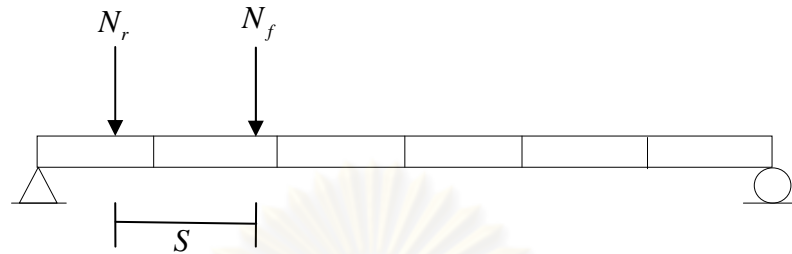
โดยที่ $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ และ $u_4(t)$ คือการกระจัดเชิงขั้ว (Nodal displacement) ที่สอดคล้องกับชิ้นส่วนคานและ β_j คือตำแหน่งเฉพาะที่ (Local location) ของจุดวัด สามารถพิจารณาได้จากตำแหน่งพิกัดครอบคลุม (Global location) x_j

นำผลตอบสนองสุดท้ายทางด้านพลศาสตร์ของสะพานไปใช้ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบการระเหตกดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในรูปของโมเมนต์ดัด

2) ผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติของสะพาน (R_s)



ภาพที่ 2.16 น้ำหนักกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ไปบนสะพาน

$$\begin{aligned} N_f &= (m_1 + a_2 m_v) g \\ N_r &= (m_2 + a_1 m_v) g \end{aligned} \quad (2.65)$$

N_f, N_r คือ น้ำหนักสถิติของรถบรรทุกที่เพลาน้ำและเพลาลัง

m_v คือ มวลของรถบรรทุก

m_1 คือ มวลของชุดกันสะเทือนเพลาน้ำ

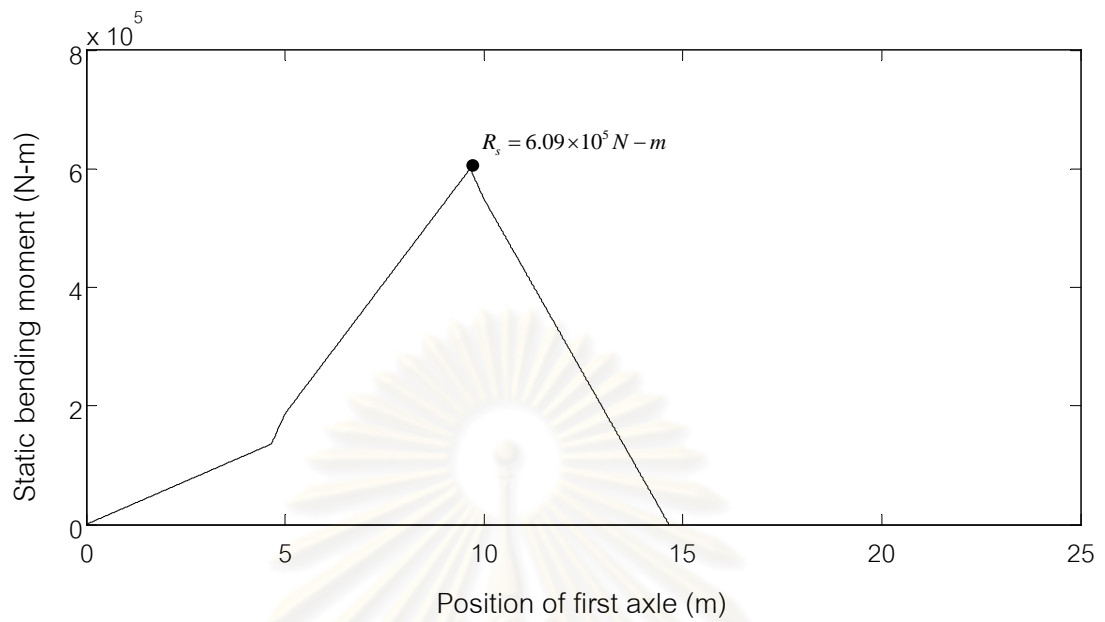
m_2 คือ มวลของชุดกันสะเทือนเพลาลัง

a_1, a_2 คือ อัตราส่วนระหว่างระยะจากศูนย์กลางของรถบรรทุกถึงเพลาน้ำและเพลาลังกับระยะระหว่างเพลาน้ำและเพลาลัง

S คือ ระยะระหว่างเพลาน้ำและเพลาลัง

ภาพที่ 2.16 แสดงวิธีการหาผลตอบสนองทางด้านสถิติของสะพาน โดยมีน้ำหนักกระทำแบบจุดจากเพลาน้ำและเพลาลังของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน ซึ่งจะสามารถหาผลตอบสนองทางด้านสถิติได้ที่ทุกๆ ตำแหน่งของสะพานโดยใช้หลักการของเส้นอิทธิพล (Influence line)

ทำการหาผลตอบสนองทางด้านสถิติเมื่อน้ำหนักกระทำแบบจุดจากเพลาน้ำ (N_f) เคลื่อนที่ไปบนสะพาน นำไปรวมกับผลตอบสนองทางด้านสถิติเมื่อน้ำหนักกระทำแบบจุดจากเพลาลัง (N_r) เคลื่อนที่ไปบนสะพาน ทำให้ได้ผลตอบสนองทางด้านสถิติจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก นำผลตอบสนองสูงสุดทางด้านสถิติไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ผลตอบสนองทางด้านสถิตที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในรูปของโมเมนต์ดัด

จากกรณีตัวอย่างจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบการกระเทกตามสมการที่ 2.1 ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ

$$I\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{R_d\left(\frac{L}{2}\right) - R_s\left(\frac{L}{2}\right)}{R_s\left(\frac{L}{2}\right)} = \frac{8.33 - 6.09}{6.09} = 0.37$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองรถบรรทุกกับสะพานในคอมพิวเตอร์

3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกของสะพานในการศึกษานี้ จะมีทั้งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสะพานและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรถบรรทุก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีตัวแปรต่างๆ มากมายที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมีตัวแปรที่นำมาศึกษาดังนี้

3.1.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสะพาน

แบบจำลองสะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะมีลักษณะเป็นคานช่วงเดียวในระนาบสองมิติ โดยมีความยาวช่วงอยู่ระหว่าง 10 เมตรถึง 80 เมตร โดยมวลของสะพานที่แต่ละความยาวช่วงสามารถหาได้จากแบบมาตรฐานสะพานคอนกรีตในประเทศไทย ซึ่งได้ข้อมูลมาจากกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ จะหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความยาวช่วงของสะพานซึ่งมาจากการเก็บข้อมูลสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในยุโรปกว่า 1000 สะพาน ความถี่ธรรมชาติของแต่ละความยาวช่วงสะพานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 3 ค่าคือ ค่าที่ขอบล่าง ค่ากลาง และค่าที่ขอบบน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

แบบจำลองผิวทางที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 3 ประเภทคือ ประเภท A (ดี), ประเภท B (พอใช้) และ ประเภท C (แย) โดยค่า PSD ที่นำมาใช้จำลองรูปแบบของผิวทางมีค่าเท่ากับ 8×10^{-6} , 64×10^{-6} และ $256 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ตามลำดับ

อัตราส่วนของความหน่วงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 2 ค่าคือ 0.005 และ 0.05 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่น่าจะเป็นไปได้ของสะพาน

3.1.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรถบรรทุก

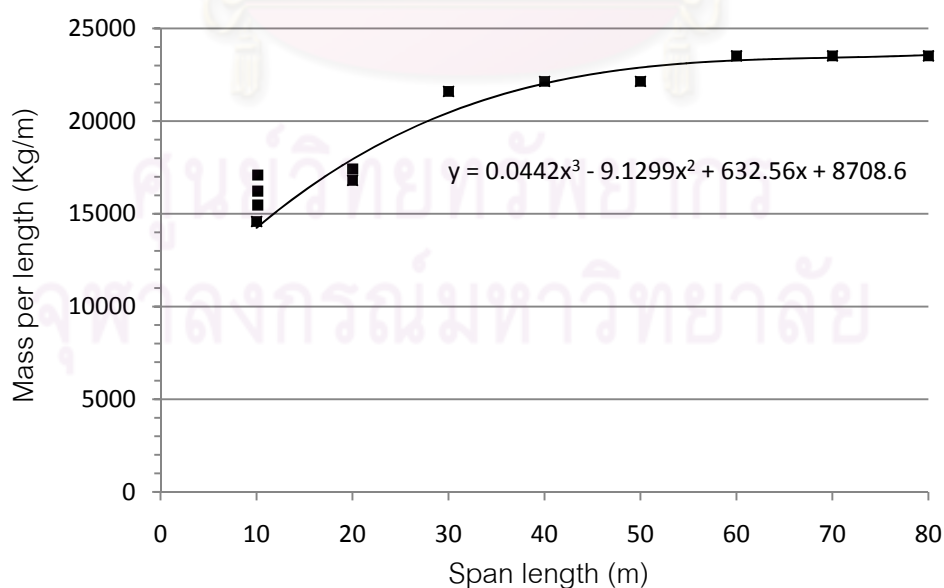
ความเร็วของรถบรรทุกจะพิจารณาตั้งแต่ 5 เมตรต่อวินาที (18 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ถึง 40 เมตรต่อวินาที (144 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) โดยมี 8 ค่าคือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงของความเร็วที่เป็นไปได้ในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกไปบนสะพาน

น้ำหนักของรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 8 ค่าคือ 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 ตัน ซึ่งเป็นช่วงของน้ำหนักที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ เนื่องจากน้ำหนักที่น้อยจนเกินไปจะส่งผลให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงจากผลตอบสนองทางด้านสถิติที่ต่ำ ซึ่งไม่ใช่ น้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่ใช้ในการออกแบบ นอกจากนี้คุณสมบัติของล้อและระบบกันสะเทือนของรถบรรทุกก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจในการวิเคราะห์ ข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบรถบรรทุกสิบล้อในประเทศไทย โดยสถิติของล้อและระบบกันสะเทือนที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 3 ค่าคือ ค่าที่ขอบล่าง ค่ากลาง และค่าที่ขอบบน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุก (Initial condition) เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา โดยจะพิจารณาเงื่อนไขของการไม่มีการกระจัดเริ่มต้นและมีการกระจัดเริ่มต้น รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2 คุณสมบัติของสะพาน

มวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสะพาน โดยในที่นี้จะทำการหามวลต่อความยาวสะพานจากแบบสะพานมาตรฐานในประเทศไทยที่มีความยาวช่วง 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 เมตร แล้วสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อความยาวสะพานกับความยาวช่วง ดังแสดงในภาพที่ 3.1



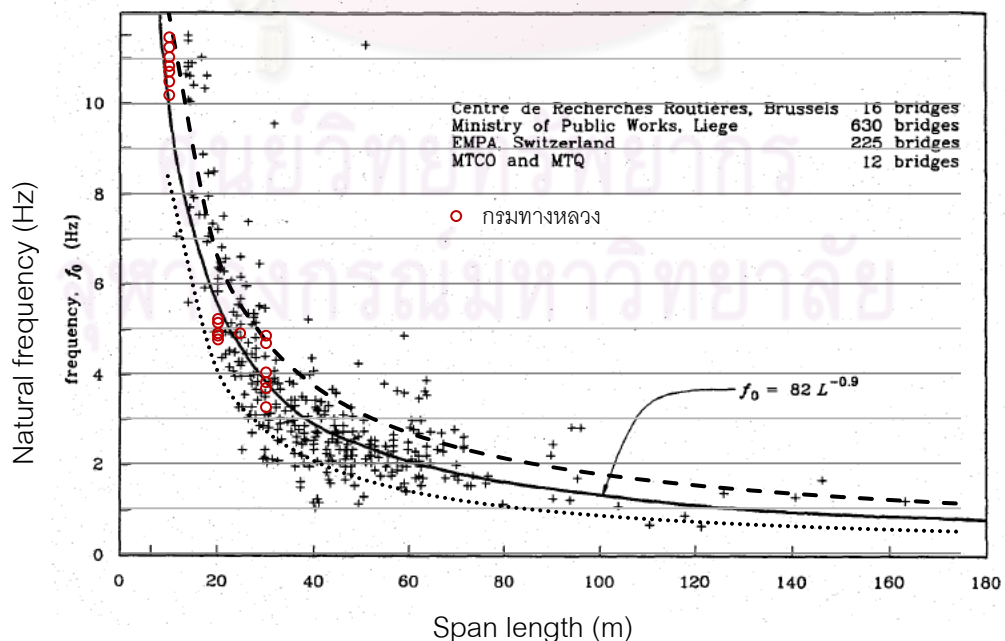
ภาพที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อความยาวกับความยาวช่วงของสะพานที่มีความกว้าง 13.5 เมตร (กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท)

จากสมการเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลต่อความยาวสะพานกับความยาวช่วง ทำให้ได้มวลต่อความยาวสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ ซึ่งนำมาใช้ในการศึกษานี้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 มวลต่อความยาวสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ

ความยาวช่วงของสะพาน (m)	มวลต่อความยาวสะพาน (kg/m)
10	14200
20	18100
30	20700
40	22200
50	23000
60	23300
70	23400
80	23500

ความถี่ธรรมชาติของสะพานดังแสดงในภาพที่ 3.2 ได้จากการเก็บข้อมูลสะพานในยุโรปกว่า 1000 สะพาน ได้ข้อมูลความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นสมการในการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานดังสมการที่ 3.1 จาก Chaallal (1998)



ภาพที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความยาวช่วง (Chaallal, 1998)

$$f_0 = 82L^{-0.9} \quad (3.1)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นทำให้สามารถหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน (เส้นที่ป) จากสมการที่ 3.1 เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ทั้งยังเรียกค่าตามเส้นประว่าเป็น f_+ และเรียกค่าตามจุดว่าเป็น f_- ในภาพที่ 3.2 เพื่อเป็นขอบเขตของความถี่ธรรมชาติที่แต่ละความยาวช่วงสะพานซึ่งจะนำไปใช้ในการศึกษาที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 นอกจากนี้ยังได้ทำการพลอตค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบสะพานในประเทศไทยที่มีความยาวช่วง 10-30 เมตรเป็นจุดสีดำลงในภาพที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอยู่ในขอบเขตของความถี่ธรรมชาติที่นำมาวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ความยาวช่วงต่างๆ

ความยาวช่วงของสะพาน (m)	f_- (Hz)	f_0 (Hz)	f_+ (Hz)
10	8.40	10.30	12.15
20	4.20	5.55	6.80
30	2.85	3.85	4.90
40	2.15	2.95	3.85
50	1.70	2.45	3.20
60	1.40	2.05	2.75
70	1.20	1.80	2.40
80	1.05	1.60	2.15

จากข้อมูลของมวลและความถี่ธรรมชาติของสะพาน ทำให้สามารถประมาณค่าสติเฟนสของสะพาน (EI) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.2 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (3.2)$$

โดยที่

f คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Hz)

ρ คือ มวลต่อความยาวช่วงของสะพาน (Kg/m)

L คือ ความยาวช่วงของสะพาน (m)

ตารางที่ 3.3 สติฟเนสของสะพาน (EI) ที่ความยาวช่วงต่างๆ

ความยาวช่วงของสะพาน (m)	EI_- (N.m ²)	EI_0 (N.m ²)	EI_+ (N.m ²)
10	4.06×10^9	6.10×10^9	8.49×10^9
20	2.07×10^{10}	3.61×10^{10}	5.42×10^{10}
30	5.52×10^{10}	1.00×10^{11}	1.63×10^{11}
40	1.06×10^{11}	2.00×10^{11}	3.41×10^{11}
50	1.68×10^{11}	3.49×10^{11}	5.96×10^{11}
60	2.40×10^{11}	5.14×10^{11}	9.25×10^{11}
70	3.28×10^{11}	7.37×10^{11}	1.31×10^{12}
80	4.30×10^{11}	9.98×10^{11}	1.80×10^{12}

3.3 คุณสมบัติของรถบรรทุก

คุณสมบัติของรถบรรทุกที่ได้จากการทดสอบรถบรรทุกสิบล้อในประเทศไทยซึ่งมาจากงานวิจัยของวุฒิชัย (2001) แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของรถบรรทุกสิบล้อ (วุฒิชัย, 2001)

สติสเนสของล้อหน้า (K_{t1})	$2 \times 2.69 \times 10^6$ N/m
สติสเนสของล้อหลัง (K_{t2})	$2 \times 6.41 \times 10^6$ 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_{t1})	$2 \times 2.00 \times 10^4$ N/(m/s)
ความหน่วงของล้อหลัง (C_{t2})	$2 \times 2.00 \times 10^4$ N/(m/s)
ความหน่วงของระบบกันสะเทือนหน้า (C_{s1})	$2 \times 2.00 \times 10^4$ N/(m/s)
ความหน่วงของระบบกันสะเทือนหลัง (C_{s2})	$2 \times 2.00 \times 10^4$ N/(m/s)
มวลของระบบกันสะเทือนหน้า (m_1)	500 Kg
มวลของระบบกันสะเทือนหลัง (m_2)	700 Kg
โมเมนต์ความเฉื่อยของรถบรรทุก (I_v)	4.87×10^4 Kg/m ²

เนื่องจากการศึกษานี้จะพิจารณาค่าสติฟเนสของล้อและระบบกันสะเทือนมีค่าที่ขอบล่าง ขอบบน และค่ากลาง โดยค่ากลางได้มาจากผลการทดสอบคุณสมบัติของรถบรรทุกสิบล้อ ค่าที่ขอบล่างได้มาจาก 50% ของค่ากลาง และค่าที่ขอบบนได้มาจาก 150% ของค่ากลาง ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าสติฟเนสของรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

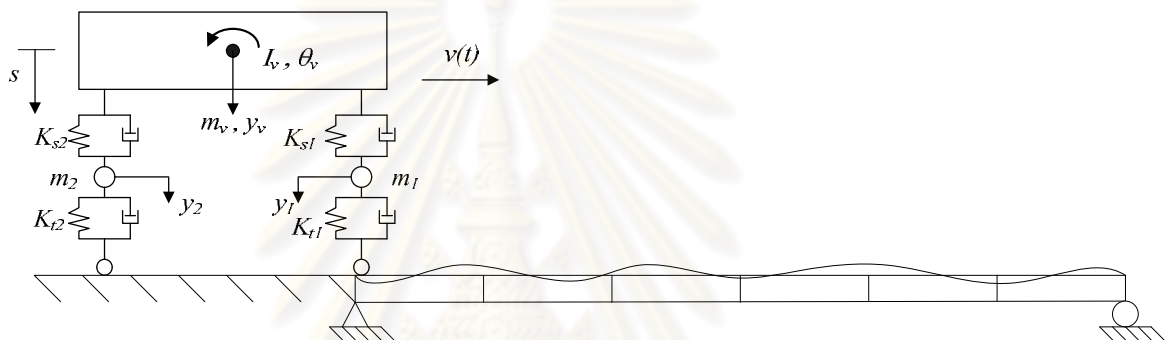
สติฟเนส	ขอบล่าง (N/m)	ค่ากลาง (N/m)	ขอบบน (N/m)
ล้อหน้า	$2 \times 1.35 \times 10^6$	$2 \times 2.69 \times 10^6$	$2 \times 4.04 \times 10^6$
ล้อหลัง	$2 \times 3.21 \times 10^6$	$2 \times 6.41 \times 10^6$	$2 \times 9.62 \times 10^6$
ระบบกันสะเทือนหน้า	$2 \times 2.38 \times 10^6$	$2 \times 4.75 \times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

จากค่าสติฟเนสที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 3.5 และคุณสมบัติอื่นๆของรถบรรทุกดังตารางที่ 3.4 ทำให้สามารถหาความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุก

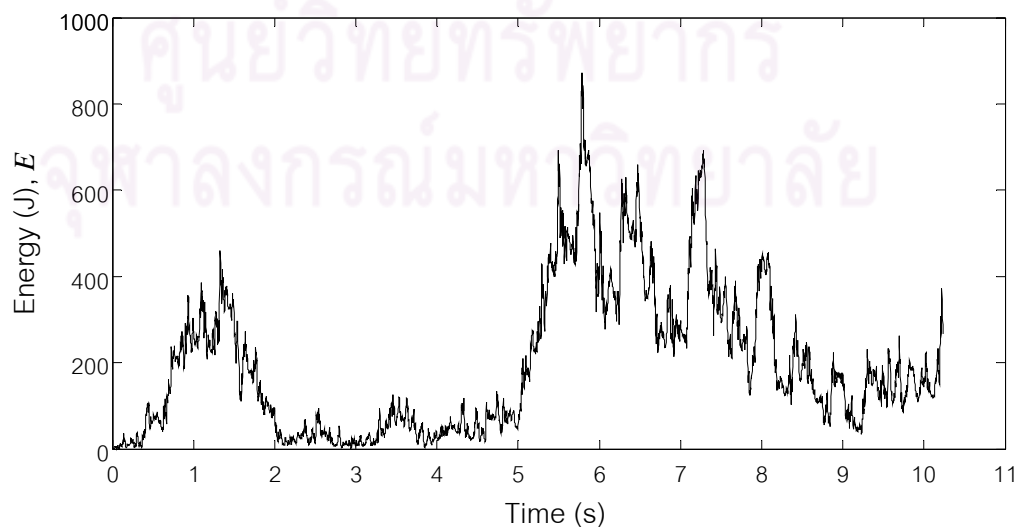
น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	ความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุก		
	ขอบล่าง (Hz)	ค่ากลาง (Hz)	ขอบบน (Hz)
20	2.50	3.50	4.30
25	2.25	3.15	3.85
30	2.05	2.90	3.55
35	1.90	2.70	3.30
40	1.75	2.50	3.05
45	1.65	2.35	2.90
50	1.60	2.25	2.75
55	1.50	2.15	2.60

สภาพเริ่มต้น (Initial condition) ของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานจะหาได้จากหลักการเรื่องพลังงาน โดยจะพิจารณาสภาพเริ่มต้นให้เป็นการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุก (s) โดยมีค่าความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ ($\dot{s} = 0$) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 พิจารณาให้การกระจัดก่อนเข้าสู่สะพานของมวลรถบรรทุก มวลระบบกันสะเทือนหน้าและหลังมีค่าเท่ากัน ทำการหาพลังงานสะสมในระบบที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกไปบนผิวทางที่มีความขรุขระอย่างเดียวกับความขรุขระของผิวทางบนสะพานเป็นระยะทาง 200 เมตร โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์พลังงานคือ ประเภทผิวทาง ความเร็วรถบรรทุก และมวลรถบรรทุก



ภาพที่ 3.3 การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพาน

ค่าพลังงานสะสมในรถบรรทุกขณะที่รถบรรทุกกำลังเคลื่อนที่ไปบนผิวทางที่มีความขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 3.4 โดยพลังงานสะสมจะมาจากผลรวมของพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ขึ้นลงของมวลรถบรรทุก พลังงานศักย์ยืดหยุ่นของระบบกันสะเทือนและพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของล้อรถบรรทุก



ภาพที่ 3.4 พลังงานสะสมที่เวลาต่างๆ ขณะรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนผิวทาง

ทำการเฉลี่ยพลังงานในภาพที่ 3.4 เพื่อเป็นตัวแทนพลังงานที่ความเร็ว (V) น้ำหนักรถบรรทุก (W) และผิวทางประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7-3.9

ตารางที่ 3.7 พลังงานเฉลี่ยที่ความเร็ว (V) น้ำหนักรถบรรทุก (W) และผิวทางประเภท A

		Average energy (J), E							
$V \backslash W$	20 Ton	25 Ton	30 Ton	35 Ton	40 Ton	45 Ton	50 Ton	55 Ton	
5 m/s	42	54	52	53	67	91	116	127	
10 m/s	73	83	106	151	172	162	261	259	
15 m/s	123	178	199	230	185	222	253	228	
20 m/s	159	181	208	207	195	165	193	195	
25 m/s	205	174	158	185	207	193	323	347	
30 m/s	168	205	170	317	291	309	333	370	
35 m/s	214	279	289	311	350	567	436	412	
40 m/s	337	303	335	531	365	471	520	337	

จากตารางที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า พลังงานเฉลี่ยมีแนวโน้มที่จะแปรผันตามความเร็วของรถบรรทุกและไม่เปลี่ยนแปลงค่ามากนักกับน้ำหนักรถบรรทุก แต่ก็มีค่าพลังงานในบางกรณีที่ไม่สอดคล้องกับกรณีอื่นๆ เช่น กรณีของน้ำหนัก 20 ตันและความเร็ว 25 เมตรต่อวินาทีที่พลังงานมีค่าสูงเกินไป ทั้งยังมีกรณีอื่นๆอีกบางกรณีที่เป็นเช่นนี้ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าผิวทาง ความเร็วและน้ำหนักรถบรรทุกในกรณีนั้นๆ สอดคล้องกันจนทำให้การสั่นของรถบรรทุกใกล้เคียงกับปรากฏการณ์สั่นพ้อง (Resonance) จากค่าพลังงานเฉลี่ยที่ความเร็วและน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ ที่ได้นี้ จะสามารถนำไปหาการกระจัดเริ่มต้นต่อไป

จากตารางที่ 3.8 ซึ่งเป็นพลังงานเฉลี่ยของผิวทางประเภท B จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับความเร็วจะไม่แปรผันตามกันมากนักแตกต่างจากผิวทางประเภท A และพลังงานเฉลี่ยของผิวทางประเภท B มีค่าสูงกว่าพลังงานเฉลี่ยของผิวทางประเภท A

ตารางที่ 3.8 พลังงานเฉลี่ยที่ความเร็ว (V) น้ำหนักบรรทุกทุก (W) และผิวทางประเภท B

		Average energy (J), E							
$V \backslash W$	20 Ton	25 Ton	30 Ton	35 Ton	40 Ton	45 Ton	50 Ton	55 Ton	
5 m/s	167	218	223	212	260	370	449	518	
10 m/s	319	336	411	521	820	773	991	1156	
15 m/s	534	761	547	826	1102	720	795	1140	
20 m/s	689	633	851	801	613	840	671	1055	
25 m/s	788	612	770	939	1175	1002	639	824	
30 m/s	803	950	1221	634	1063	824	879	1129	
35 m/s	1144	703	1066	752	1039	1626	2370	3283	
40 m/s	697	844	976	1636	2574	3456	2630	1375	

ตารางที่ 3.9 แสดงพลังงานเฉลี่ยของผิวทางประเภท C จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับความเร็วจะไม่แปรผันตามกันมากนัก และพลังงานเฉลี่ยของผิวทางประเภท C จะมีค่าสูงกว่าพลังงานเฉลี่ยของผิวทางประเภท A และ B

ตารางที่ 3.9 พลังงานเฉลี่ยที่ความเร็ว (V) น้ำหนักบรรทุกทุก (W) และผิวทางประเภท C

		Average energy (J), E							
$V \backslash W$	20 Ton	25 Ton	30 Ton	35 Ton	40 Ton	45 Ton	50 Ton	55 Ton	
5 m/s	671	895	863	800	1061	1489	1802	1735	
10 m/s	1110	1372	1644	2240	2866	3355	3932	4270	
15 m/s	2254	3059	3575	3311	3889	3700	2589	2194	
20 m/s	2676	3065	1994	2429	2680	3786	2248	1881	
25 m/s	2179	2615	3188	1862	2675	4241	4608	3346	
30 m/s	3457	2086	3605	4222	3387	6601	7531	6669	
35 m/s	2819	4686	3461	7875	6163	9944	6986	5720	
40 m/s	3791	5854	5728	9005	5733	5346	7178	14642	

จากค่าพลังงานเฉลี่ยที่ได้นำไปหาการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานดังสมการที่ 3.3 โดยจะใช้สถิติเฟนสของล้อและระบบกันสะเทือนที่ค่ากลางซึ่งเป็นค่าจากการทดสอบรถบรรทุกสิบล้อ

$$s = \sqrt{\frac{2E}{K}} \quad (3.3)$$

โดยที่

s คือ การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพาน

E คือ พลังงานเฉลี่ยที่สะสมในระบบ

$$K = \frac{(K_{s1})(K_{t1})}{(K_{s1} + K_{t1})} + \frac{(K_{s2})(K_{t2})}{(K_{s2} + K_{t2})}$$

K_{t1}, K_{t2} คือ สถิติเฟนสที่ล้อหน้าและล้อหลังตามลำดับ

K_{s1}, K_{s2} คือ สถิติเฟนสที่ระบบกันสะเทือนหน้าและหลังตามลำดับ

ทำการหาการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุก (s) ที่ความเร็ว (V) น้ำหนักรถบรรทุก (W) และผิวทางประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.10 - 3.12

ตารางที่ 3.10 การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่ความเร็ว (V) น้ำหนัก (W) และผิวทางประเภท A

		Initial condition of truck (cm), s							
$V \backslash W$	20 Ton	25 Ton	30 Ton	35 Ton	40 Ton	45 Ton	50 Ton	55 Ton	
5 m/s	0.28	0.32	0.31	0.31	0.35	0.41	0.46	0.49	
10 m/s	0.37	0.39	0.44	0.53	0.57	0.55	0.70	0.69	
15 m/s	0.48	0.58	0.61	0.65	0.59	0.64	0.69	0.65	
20 m/s	0.54	0.58	0.62	0.62	0.60	0.56	0.60	0.60	
25 m/s	0.62	0.57	0.54	0.59	0.62	0.60	0.78	0.80	
30 m/s	0.56	0.62	0.56	0.77	0.75	0.76	0.79	0.83	
35 m/s	0.63	0.72	0.73	0.76	0.81	1.03	0.90	0.88	
40 m/s	0.79	0.75	0.79	0.99	0.82	0.94	0.98	0.79	

จากตารางที่ 3.10 จะเห็นได้ว่า การกระจัดเริ่มต้นของผิวทางประเภท A มีค่าไม่เกิน 1 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.11 การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่ความเร็ว (V) น้ำหนัก (W) และผิวทางประเภท B

Initial condition of truck (cm), s								
$V \backslash W$	20 Ton	25 Ton	30 Ton	35 Ton	40 Ton	45 Ton	50 Ton	55 Ton
5 m/s	0.56	0.64	0.64	0.63	0.70	0.83	0.91	0.98
10 m/s	0.77	0.79	0.87	0.99	1.24	1.20	1.36	1.47
15 m/s	1.00	1.19	1.01	1.24	1.43	1.16	1.22	1.46
20 m/s	1.13	1.09	1.26	1.22	1.07	1.25	1.12	1.40
25 m/s	1.21	1.07	1.20	1.32	1.48	1.37	1.09	1.24
30 m/s	1.22	1.33	1.51	1.09	1.41	1.24	1.28	1.45
35 m/s	1.46	1.14	1.41	1.18	1.39	1.74	2.10	2.47
40 m/s	1.14	1.25	1.35	1.75	2.19	2.54	2.21	1.60

จากตารางที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า การกระจัดเริ่มต้นของผิวทางประเภท B มีค่าไม่เกิน 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.12 การกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่ความเร็ว (V) น้ำหนัก (W) และผิวทางประเภท C

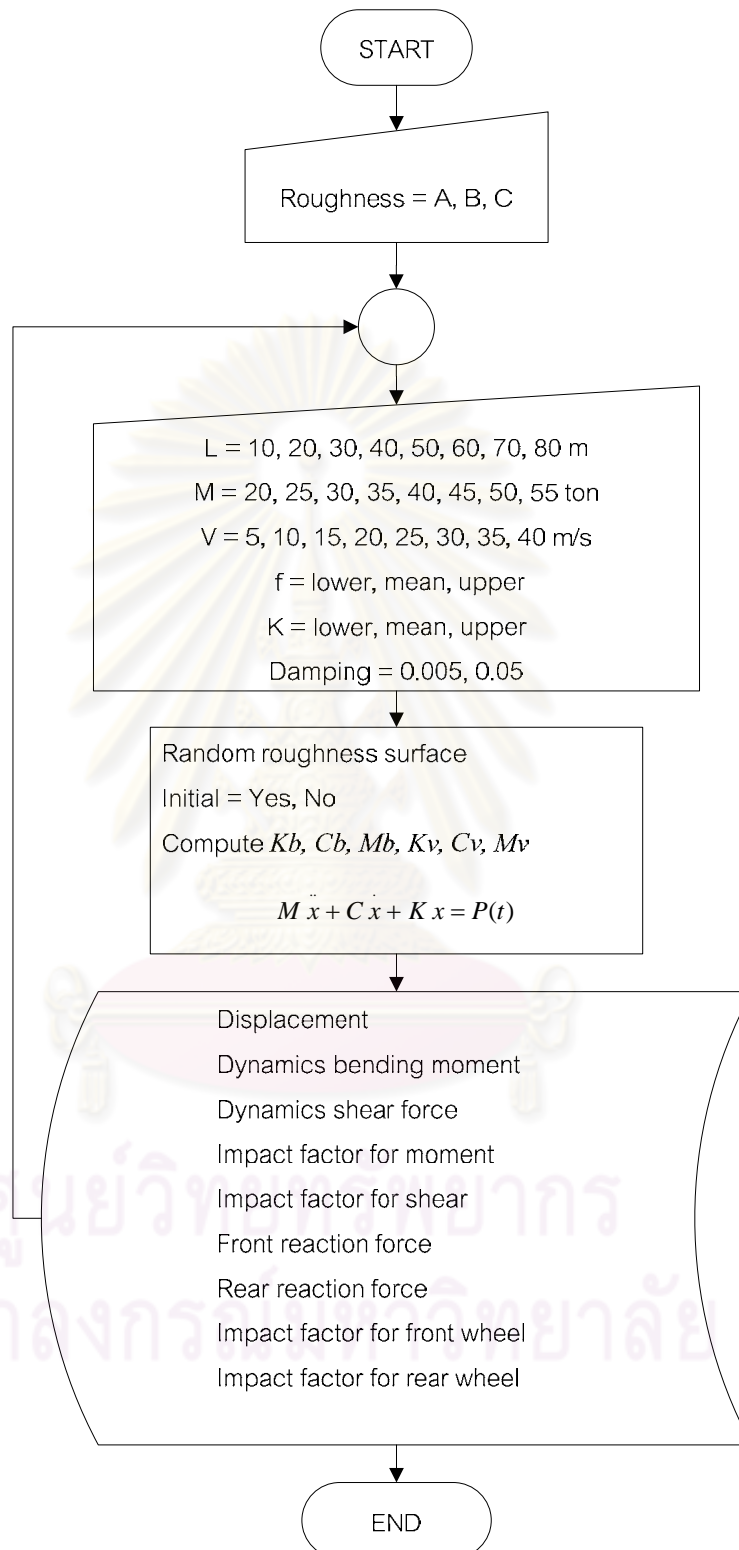
Initial condition of truck (cm), s								
$V \backslash W$	20 Ton	25 Ton	30 Ton	35 Ton	40 Ton	45 Ton	50 Ton	55 Ton
5 m/s	1.12	1.29	1.27	1.22	1.41	1.67	1.83	1.80
10 m/s	1.44	1.60	1.75	2.04	2.31	2.50	2.71	2.82
15 m/s	2.05	2.39	2.58	2.48	2.69	2.63	2.20	2.02
20 m/s	2.23	2.39	1.93	2.13	2.23	2.66	2.05	1.87
25 m/s	2.01	2.21	2.44	1.86	2.23	2.81	2.93	2.50
30 m/s	2.54	1.97	2.59	2.80	2.51	3.51	3.75	3.52
35 m/s	2.29	2.95	2.54	3.83	3.39	4.30	3.61	3.26
40 m/s	2.66	3.30	3.27	4.10	3.27	3.16	3.66	5.22

จากตารางที่ 3.12 จะเห็นได้ว่า การกระจัดเริ่มต้นของผิวทางประเภท C มีค่าอยู่ในช่วง 1-6 เซนติเมตร

ขั้นตอนการทำงานในแบบจำลองคอมพิวเตอร์สามารถแสดงในภาพที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ สมการการเคลื่อนที่ และผลการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง ตัวประกอบการกระแทก โดยขั้นตอนการทำงานจะเริ่มต้นที่การเลือกประเภทผิวทางของสะพาน จากนั้นจึงกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของสะพานได้แก่ ความยาวช่วง ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของรถบรรทุกได้แก่ น้ำหนัก ความเร็ว สติฟเนส แล้วจึงทำการสุ่มรูปแบบของผิวทางประเภทนั้นๆ และกำหนดเงื่อนไขสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกตามลำดับ จากนั้นจึงทำการคำนวณหาคุณสมบัติของรถบรรทุกและสะพานเช่น เมทริกซ์สติฟเนส เมทริกซ์มวล และเมทริกซ์ความหน่วง นำไปคุณสมบัติเหล่านี้ไปใช้ในสมการการเคลื่อนที่ของระบบ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน แก้สมการได้ผลตอบสนองของรถบรรทุกและสะพานในรูปของการกระจัดที่แต่ละองศาอิสระ ซึ่งสามารถนำไปใช้หาผลตอบสนองของสะพานในรูปของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



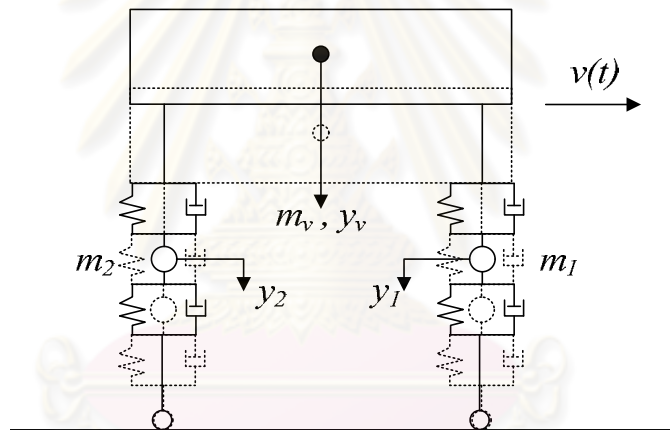
ภาพที่ 3.5 แผนผังการทำงานของแบบจำลองในคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

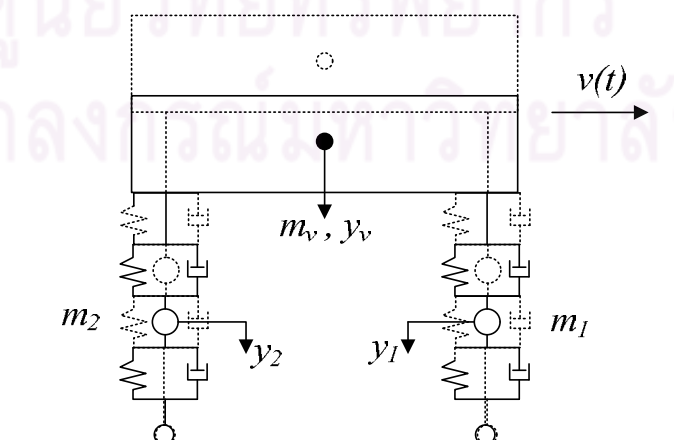
ผลการศึกษา

4.1 สภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก (Initial condition)

สภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุก ในความเป็นจริง ก่อนที่รถบรรทุกจะเคลื่อนที่เข้าสู่สะพานย่อมต้องมีสภาพเริ่มต้นด้วยกันทั้งสิ้น งานวิจัยนี้จะพิจารณาให้สภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกเป็นการกระจัดเริ่มต้น (ความเร็วแนวตั้งเริ่มต้นเป็นศูนย์) โดยให้การกระจัดเริ่มต้นก่อนเข้าสู่สะพานของมวลรถบรรทุก มวลระบบกันสะเทือนหน้าและหลังมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะคือ รถบรรทุกยุบตัวและรถบรรทุกยืดยตัว แสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



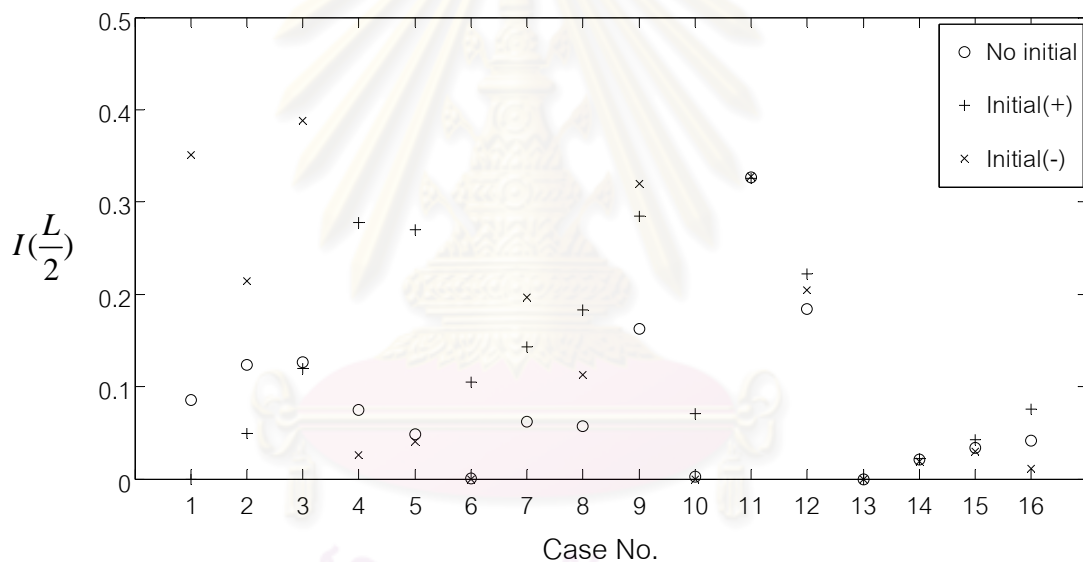
ภาพที่ 4.1 รถบรรทุกมีการกระจัดเริ่มต้นในลักษณะยุบตัว



ภาพที่ 4.2 รถบรรทุกมีการกระจัดเริ่มต้นในลักษณะยืดยตัว

จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 เส้นทึบแสดงถึงลักษณะสมดุขของรถบรรทุกและเส้นประแสดงถึงสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ซึ่งรถบรรทุกจะยุบตัวและยืดตัวในลักษณะที่ไม่มีภาระหมุนทำให้การกระจัดเริ่มต้นของมวลรถบรรทุก มวลระบบกันสะเทือนหน้าและหลังมีค่าเท่ากัน ในที่นี้จะให้รถบรรทุกยุบตัวมีค่าการกระจัดเริ่มต้นเป็นบวกและรถบรรทุกยืดตัวมีค่าการกระจัดเริ่มต้นเป็นลบ

เพื่อแสดงให้เห็นว่าการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานมีผลอย่างไรต่อค่าตัวประกอบการกระแทก จึงได้พิจารณาตัวอย่าง 16 กรณีของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานสำหรับผิวทางประเภท A ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ 16 กรณี สำหรับผิวทางประเภท A

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการกระจัดเริ่มต้นเสมอ โดยอาจเกิดขึ้นในกรณีที่รถบรรทุกมีการกระจัดเริ่มต้นเป็นบวก (รถบรรทุกยุบตัว) หรือการกระจัดเริ่มต้นเป็นลบ (รถบรรทุกยืดตัว) ก็ได้ โดยอาจมีบางกรณีเช่น กรณีที่ 11, 13, 14 และ 15 ที่การกระจัดเริ่มต้นจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของตัวประกอบการกระแทกมากนัก สำหรับกรณีอื่นๆค่าตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะสูงกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นเล็กน้อยแตกต่างกันไป นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ในหลายๆกรณี ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นจะอยู่ระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่มี

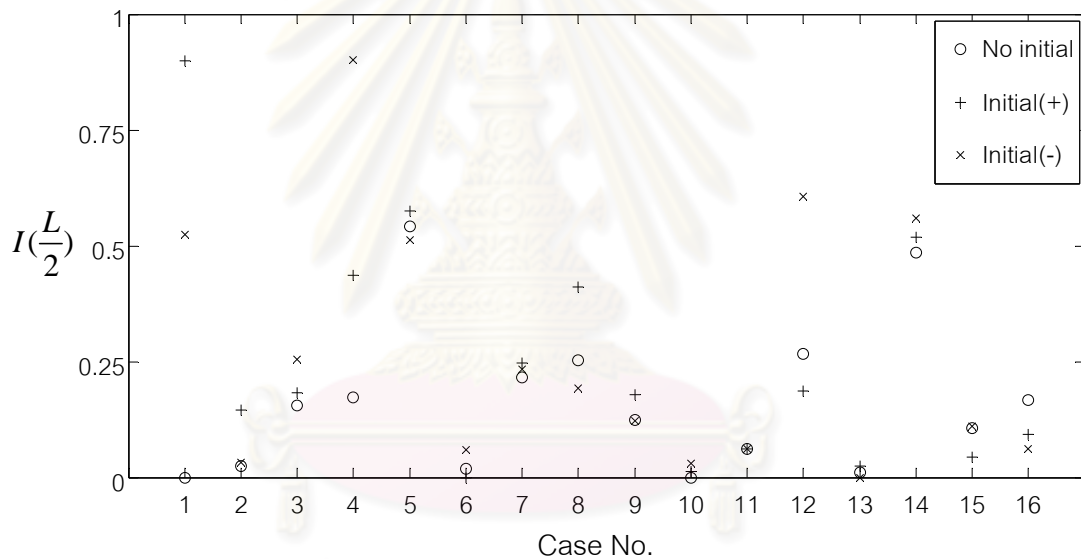
การกระจัดเริ่มต้นเสมอ ยกเว้นในกรณีที่ 7, 8, 9 และ 12 ซึ่งพอจะบ่งบอกได้ว่า ระยะยุบตัวหรือ ระยะยืดตัวที่นำมาคิดการกระจัดเริ่มต้นนั้น น่าจะเพียงพอที่จะให้ค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุด

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกสำหรับ 16 กรณีที่นำมาวิเคราะห์

No.	สะพาน				รถบรรทุก		
	ประเภท ผิวทาง	ความยาว ช่วง (m)	ความถี่ ธรรมชาติ (Hz)	ความหน่วง	น้ำหนัก (ton)	ความเร็ว (m/s)	สติฟเนส (N.m ²)
1	A	10	8.40	0.005	35	40	ค่ากลาง
2	A	10	10.30	0.05	25	10	ขอบบน
3	A	20	5.55	0.05	20	25	ขอบบน
4	A	20	4.20	0.05	50	35	ค่ากลาง
5	A	30	2.85	0.005	45	20	ค่ากลาง
6	A	30	4.90	0.005	35	40	ขอบล่าง
7	A	40	3.85	0.005	25	25	ค่ากลาง
8	A	40	2.15	0.05	40	40	ค่ากลาง
9	A	50	2.45	0.05	30	15	ขอบบน
10	A	50	1.70	0.005	20	30	ขอบล่าง
11	A	60	2.05	0.005	25	5	ขอบล่าง
12	A	60	2.75	0.05	55	20	ขอบบน
13	A	70	1.20	0.005	30	35	ค่ากลาง
14	A	70	1.20	0.005	20	20	ค่ากลาง
15	A	80	1.60	0.05	35	15	ขอบล่าง
16	A	80	1.60	0.05	25	40	ขอบล่าง

จากตารางที่ 4.1 กรณีที่นำมาวิเคราะห์เป็นผิวทางประเภท A โดยทำการสุ่มค่าคุณสมบัติอื่นๆของสะพานและรถบรรทุก เพื่อให้ผลที่ออกมามีความครอบคลุม

ภาพที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระแทกของตัวอย่าง 16 กรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานสำหรับผิวทางประเภท B รายละเอียดของแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.2 โดยได้มีการพิจารณาเงื่อนไขของสภาพเริ่มต้นรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานคือ ไม่มีการกระจัดเริ่มต้น และมีการกระจัดเริ่มต้น เพื่อเป็นการศึกษาว่าการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานมีผลอย่างไรต่อค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.4 ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ 16 กรณี สำหรับผิวทางประเภท B

จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับผิวทางประเภท A และเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีที่ 1 และ 10 ตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมีค่าติดลบ แต่เมื่อมีการกระจัดเริ่มต้นทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่าเป็นบวก รายละเอียดของแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งกรณีที่นำมาวิเคราะห์เป็นกรณีของผิวทางประเภท B โดยทำการสุ่มค่าคุณสมบัติอื่นๆของสะพานและรถบรรทุก เพื่อให้ผลที่ออกมามีความครอบคลุม

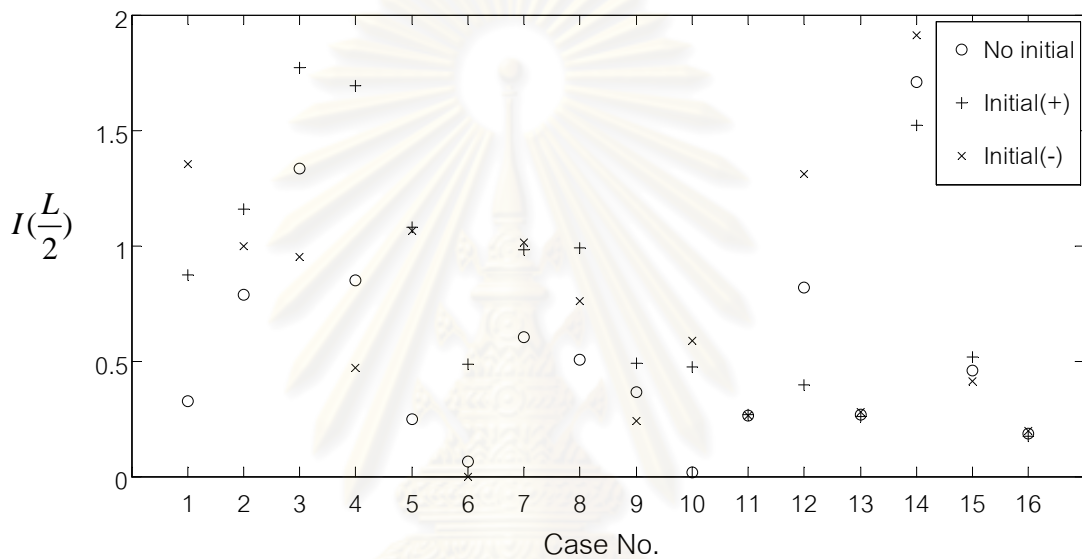
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกสำหรับ 16 กรณีที่นำมาวิเคราะห์

No.	สะพาน				รถบรรทุก		
	ประเภท ผิวทาง	ความยาว ช่วง (m)	ความถี่ ธรรมชาติ (Hz)	ความหน่วง	น้ำหนัก (ton)	ความเร็ว (m/s)	สติฟเนส (N.m ²)
1	B	10	8.40	0.005	25	30	ขอบบน
2	B	10	12.15	0.05	35	10	ค่ากลาง
3	B	20	5.55	0.005	20	15	ขอบล่าง
4	B	20	4.20	0.05	40	35	ขอบบน
5	B	30	4.90	0.005	35	10	ค่ากลาง
6	B	30	3.85	0.05	55	40	ขอบล่าง
7	B	40	2.15	0.005	25	25	ขอบบน
8	B	40	3.85	0.05	40	35	ค่ากลาง
9	B	50	2.45	0.005	35	15	ขอบล่าง
10	B	50	1.70	0.05	50	30	ขอบล่าง
11	B	60	1.40	0.005	25	5	ค่ากลาง
12	B	60	2.05	0.05	45	40	ขอบล่าง
13	B	70	1.20	0.005	30	35	ขอบบน
14	B	70	2.40	0.05	55	10	ค่ากลาง
15	B	80	1.60	0.005	35	15	ขอบล่าง
16	B	80	1.05	0.05	45	40	ขอบบน

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกสำหรับ 16 กรณีที่นำมาวิเคราะห์

No.	สะพาน				รถบรรทุก		
	ประเภท ผิวทาง	ความยาว ช่วง (m)	ความถี่ ธรรมชาติ (Hz)	ความหน่วง	น้ำหนัก (ton)	ความเร็ว (m/s)	สติฟเนส (N.m ²)
1	C	10	8.40	0.005	35	40	ค่ากลาง
2	C	10	10.30	0.05	25	10	ขอบบน
3	C	20	5.55	0.05	20	25	ขอบบน
4	C	20	4.20	0.05	50	35	ค่ากลาง
5	C	30	2.85	0.005	45	20	ค่ากลาง
6	C	30	4.90	0.005	35	40	ขอบล่าง
7	C	40	3.85	0.005	25	25	ค่ากลาง
8	C	40	2.15	0.05	40	40	ค่ากลาง
9	C	50	2.45	0.005	35	15	ขอบล่าง
10	C	50	1.70	0.05	50	30	ขอบล่าง
11	C	60	1.40	0.005	25	5	ค่ากลาง
12	C	60	2.05	0.05	45	40	ขอบล่าง
13	C	70	1.20	0.005	30	35	ขอบบน
14	C	70	2.40	0.05	55	10	ค่ากลาง
15	C	80	1.60	0.005	35	15	ขอบล่าง
16	C	80	1.05	0.05	45	40	ขอบบน

ภาพที่ 4.5 แสดงตัวอย่าง 16 กรณีของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานสำหรับผิวทางประเภท C โดยรายละเอียดของแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 4.3 เพื่อศึกษาผลจากการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกที่มีต่อค่าตัวประกอบการกระแทก จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับผิวทางประเภท A และ B และเป็นที่น่าสนใจว่าในกรณีที่ 5 ตัวประกอบการกระแทกที่การกระจัดเริ่มต้นเป็นบวกและตัวประกอบการกระแทกที่การกระจัดเริ่มต้นเป็นลบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นอยู่พอสมควร



ภาพที่ 4.5 ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ 16 กรณี สำหรับผิวทางประเภท C

ต่อไปจึงทำการศึกษาว่า ตัวประกอบการกระแทกในทุกๆกรณีจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการกระจัดเริ่มต้นหรือไม่ โดยหาผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่สูงกว่าจากการกระจัดเริ่มต้นเป็นบวกและลบ กับตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นดังสมการที่ 4.1

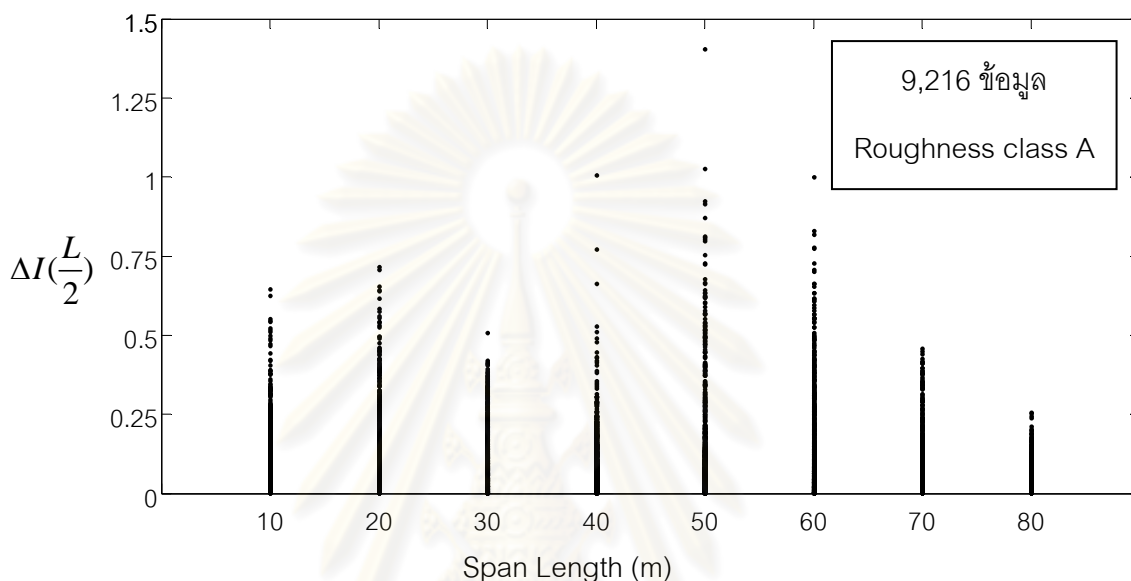
$$\Delta I\left(\frac{L}{2}\right) = I'\left(\frac{L}{2}\right) - I\left(\frac{L}{2}\right) \quad (4.1)$$

$\Delta I\left(\frac{L}{2}\right)$ คือ ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

$I'\left(\frac{L}{2}\right)$ คือ ตัวประกอบการกระแทกที่สูงกว่าจากการกระจัดเริ่มต้นเป็นบวกและลบ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

$I\left(\frac{L}{2}\right)$ คือ ตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

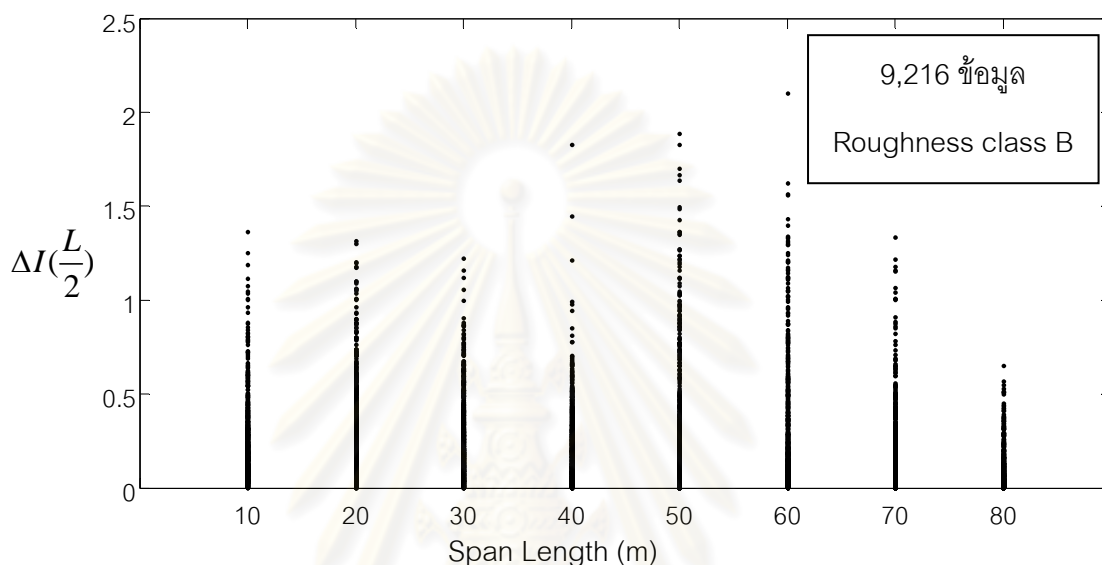
ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A ดังแสดงในภาพที่ 4.6 โดยจะทำการวิเคราะห์ทีละจุดๆตัวแปรได้แก่ ความเร็ว สติฟเนสของล้อและระบบกันสะเทือน และน้ำหนักของรถบรรทุก ความยาวช่วง ความหน่วง และความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งจะมีทั้งหมด 9,216 กรณี



ภาพที่ 4.6 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A

จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกทั้ง 9216 กรณีจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ นั่นหมายความว่าตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมากกว่าหรือเท่ากับตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นเสมอสำหรับผิวทางประเภท A และในหลายๆกรณีตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นได้ถึง 0.5 – 1.0 ส่วนกรณีที่ผลต่างมากที่สุดเท่ากับ 1.40 ที่ความยาวช่วงเท่ากับ 50 เมตรนั้นพบว่า เป็นกรณีของรถบรรทุก 20 ตัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 40 เมตรต่อวินาที โดยมีสติฟเนสของรถบรรทุกและความถี่ธรรมชาติของสะพานเป็นค่าที่ขอบบน อัตราส่วนความหน่วงของสะพานเท่ากับ 0.005 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นกรณีที่รถบรรทุกมีน้ำหนักต่ำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปบนสะพานที่มีอัตราส่วนความหน่วงต่ำ ทั้งนี้ความถี่ธรรมชาติของสะพานอาจมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกอีกด้วย

ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท B ดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยจะทำการวิเคราะห์ในทุกๆตัวแปรได้แก่ ความเร็ว สติฟเนสของล้อและระบบกันสะเทือน และน้ำหนักของรถบรรทุก ความยาวช่วง ความหน่วง และความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งจะมีทั้งหมด 9,216 กรณี

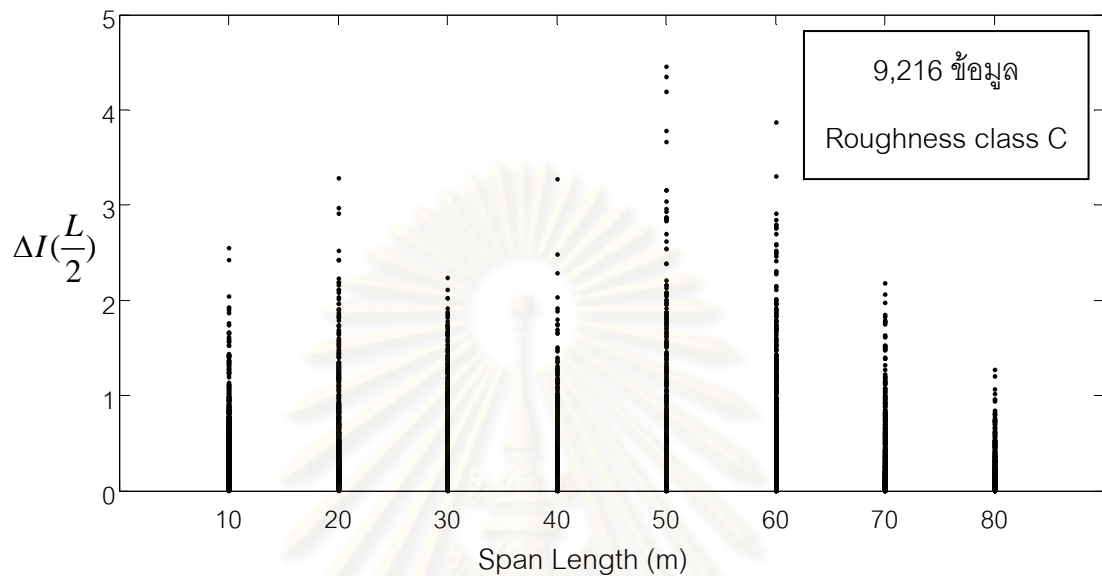


ภาพที่ 4.7 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ นั่นหมายความว่าตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมากกว่าหรือเท่ากับตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นเสมอสำหรับผิวทางประเภท B และในหลายๆกรณีตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นได้ถึง 1 - 1.5 ส่วนกรณีที่ผลต่างมากที่สุดเท่ากับ 2.10 ที่ความยาวช่วงเท่ากับ 60 เมตรนั้นพบว่า เป็นกรณีของรถบรรทุก 40 ตัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 40 เมตรต่อวินาที โดยมีสติฟเนสของรถบรรทุกและความถี่ธรรมชาติของสะพานเป็นค่าที่ขอบบน อัตราส่วนความหน่วงของสะพานเท่ากับ 0.005 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปบนสะพานที่มีอัตราส่วนความหน่วงต่ำ ทั้งนี้ความถี่ธรรมชาติของสะพานอาจมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกอีกด้วย

ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท C ดังแสดงในภาพที่ 4.8 โดยจะทำการวิเคราะห์ในทุกตัวแปรได้แก่ ความเร็ว สติฟเนสของล้อและระบบกันสะเทือน

และน้ำหนักของรถบรรทุก ความยาวช่วง ความหน่วง และความถี่ธรรมชาติของสะพาน ซึ่งจะมีทั้งหมด 9,216 กรณี



ภาพที่ 4.8 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C

จากภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ นั่นหมายความว่าตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมากกว่าหรือเท่ากับตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นเสมอสำหรับผิวทางประเภท C และในหลายๆกรณีตัวประกอบการกระแทกที่มีการกระจัดเริ่มต้นจะมากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ไม่มีการกระจัดเริ่มต้นได้ถึง 2 - 3 ส่วนกรณีที่ผลต่างมากที่สุดเท่ากับ 4.46, 4.35 และ 4.20 ที่ความยาวช่วงเท่ากับ 50 เมตรนั้นพบว่า เป็นกรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปบนสะพานที่มีอัตราส่วนความหน่วงต่ำ ทั้งนี้ความถี่ธรรมชาติของสะพานอาจมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกอีกด้วย

จากภาพที่ 4.6 - 4.8 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกตามยาวความยาวช่วงต่างๆของสะพานมีความคล้ายคลึงกัน และจากทั้งหมด 27648 กรณีจะเห็นได้ว่า การกระจัดเริ่มต้นมีผลต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีผลทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้นจากที่

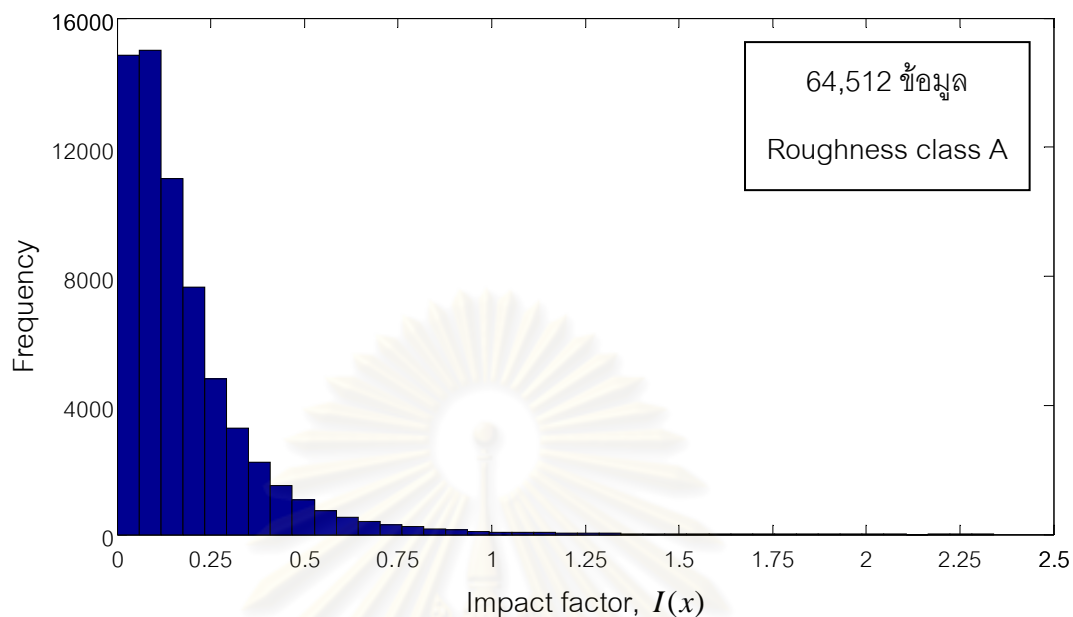
ไม่มีการกระจัดเริ่มต้น ดังนั้นการพิจารณาการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบการกระแทกสูงสุด

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการกระจัดเริ่มต้นโดยให้การกระจัดก่อนเข้าสู่สะพานของมวลรถบรรทุก มวลระบบกันสะเทือนหน้าและหลังมีค่าเท่ากันซึ่งมี 2 ลักษณะคือ ยึดตัวและยึดตัว นั่นหมายความว่ารถบรรทุกจะไม่อยู่ในลักษณะของการเอียงตัว นอกจากนี้พลังงานสะสมในรถบรรทุกที่ได้จากผลรวมของพลังงานศักย์ยืดหยุ่นและพลังงานจลน์ ซึ่งถูกนำมาใช้พิจารณาสภาพเริ่มต้น (Initial condition) ของรถบรรทุก จะนำพลังงานสะสมมาใช้หาการกระจัดเริ่มต้นเท่านั้น ทั้งๆที่ในความเป็นจริงรถบรรทุกจะมีสภาพเริ่มต้นใน 2 ลักษณะคือ การกระจัดเริ่มต้นและความเร็วเริ่มต้น โดยการกระจัดเริ่มต้นของรถบรรทุกจะมาจากพลังงานศักย์ยืดหยุ่น ส่วนความเร็วเริ่มต้นของรถบรรทุกจะมาจากพลังงานจลน์ เพราะฉะนั้นพลังงานสะสม 1 ค่า จะสามารถนำมาใช้หาสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกได้หลายลักษณะ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้สภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกเป็นการกระจัดเริ่มต้นเท่านั้น โดยการกระจัดเริ่มต้นนี้จะคำนวณจากพลังงานสะสมของรถบรรทุก สติเฟเนสของล้อและสติเฟเนสของระบบกันสะเทือน ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้ง่ายและคาดว่าจะมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำมาพิจารณา

4.2 การกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ

หัวข้อนี้จะแสดงการกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C ซึ่งจะแสดงค่าตัวประกอบการกระแทกที่มาจาก 7 ตำแหน่งตามความยาวสะพานคือ $L/8$, $L/4$, $3L/8$, $L/2$, $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$ แต่แต่ละประเภทผิวทางจะมีการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกไปบนสะพานทั้งหมด 9,216 กรณี ทำให้มีข้อมูลที่นำมาสร้างเป็นแผนภาพการกระจายตัวสำหรับผิวทางประเภทต่างๆเท่ากับ $9,216 \text{ กรณี} \times 7 \text{ ตำแหน่ง} = 64,512 \text{ ข้อมูล}$

สร้างแผนภาพการกระจายของตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดของสะพานสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ ทั้ง 7 ตำแหน่งบนสะพานดังแสดงในภาพที่ 4.9 – 4.11



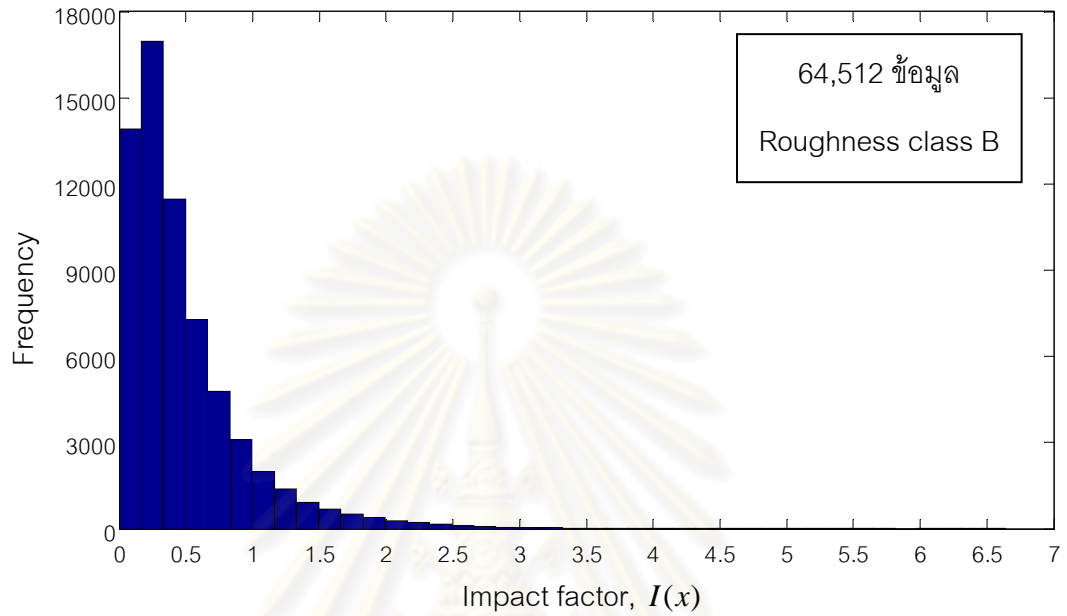
ภาพที่ 4.9 แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A

จากภาพที่ 4.9 แกนตั้งแสดงถึงจำนวนข้อมูลที่แต่ละช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทก ส่วนแกนนอนจะเป็นช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทก จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่ตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 0.25 ซึ่งค่าที่ได้จะไม่เกินค่าที่มาตรฐานการออกแบบสะพานกำหนด โดยผิวทางประเภท A เป็นผิวทางของสะพานทั่วไปซึ่งจัดได้ว่าอยู่ในสภาพดี

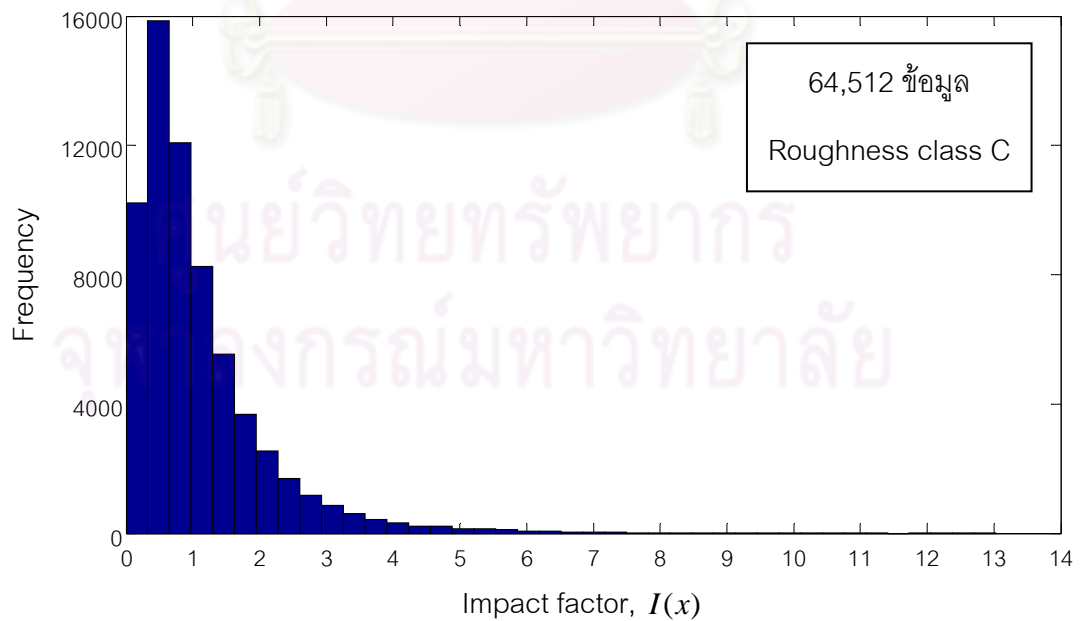
จากภาพที่ 4.10 แกนตั้งแสดงถึงจำนวนข้อมูลที่แต่ละช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทก ส่วนแกนนอนจะเป็นช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทก จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่ตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท B จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 1 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A โดยผิวทางประเภท B เป็นผิวทางที่มีสภาพพอใช้

จากภาพที่ 4.11 แกนตั้งแสดงถึงจำนวนข้อมูลที่แต่ละช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทก ส่วนแกนนอนจะเป็นช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทก จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่ตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท C จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 2 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A และ B โดยผิวทางประเภท C จัดได้ว่าเป็นผิวทางที่มีสภาพแย่มาก จากภาพที่ 4.9 - 4.11 แนวโน้มจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C มีความแตกต่างกันมาก โดยผิวทางที่แย่มากจะทำให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมา ทำการหาค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย

ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 และค่าสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกที่ผิวทางประเภทต่างๆแสดงในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.10 แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท B



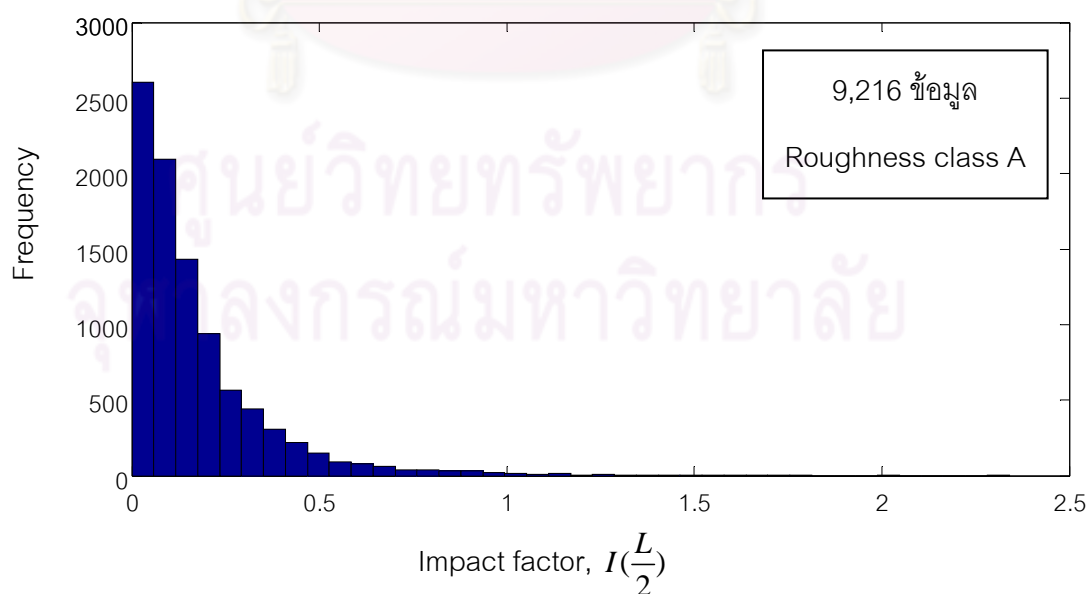
ภาพที่ 4.11 แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท C

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C

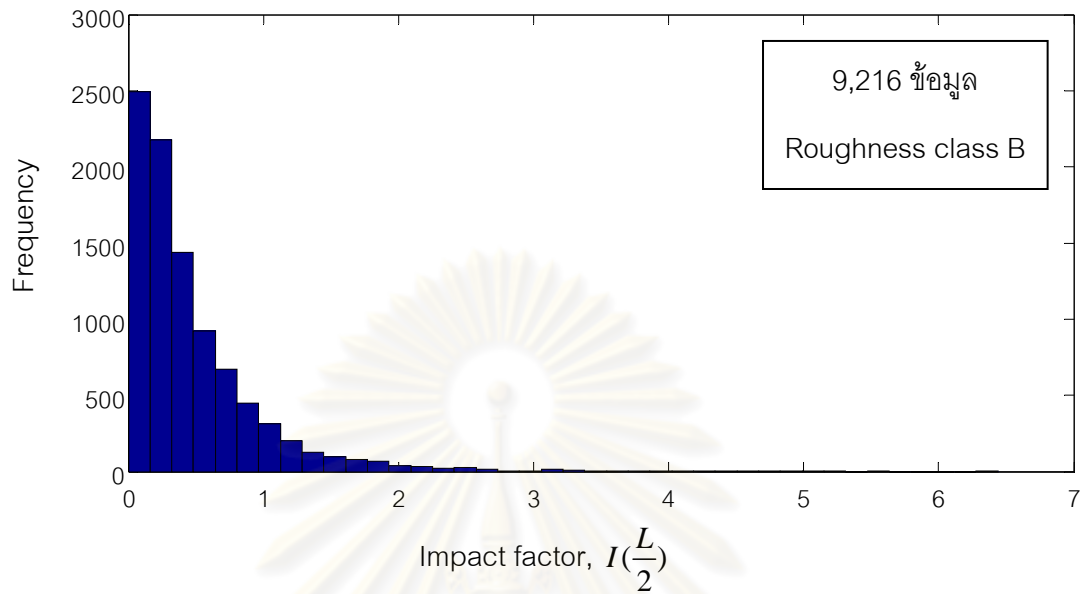
Roughness Class	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
A	0.00	0.18	0.72	2.34	64,512
B	0.00	0.49	1.91	6.64	64,512
C	0.00	1.10	4.14	13.03	64,512

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละผิวทางจะมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ทางสถิติของแต่ละประเภทผิวทางมีทั้งหมด 64512 ข้อมูลซึ่งเป็นจำนวนข้อมูลที่มากจึงมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นการวิเคราะห์ต่อไปจึงจำเป็นต้องแยกการวิเคราะห์ออกเป็นผิวทางประเภท A, B, และ C เพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและเป็นไปตามผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริง

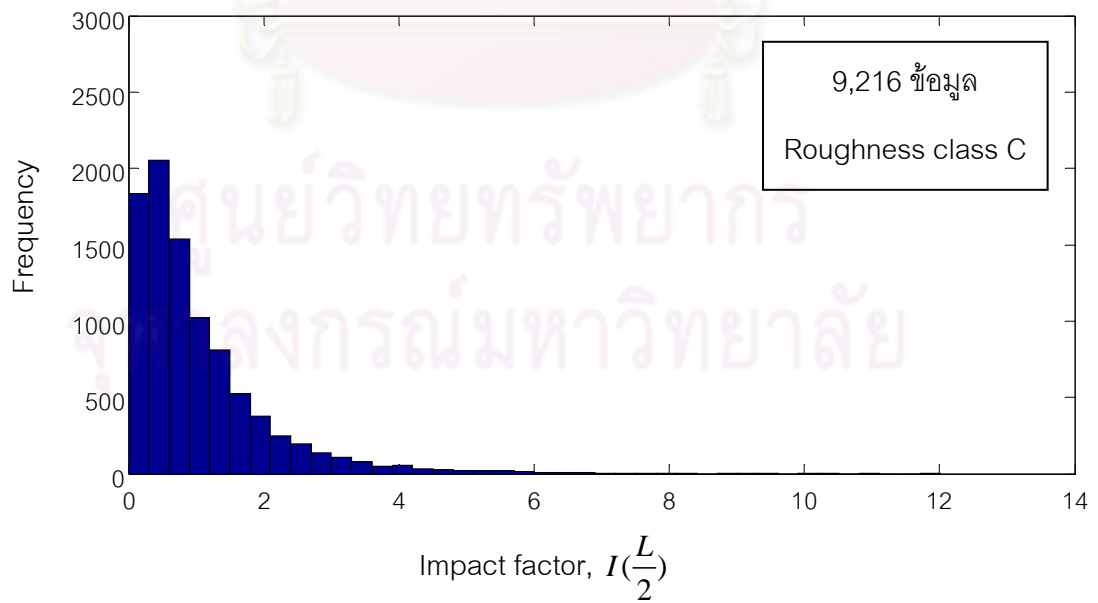
นอกจากนี้ยังได้ทำแผนภาพแสดงการกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.12– 4.14 จะเห็นได้ว่าการกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 4.9– 4.11 ดังนั้นการกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่นๆจึงน่าจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4.12 แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.13 แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับ
ผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.14 แผนภาพการกระจายค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับ
ผิวทางประเภท C

จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบค่าตัวประกอบการกระแทกทั้ง 7 ตำแหน่งของสะพาน จึงทำการหาค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 และค่าสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้ที่ความใกล้เคียงกับค่าในตารางที่ 4.4 และตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่นๆอาจมีค่ามากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้เช่นกัน โดยประเด็นนี้จะมีการศึกษาในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C

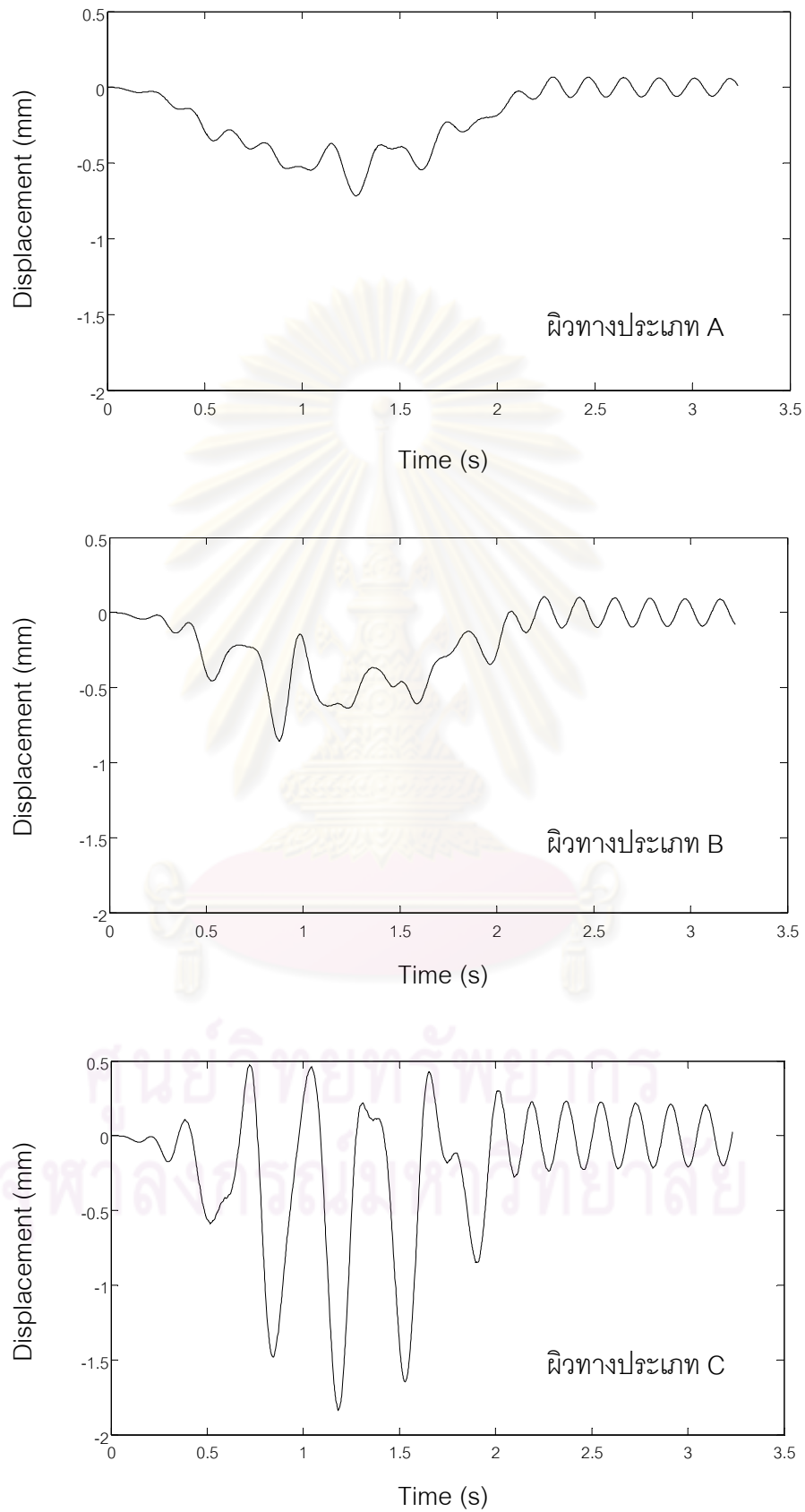
Roughness Class	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
A	L/8	0	0.14	0.49	1.57	9216
	L/4	0	0.16	0.59	1.82	9216
	3L/8	0	0.16	0.68	2.1	9216
	L/2	0	0.17	0.78	2.34	9216
	5L/8	0	0.19	0.78	2.24	9216
	3L/4	0	0.22	0.82	2.09	9216
	7L/8	0	0.22	0.79	2.08	9216
B	L/8	0	0.41	1.58	5.21	9216
	L/4	0	0.43	1.68	5.67	9216
	3L/8	0	0.45	1.81	6.1	9216
	L/2	0	0.47	1.93	6.44	9216
	5L/8	0	0.51	2.01	6.64	9216
	3L/4	0	0.57	2.07	6.58	9216
	7L/8	0	0.59	2.08	6.29	9216

Roughness Class	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
C	L/8	0	0.97	3.59	9.94	9216
	L/4	0	1	3.77	10.64	9216
	3L/8	0	1.02	3.98	11.39	9216
	L/2	0	1.05	4.17	12.01	9216
	5L/8	0	1.12	4.34	12.34	9216
	3L/4	0	1.23	4.56	13.03	9216
	7L/8	0	1.28	4.47	12.68	9216

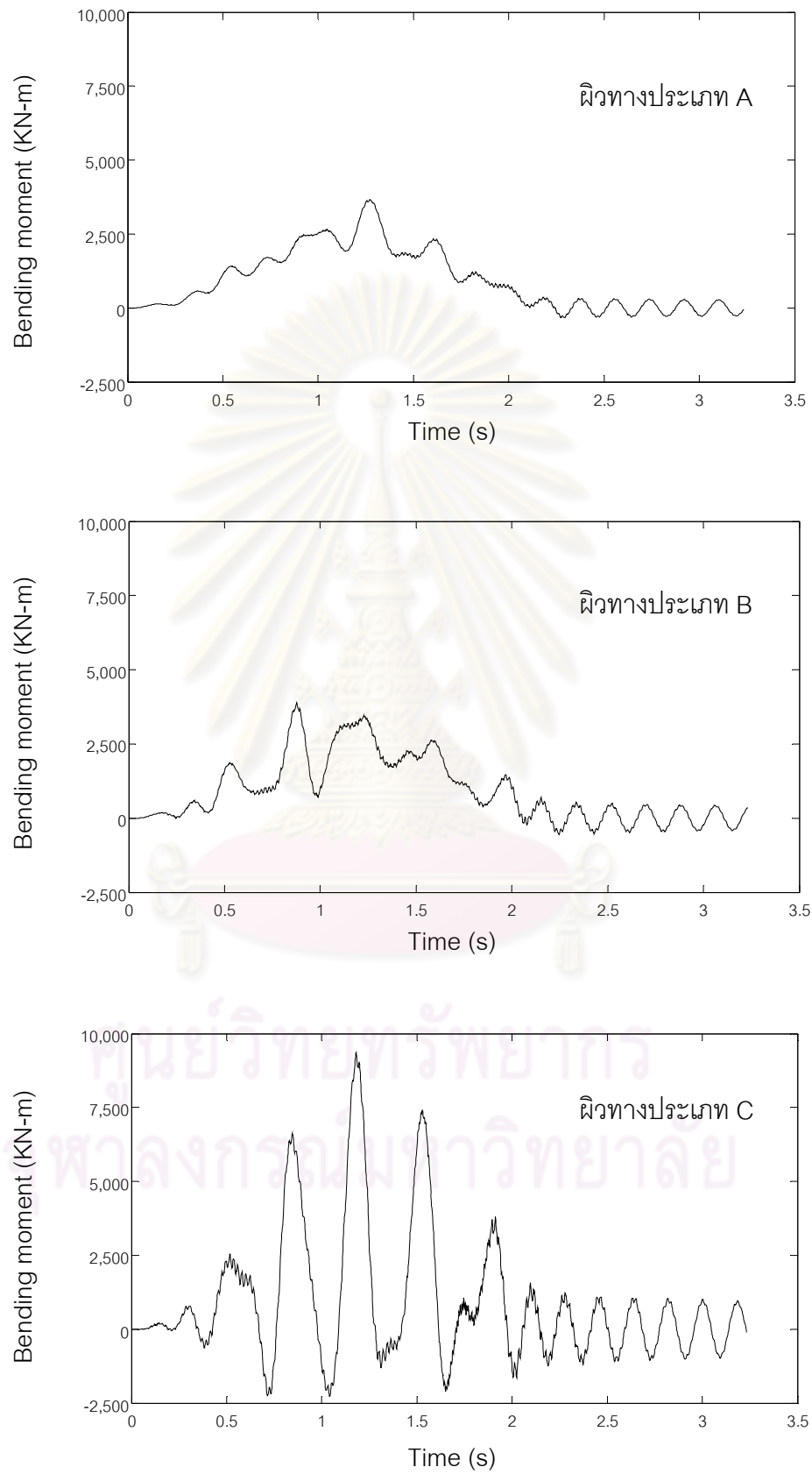
หัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาที่มาของความแตกต่างระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกของผิวทางประเภท A, B, และ C โดยจะศึกษาจากทั้งผลตอบสนองของสะพานและผลตอบสนองของรถบรรทุกในขณะรถบรรทุกกำลังเคลื่อนที่ไปบนสะพาน กรณีที่นำมาศึกษามีคุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกตามตารางที่ 4.6 ได้ตอบสนองของสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ดังแสดงในภาพที่ 4.15-4.16 และผลตอบสนองของรถบรรทุกดังแสดงในภาพที่ 4.17-4.18

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกของกรณีที่นำมาศึกษา

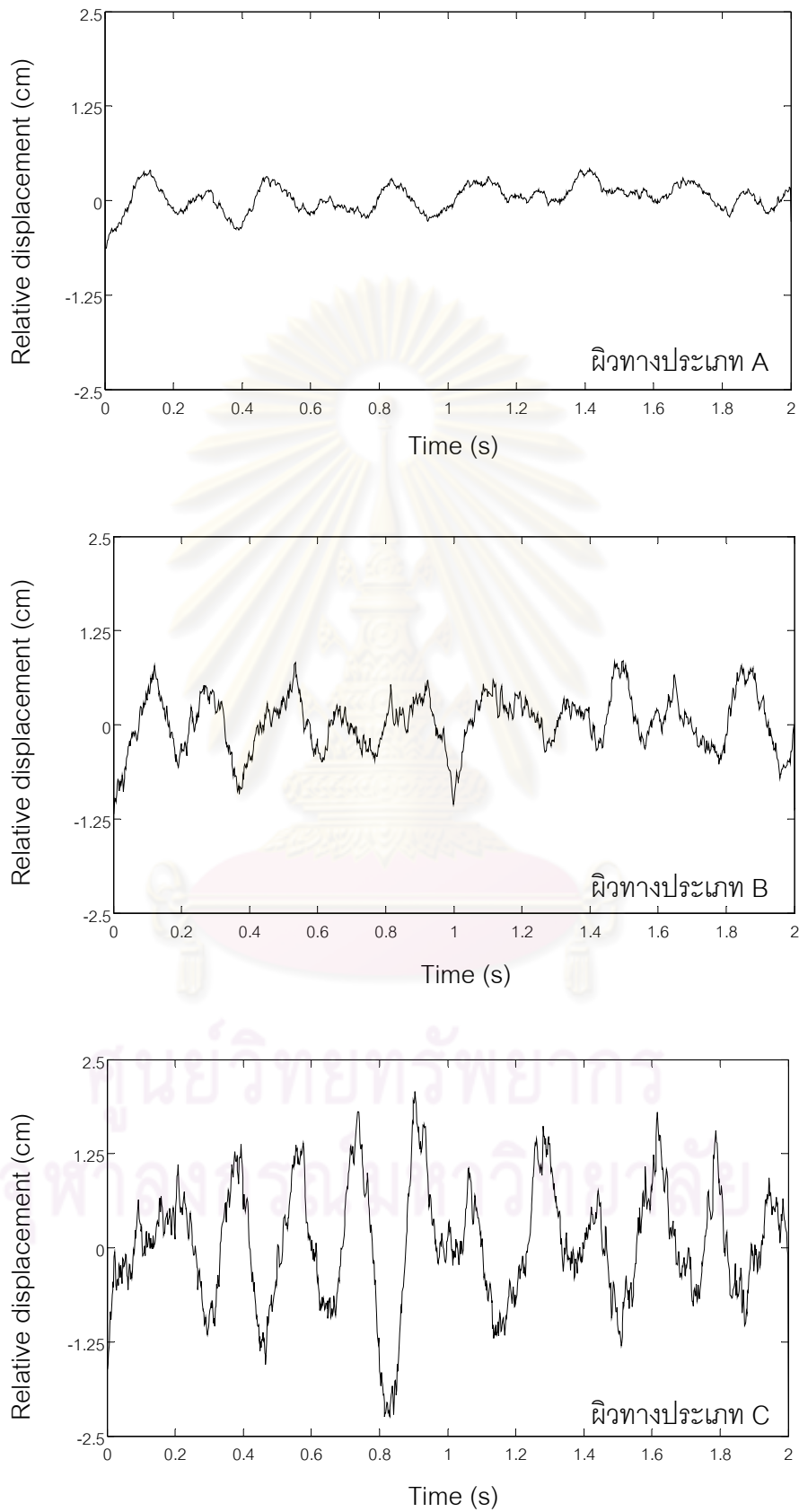
สะพาน	ความยาวช่วง (m)	40
	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	2.95
	อัตราส่วนความหน่วง	0.05
รถบรรทุก	น้ำหนัก (ton)	30
	ความเร็ว (m/s)	20
	สติเฟเนส	ค่ากลาง



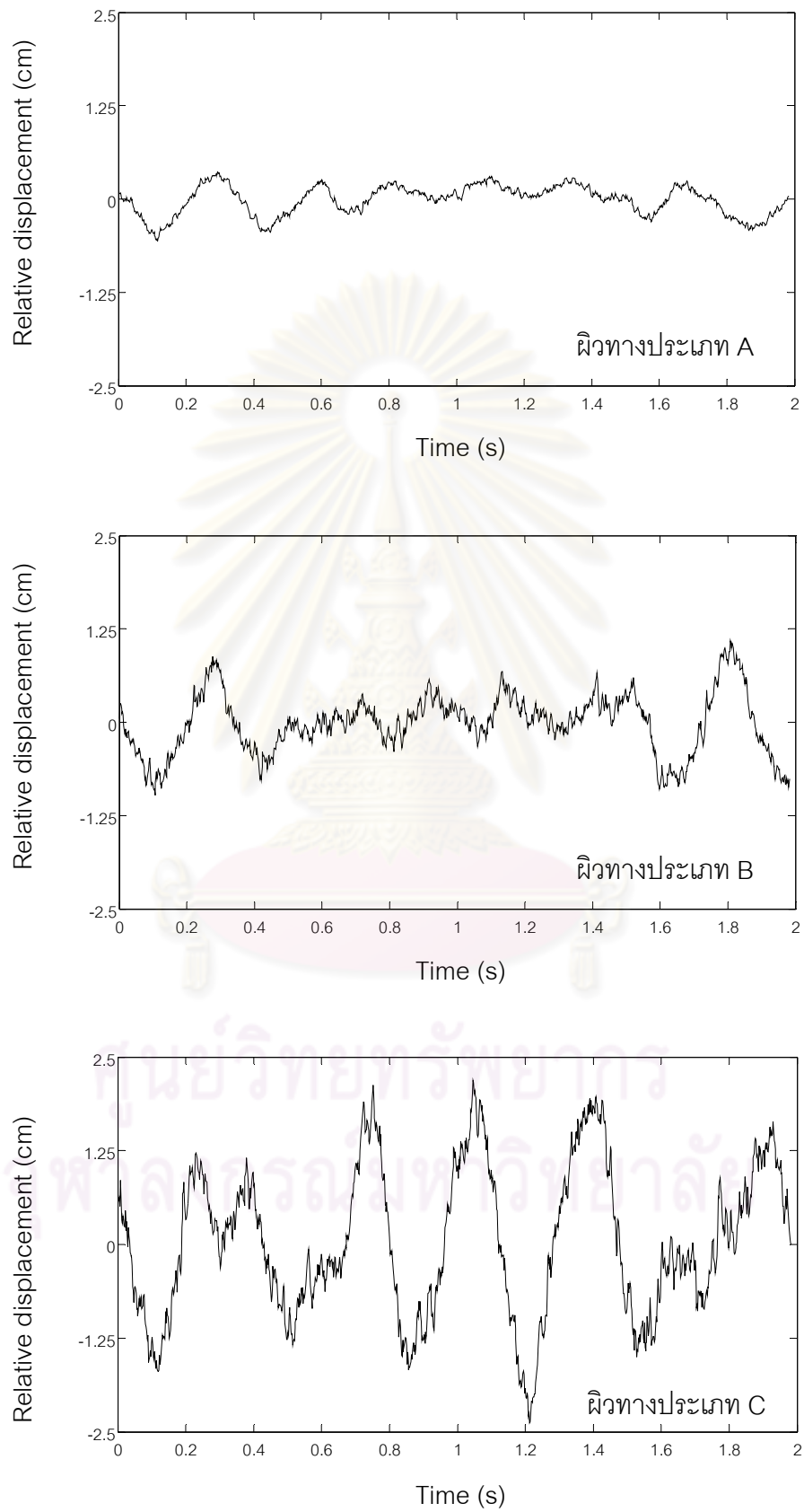
ภาพที่ 4.15 การกระจัดในแนวตั้ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับฝิวทางประเภทต่างๆ



ภาพที่ 4.16 โมเมนต์ดัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับฉิวทางประเภทต่างๆ



ภาพที่ 4.17 การสั่นของเพลาน้ำรถบรรทุกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ



ภาพที่ 4.18 การสั่นของเพลาลังรถบรรทุกสำหรับฝิวทางประเภทต่างๆ

จากภาพที่ 4.15-4.16 เป็นผลตอบสนองในรูปของการกระจัดในแนวดิ่งและโมเมนต์ดัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในช่วงเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน พบว่าผลตอบสนองของสะพานที่เกิดขึ้นแต่ละประเภทผิวทางจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผิวทางประเภท C จะแตกต่างกันเห็นได้ชัด แต่ความแตกต่างของผลตอบสนองสะพานระหว่างผิวทางประเภท A และผิวทางประเภท B จะไม่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มที่เห็นได้ว่า ผิวทางประเภท B จะสร้างผลตอบสนองที่มากกว่าผิวทางประเภท A

จากภาพที่ 4.17-4.18 เป็นผลตอบสนองในรูปของการสั่นที่เพลาน้ำและเพลาลังของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพาน พบว่าผลตอบสนองของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละประเภทผิวทาง สิ่งที่เกิดขึ้นนี้จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันของค่าตัวประกอบการกระแทกในแต่ละประเภทผิวทาง

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่างๆ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่างๆนั้น จะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) โดยวิธีการนี้เป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกัน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นมี 3 ลักษณะคือ ความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม และไม่มีความสัมพันธ์กัน โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.2

$$r(X, Y) = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] \cdot [n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (4.2)$$

โดย r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรระหว่างตัวแปร X และ Y

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

X_i, Y_i คือ ค่าของตัวแปรแต่ละตัว

คุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) มีลักษณะดังนี้

1) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่าที่เป็นบวกหมายถึงแปรผันตามกัน ส่วนค่าที่เป็นลบหมายถึงแปรผกผันกัน และค่าศูนย์หมายถึงไม่มีความสัมพันธ์กัน ยิ่งค่า

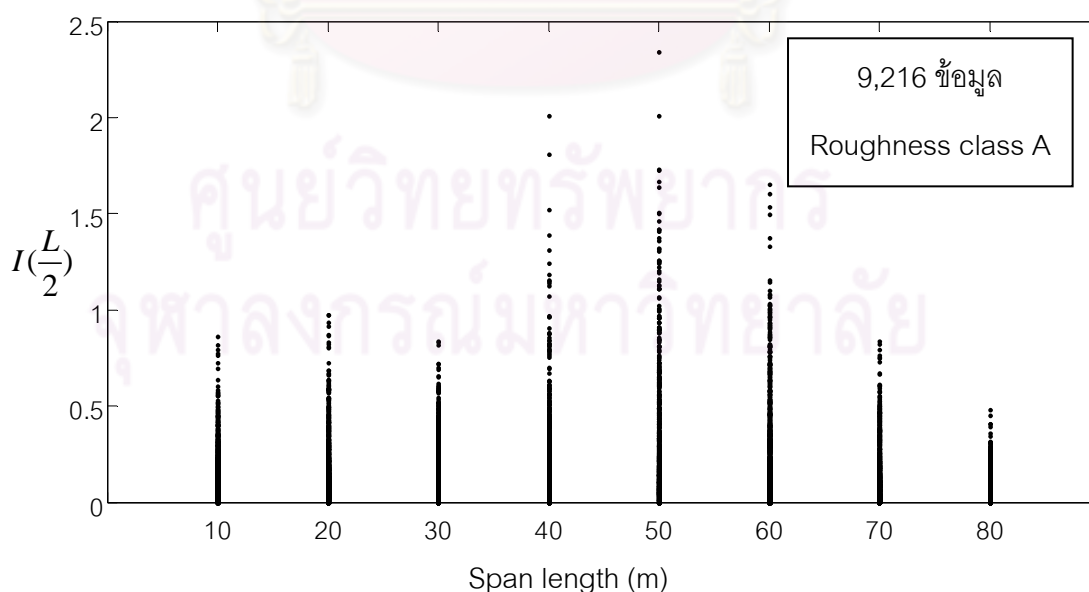
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 นั้นหมายความว่ามีความสัมพันธ์กันมาก แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะหมายความว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย

2) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นการวัดความสัมพันธ์ในเชิงเส้น โดยจะมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับหน่วยในการวัดของสองสิ่งที่ต้องการมาหาความสัมพันธ์ ซึ่งไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนหน่วยอย่างไรก็ จะไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เปลี่ยนแปลง

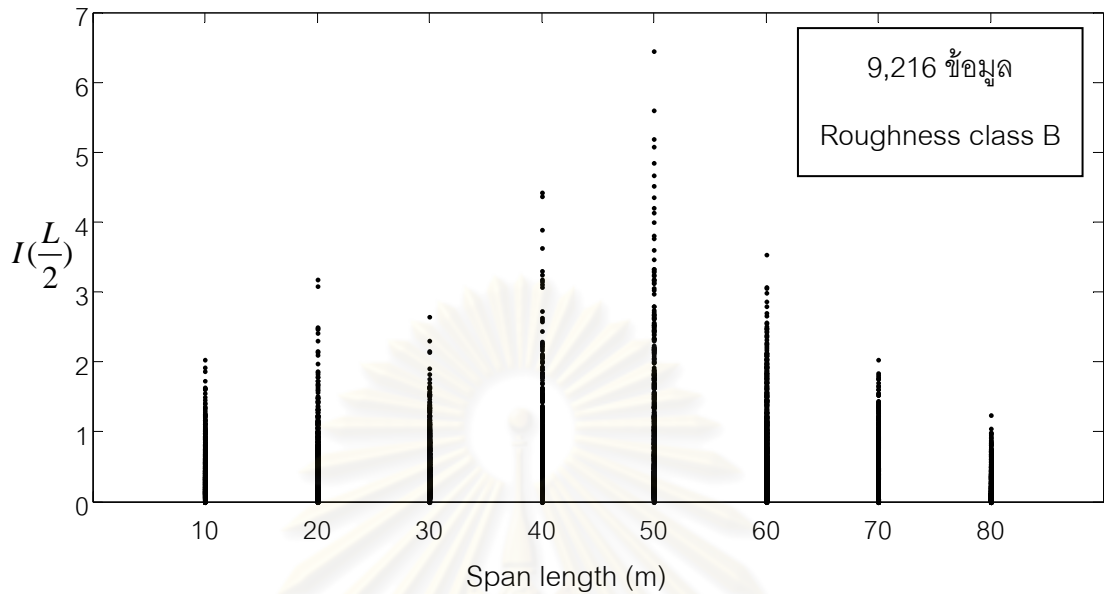
งานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับตัวแปรต่างๆ ทั้งยังนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานหรืองานวิจัยอื่นๆอีกด้วย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้จะเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในเชิงเส้นเท่านั้น โดยจะใช้ตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดในการความสัมพันธ์ดังกล่าว

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความยาวช่วงของสะพาน

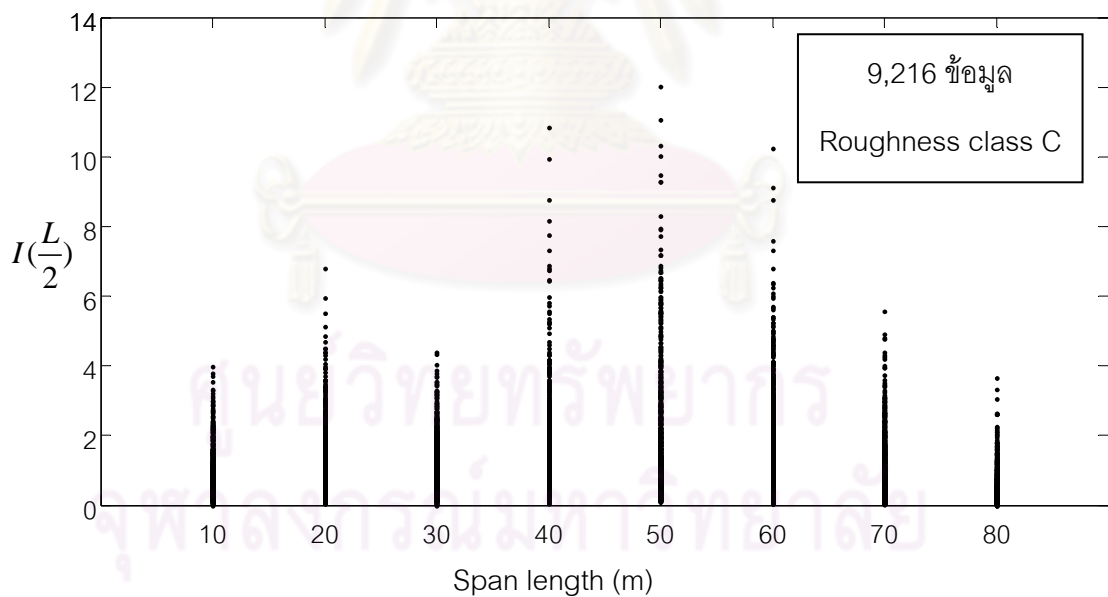
จากการวิเคราะห์ที่ได้ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน นำไปพลอตค่าตัวประกอบการกระแทกที่ความยาวช่วงต่างๆ โดยแบ่งแยกเป็นผิวทางประเภท A, B และ C ดังแสดงในภาพที่ 4.19 – 4.21



ภาพที่ 4.19 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.20 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.21 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C

จากภาพที่ 4.19 – 4.21 เป็นค่าตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความยาวช่วงต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A, B และ C ซึ่งแต่ละภาพจะมีข้อมูลทั้งหมด 9216 กรณีของการที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน สังเกตเห็นว่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละ

ความยาวช่วงมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างกว้างโดยเฉพาะที่ความยาวช่วง 40, 50 และ 60 เมตร การกระจายตัวที่กว้างนี้ส่งผลให้การเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวประกอบการกระแทกที่ความยาวช่วงต่างๆสามารถทำได้ยาก แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดจากภาพทั้งสามคือ สภาพผิวทางที่แย่จะส่งผลให้ตัวประกอบการกระแทกมีค่ามากขึ้น โดยผิวทางประเภท C เป็นผิวทางที่แย่ที่สุดในบรรดาทั้งสามผิวทาง และผิวทางประเภท A เป็นผิวทางที่ดีที่สุดใบบรรดาทั้งสามผิวทาง

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า ลักษณะการกระจายตัวของตัวประกอบการกระแทกในภาพทั้งสามมีความคล้ายคลึงกัน และจากภาพสามารถบ่งบอกได้เพียงว่าช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละความยาวช่วงสำหรับผิวทางประเภทต่างๆมีค่าน้อยเพียงใด โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวประกอบการกระแทกมีความสัมพันธ์อย่างไรกับความยาวช่วง ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความยาวช่วงของสะพานดังแสดงในตารางที่ 4.7

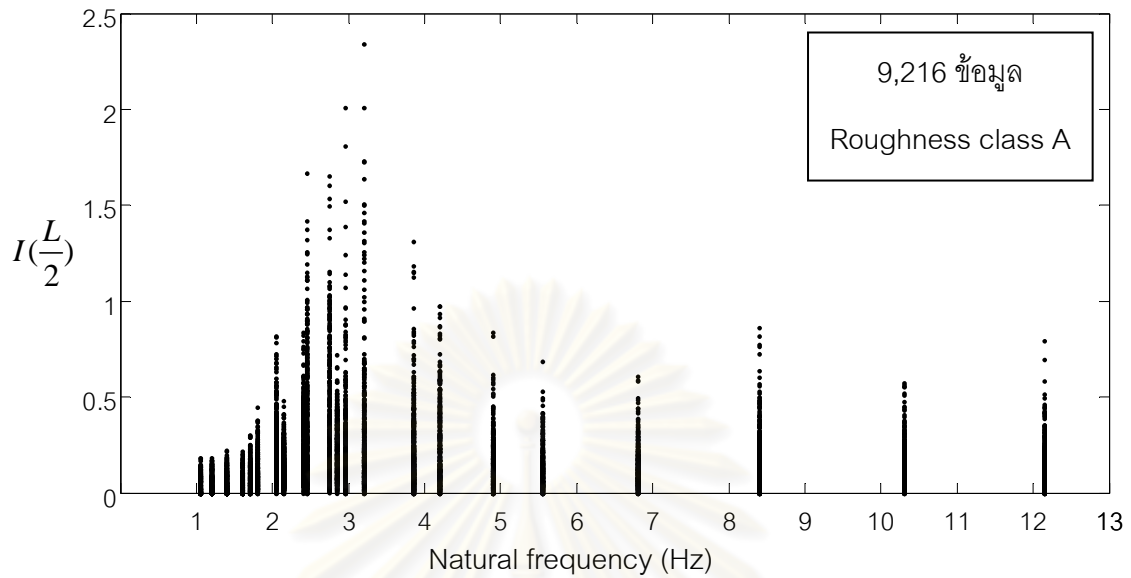
ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความยาวช่วงของสะพาน

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทก (I) กับความยาวช่วงของสะพาน (L)		
ผิวทาง \ ความสัมพันธ์	$I \propto L$	$I \propto \frac{1}{L}$
ประเภท A	-0.0792	-0.0225
ประเภท B	-0.0774	-0.0368
ประเภท C	-0.0616	-0.0519

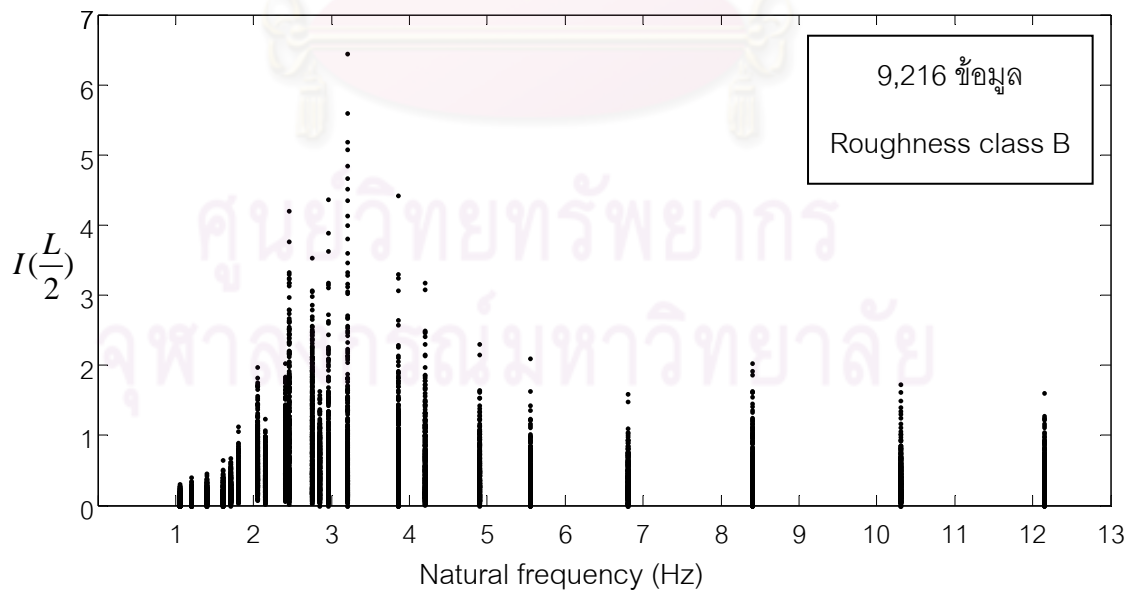
จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะ เป็นความสัมพันธ์แบบใดหรือผิวทางประเภทใด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เสมอ ซึ่งหมายความว่าตัวประกอบการกระแทกไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความยาวช่วงของสะพาน

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน

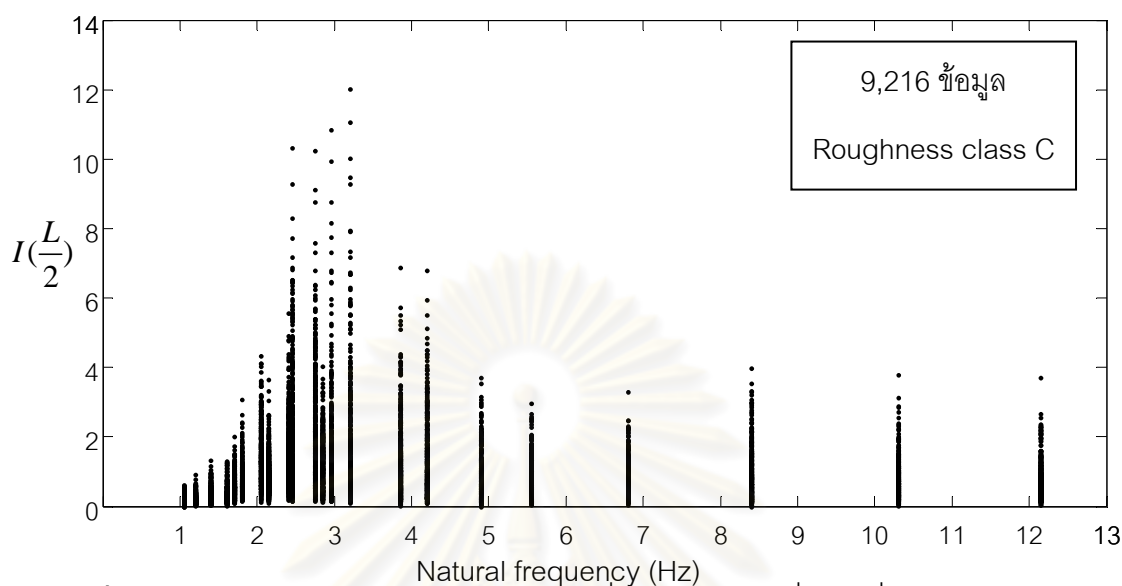
ทำการพลอตค่าตัวประกอบการกระแทกที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของสะพาน โดยแบ่งแยกเป็นผิวทางประเภท A, B และ C ดังแสดงในภาพที่ 4.22 – 4.24



ภาพที่ 4.22 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของ สะพานสำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.23 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของ สะพานสำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.24 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆของ สะพานสำหรับผิวทางประเภท C

จากภาพที่ 4.22 - 4.24 เป็นค่าตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง สะพาน ที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A, B และ C ซึ่งแต่ละภาพจะมีข้อมูล ทั้งหมด 9216 กรณีของการที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน สังเกตเห็นว่า ลักษณะการกระจายตัว ของตัวประกอบการกระแทกในภาพทั้งสามมีความคล้ายคลึงกัน โดยช่วงที่ความถี่ธรรมชาติมีค่า ตั้งแต่ศูนย์ถึง 2.5 Hz จะสังเกตเห็นว่าเป็นช่วงที่ตัวประกอบการกระแทกแปรผันตามความถี่ ธรรมชาติ จากนั้นช่วงของความถี่ธรรมชาติตั้งแต่ 2.5 Hz ถึง 4 Hz จะเป็นช่วงที่ตัวประกอบการ กระแทกมีค่าสูงมากซึ่งเป็นเพราะว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานในช่วงนี้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ ธรรมชาติในการสั่นของรถบรรทุก โดยผลการวิเคราะห์ของทั้งสองช่วงนี้เป็นไปตามทฤษฎีทางด้าน พลศาสตร์ของโครงสร้าง แต่หลังจากความถี่ธรรมชาติตั้งแต่ 4 Hz เป็นต้นไป ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความถี่ธรรมชาติของสะพานไม่สามารถบ่งบอกได้ชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัว ประกอบการกระแทกกับความถี่ธรรมชาติของสะพานดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน

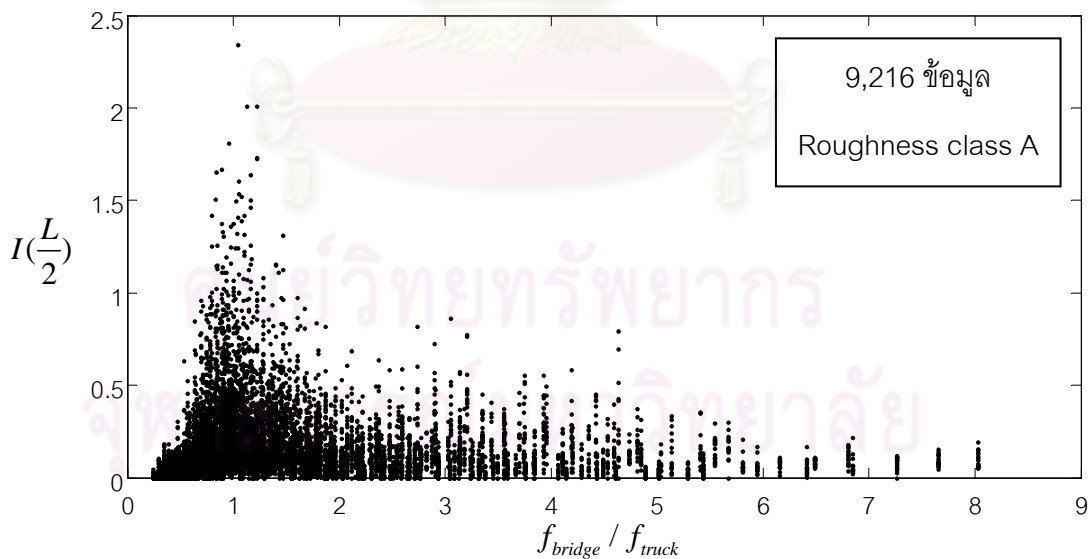
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำ (I) กับความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f)		
ทิศทาง \ ความสัมพันธ์	$I \propto f$	$I \propto \frac{1}{f}$
ประเภท A	0.0083	-0.2112
ประเภท B	0.0043	-0.2316
ประเภท C	-0.0132	-0.2180

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า ถ้าหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความถี่ธรรมชาติของสะพานในลักษณะแปรผันตามกันจะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ศูนย์ นั่นหมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตามกัน และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระทำกับความถี่ธรรมชาติของสะพานในลักษณะแปรผกผันกันจะได้ว่ามีความสัมพันธ์กันอยู่บ้าง ผลที่ได้นี้จะขัดกับสมมติฐานจากภาพที่ 4.22 – 4.24 อยู่บ้างซึ่งเป็นเพราะว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.8 เป็นการหาค่าตลอดช่วงความถี่ธรรมชาติทั้งหมดของสะพาน ดังนั้นเมื่อพิจารณาพร้อมกับสิ่งที่ได้จากภาพที่ 4.22 – 4.24 จะสามารถบอกได้ว่าในช่วงก่อนการเกิดปรากฏการณ์สั่นพ้องตัวประกอบการกระทำกับความถี่ธรรมชาติของสะพานจะแปรผันตามกัน แต่ช่วงหลังการเกิดปรากฏการณ์สั่นพ้องตัวประกอบการกระทำกับความถี่ธรรมชาติของสะพานจะแปรผกผันกัน จึงได้ทำการแบ่งช่วงของความถี่ธรรมชาติในการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 0 - 3.2 Hz และช่วง 3.2-12 Hz ซึ่งความถี่ 3.2 Hz เป็นค่าเฉลี่ยของความถี่ธรรมชาติรอบบรรทุก โดยช่วง 0 - 3.2 Hz จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผันตามกัน ($I \propto f$) และช่วง 3.2-12 Hz จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันกัน ($I \propto 1/f$) ได้ผลลัพธ์ออกมาดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กันโดยเฉพาะในช่วง 0 - 3.2 Hz จะมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับการหาตัวประกอบการกระทำจากมาตรฐานแคนาดา

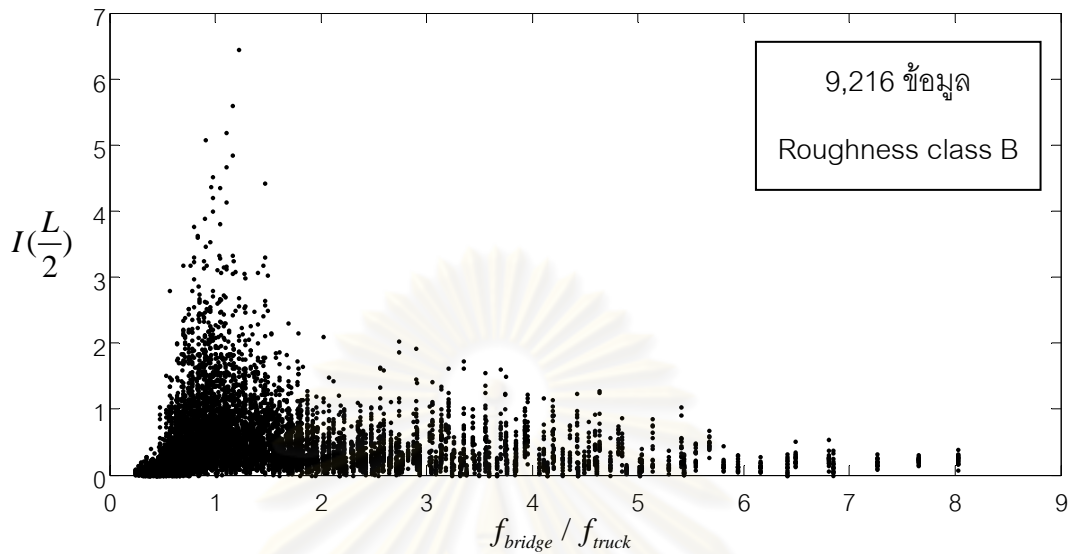
ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการระแทกกับความถี่ธรรมชาติของสะพานในช่วง 0 - 3.2 Hz และช่วง 3.2-12 Hz

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการระแทก (I) กับความถี่ธรรมชาติของสะพาน (f)		
ผิวทาง \diagdown ความสัมพันธ์	ช่วง 0 - 3.2 Hz ($I \propto f$)	ช่วง 3.2-12 Hz ($I \propto \frac{1}{f}$)
ประเภท A	0.4605	0.2363
ประเภท B	0.5074	0.2698
ประเภท C	0.4963	0.2037

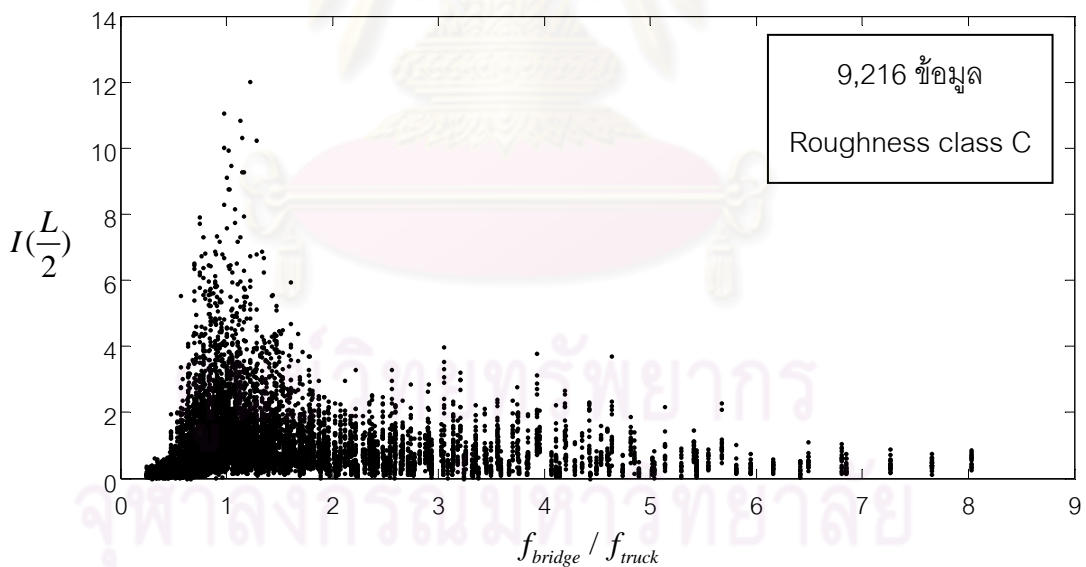
ผลที่ได้จากภาพที่ 4.22 – 4.24 และตารางที่ 4.9 พบว่ามีความเป็นไปได้ที่ค่าตัวประกอบการระแทกจะเกี่ยวข้องกับการสั่นพ้อง (Resonance) จึงได้ทำการพลอตความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการระแทกกับอัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานและความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุก (f_{bridge} / f_{truck}) ดังแสดงในภาพที่ 4.25 – 4.27



ภาพที่ 4.25 ตัวประกอบการระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.26 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.27 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C

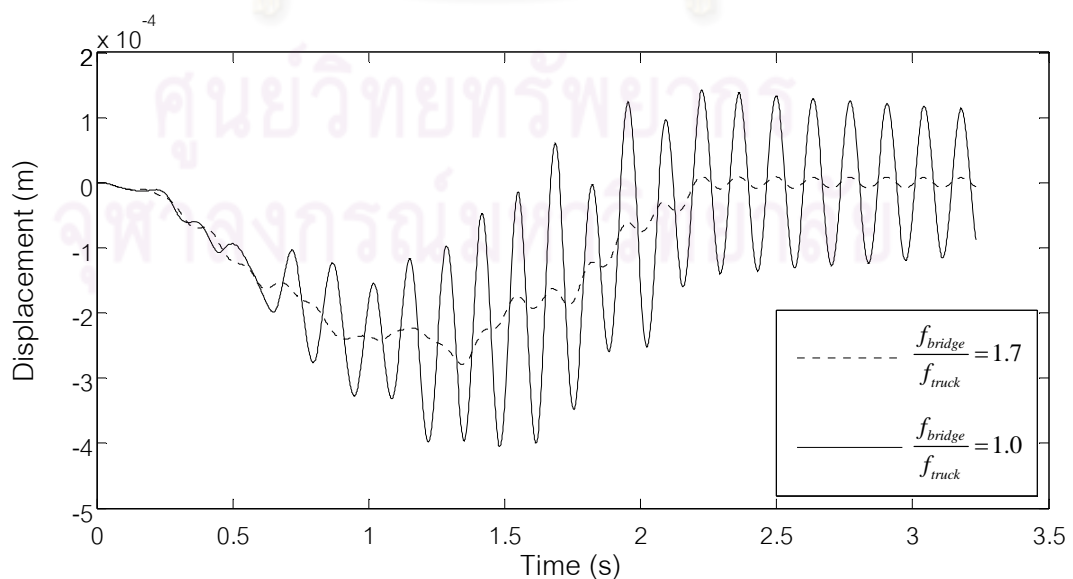
จากภาพที่ 4.25 – 4.27 จะเห็นได้ว่า ตัวประกอบการกระแทกที่มีค่าสูงจะเกิดขึ้นบริเวณที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นค่าตัวประกอบการกระแทกจะเกี่ยวข้องกับการสั่นพ้อง (Resonance)

พิจารณาผลตอบสนองของสะพานและรถบรรทุกที่เกิดขึ้นจาก 2 กรณีที่มีอัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกเท่ากับ 1.7 และ 1.0 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ทำการเปรียบเทียบการสั่นของสะพานและการสั่นของรถบรรทุกดังแสดงในภาพที่ 4.28 และภาพที่ 4.29

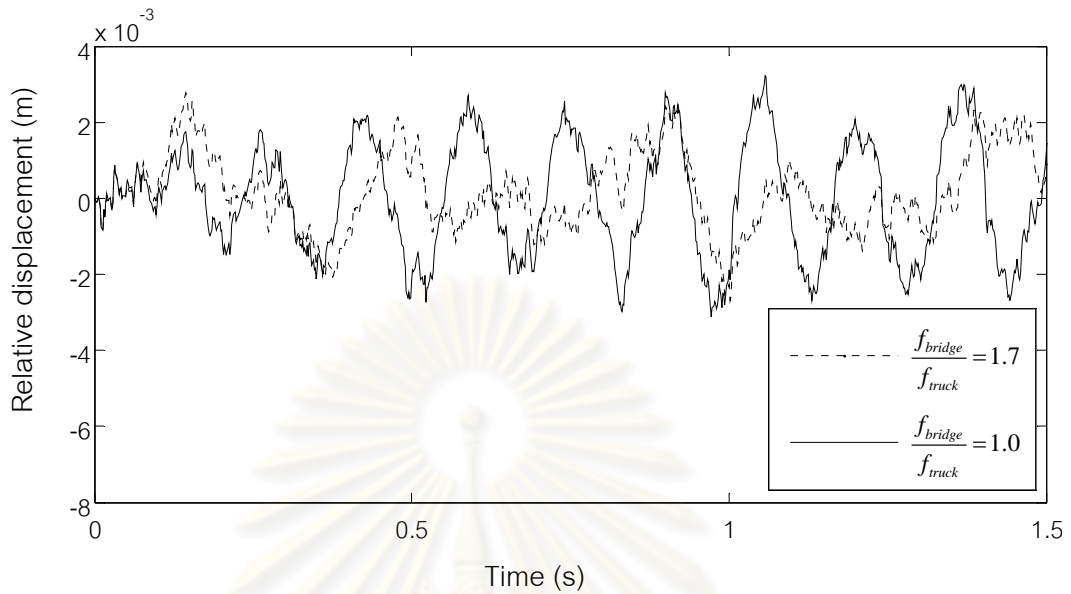
ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุกของ 2 กรณีที่นำมาเปรียบเทียบ

No.	ประเภท ผิวทาง	L (m)	W (ton)	V (m/s)	f_{bridge} (Hz)	f_{truck} (Hz)	$\frac{f_{bridge}}{f_{truck}}$
1	A	40	25	20	3.85	2.25	1.7
2	A	40	25	20	3.85	3.85	1.0

จากภาพที่ 4.28 จะเห็นได้ว่ากรณีที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกเท่ากับ 1.0 สะพานจะเกิดการสั่นอย่างมากเมื่อเทียบกับอีกกรณี และจากภาพที่ 4.29 พบว่ากรณีที่อัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของสะพานกับความถี่ธรรมชาติของรถบรรทุกเท่ากับ 1.0 รถบรรทุกจะเกิดการสั่นอย่างมากเมื่อเทียบกับอีกกรณี อีกทั้งยังพบว่าในกรณีที่เกิดการสั่นพ้องนี้ ทั้งสะพานและรถบรรทุกจะสั่นด้วยแอมพลิจูดที่มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้กรณีที่สะพานและรถบรรทุกเกิดการสั่นพ้อง จะได้ตัวประกอบภาระแทรกที่มีค่าสูงมาก



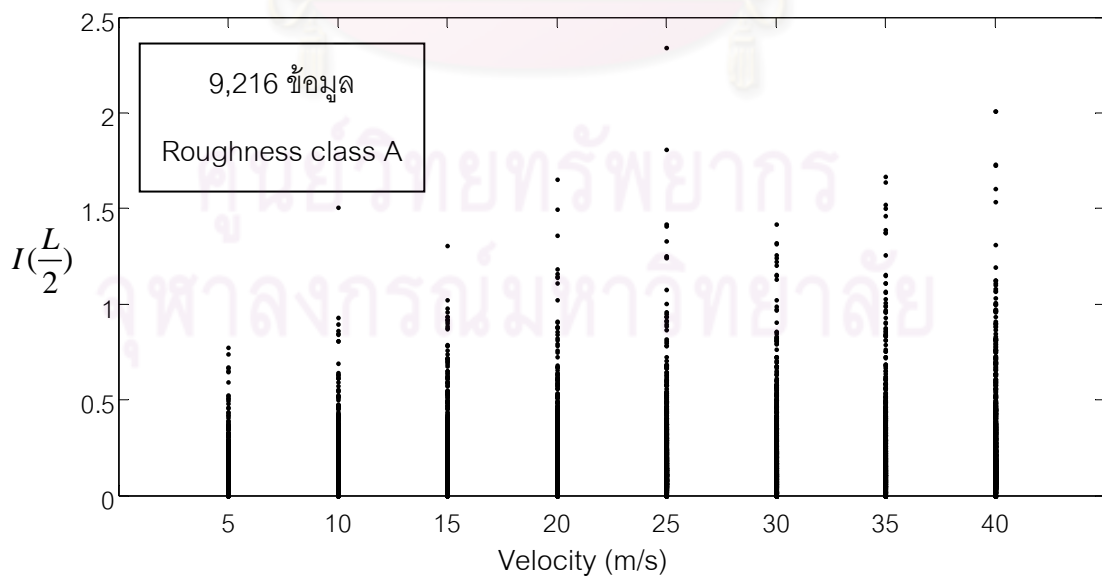
ภาพที่ 4.28 การกระจัดในแนวดิ่ง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน



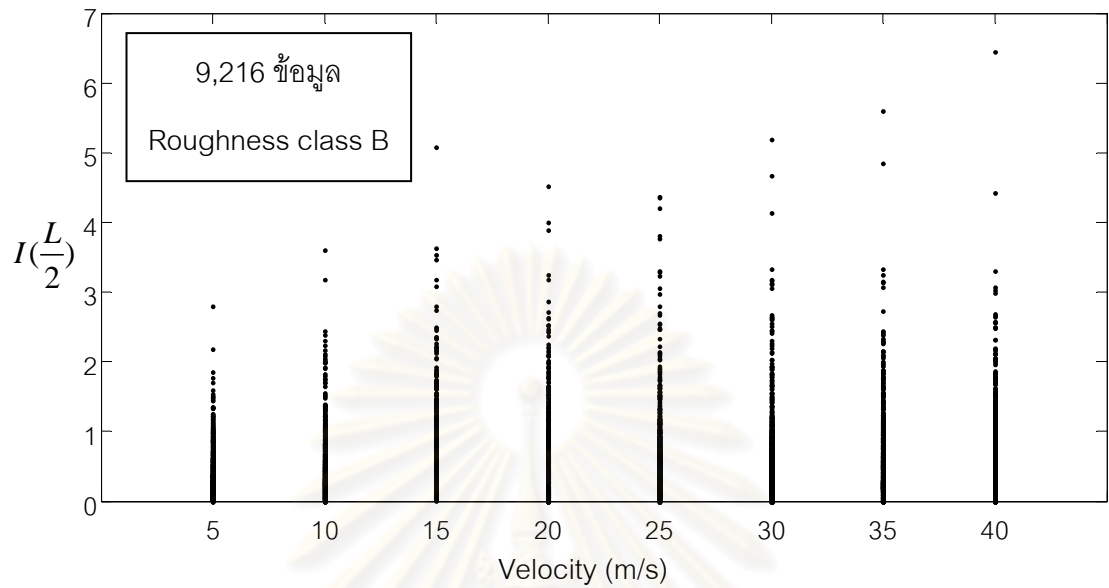
ภาพที่ 4.29 การสั่นของเพลาน้ำรถบรรทุก

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็รถบรรทุก

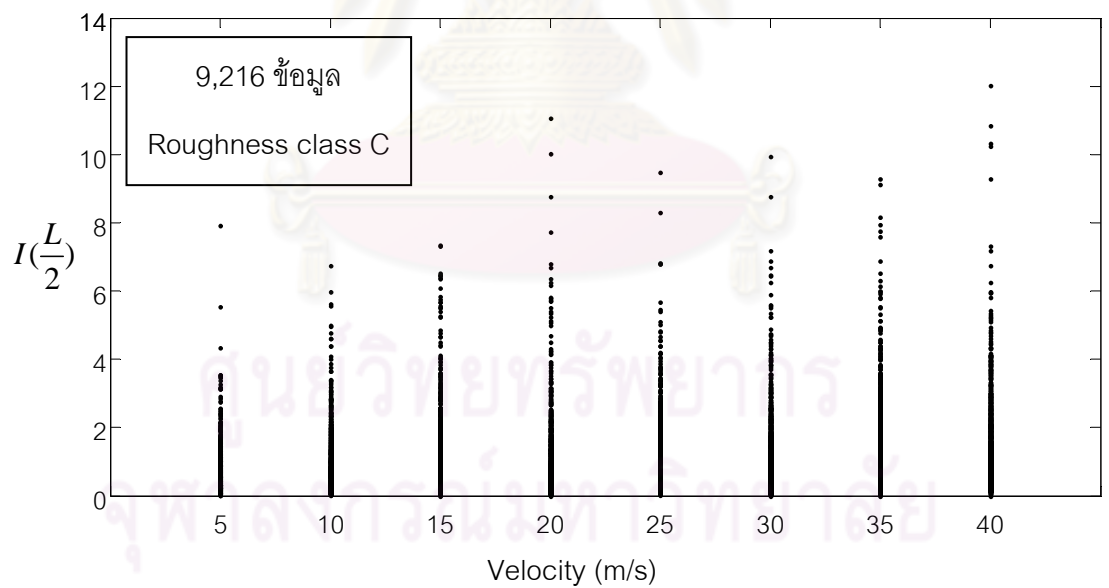
จากการวิเคราะห์ที่ได้ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน นำไปพลอตค่าตัวประกอบการกระแทกที่ความเร็วต่างๆของรถบรรทุก โดยแบ่งแยกเป็นผิวทางประเภท A, B และ C ดังแสดงในภาพที่ 4.30 – 4.32



ภาพที่ 4.30 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความเร็วต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.31 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความเร็วต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.32 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่ความเร็วต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C

จากภาพที่ 4.30 - 4.32 ซึ่งแต่ละภาพจะมีข้อมูลทั้งหมด 9216 กรณีของการที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของตัวประกอบการกระแทกในภาพทั้งสามมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งคล้ายกับการพลอตค่าตัวประกอบการกระแทกที่ความยาว

ช่วงต่างๆของสะพานเนื่องจากว่าภาพทั้งสามไม่สามารถบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุกดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุก

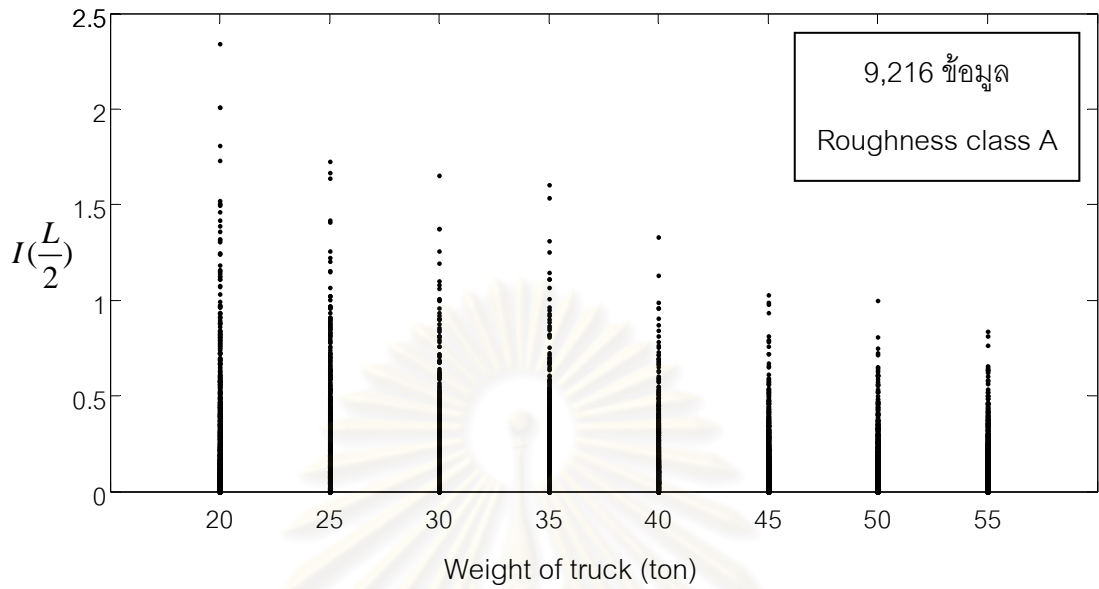
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทก (I) กับความเร็วรถบรรทุก (V)		
ทิศทาง \ ความสัมพันธ์	$I \propto V$	$I \propto \frac{1}{V}$
ประเภท A	0.2253	-0.2071
ประเภท B	0.1327	-0.1398
ประเภท C	0.1891	-0.1757

จากตารางที่ 4.11 ผลของการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุกทั้งสองความสัมพันธ์สามารถบอกได้ว่า ตัวประกอบการกระแทกมีความสัมพันธ์กับความเร็วรถบรรทุกอยู่บ้างในลักษณะที่แปรผันตามกัน กล่าวคือค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านมีความเร็วสูงขึ้น โดยทิศทางประเภท A จะมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด และทิศทางประเภท B จะมีความสัมพันธ์กันน้อยสุด

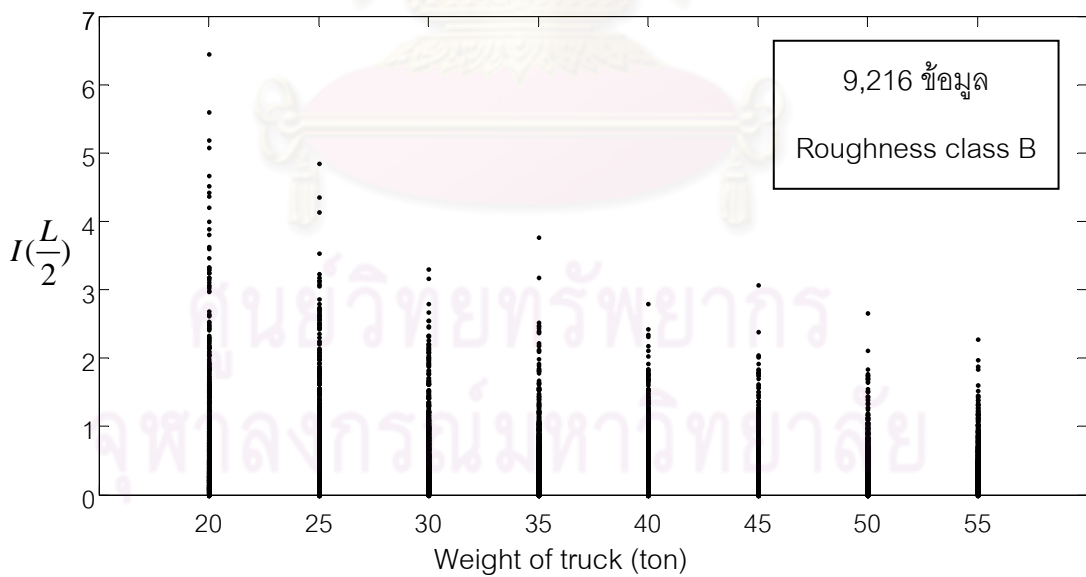
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรถบรรทุก

ทำการพลอตค่าตัวประกอบการกระแทกที่น้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ โดยแบ่งแยกเป็นทิศทางประเภท A, B และ C ดังแสดงในภาพที่ 4.33 – 4.35

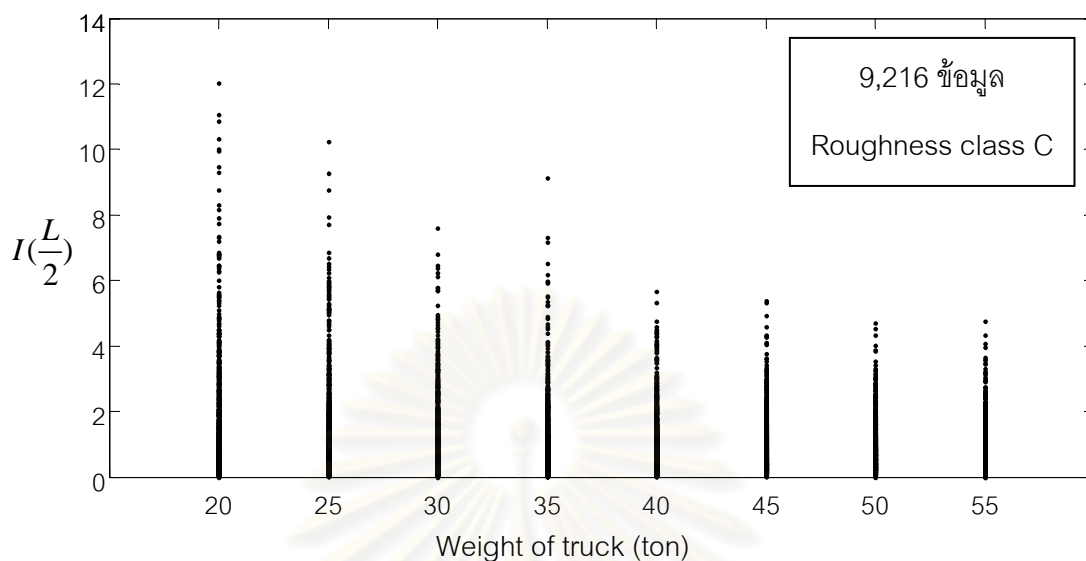
จากภาพที่ 4.33 – 4.35 ซึ่งแต่ละภาพจะมีข้อมูลทั้งหมด 9216 กรณีของการที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานซึ่งไม่สามารถบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์จึงต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักรถบรรทุกดังแสดงในตารางที่ 4.12



ภาพที่ 4.33 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.34 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B



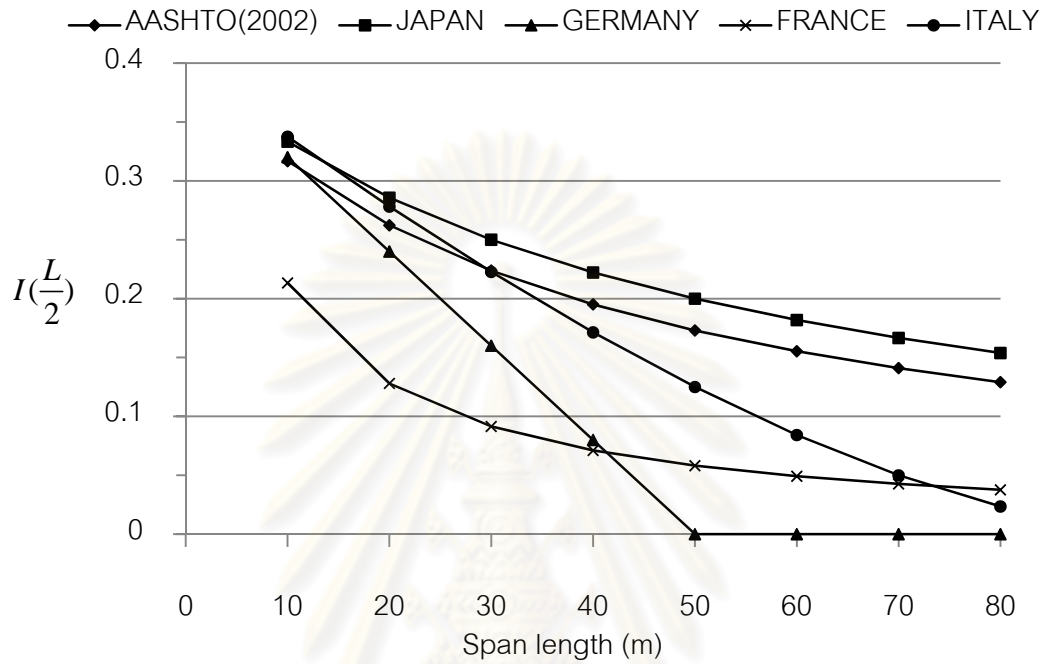
ภาพที่ 4.35 ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักบรรทุก

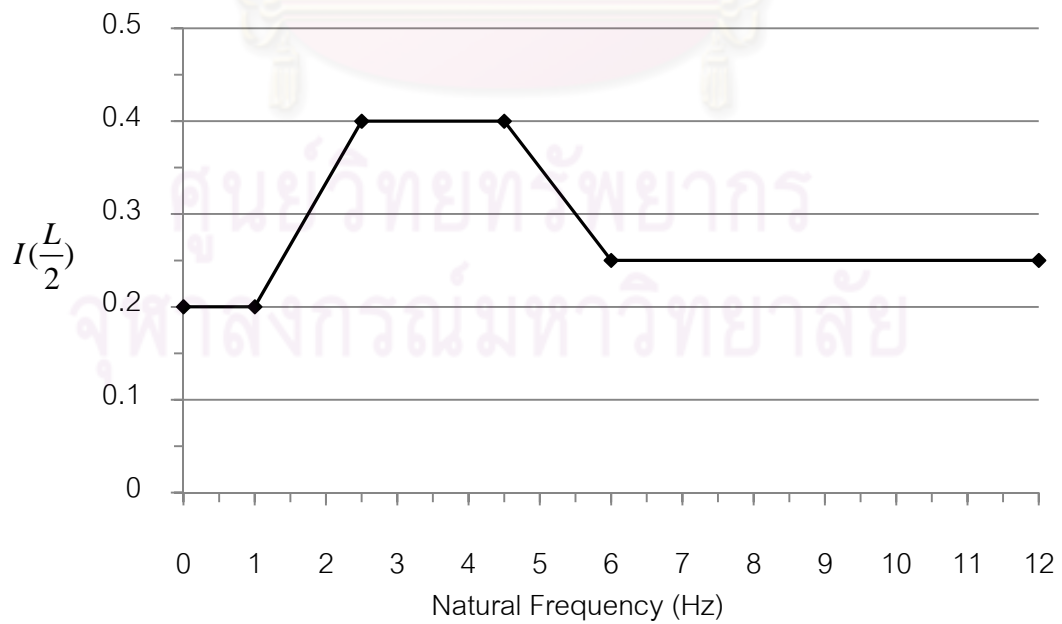
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทก (I) กับน้ำหนักบรรทุก (W)		
ผิวทาง \ ความสัมพันธ์	$I \propto W$	$I \propto \frac{1}{W}$
ประเภท A	-0.1792	0.1826
ประเภท B	-0.1973	0.2048
ประเภท C	-0.2059	0.2102

จากตารางที่ 4.12 ผลของการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับน้ำหนักบรรทุกทั้งสองความสัมพันธ์สามารถบอกได้ว่า ตัวประกอบการกระแทกมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกอยู่บ้างในลักษณะที่แปรผกผันกัน กล่าวคือค่าตัวประกอบการกระแทกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น โดยผิวทางประเภท C จะมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด และผิวทางประเภท A จะมีความสัมพันธ์กันน้อยที่สุด

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานต่างๆ



ภาพที่ 4.36 ตัวประกอบการกระแทกที่ถูกกำหนดในมาตรฐานต่างๆ



ภาพที่ 4.37 ตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานของประเทศแคนาดา

ภาพที่ 4.36 แสดงตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานต่างๆ ซึ่งได้ให้สมการหาตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพาน และภาพที่ 4.37 แสดงตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานของประเทศแคนาดาซึ่งอยู่ในรูปของความถี่ธรรมชาติสะพาน

ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานต่างๆ

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานต่างๆ			
มาตรฐาน \ ผิวทาง	ประเภท A	ประเภท B	ประเภท C
AASHTO (2002)	0.0239	0.0153	-0.0009
JAPAN	0.0308	0.0230	0.0069
GERMANY	-0.0249	-0.0379	-0.0532
FRANCE	-0.0132	-0.0264	-0.0419
ITALY	0.0498	0.0448	0.0286
CANADA	0.3811	0.4204	0.4253

จากตารางที่ 4.13 เป็นผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากมาตรฐานต่างๆ พบว่ามาตรฐานส่วนใหญ่ที่ให้ตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพานจะไม่มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบที่ผ่านมาที่ได้ว่าตัวประกอบการกระแทกไม่มีความสัมพันธ์กับความยาวช่วงของสะพาน แต่เมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานของประเทศแคนาดาพบที่มีความแปรผันตามกัน ซึ่งก็สอดคล้องกับการทดสอบที่ผ่านมาเช่นกัน นั่นหมายความว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาตัวประกอบการกระแทกในงานวิจัยนี้ จะมีความสัมพันธ์กันกับตัวประกอบการกระแทกตามมาตรฐานของประเทศแคนาดา

ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งมี 2 งานวิจัยที่ได้เสนอสูตรในการหาตัว

ประกอบการกระแทก โดยงานวิจัยของ CHANG (1994) ได้เสนอสูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกดังสมการที่ 4.3

$$I = \frac{-202}{10^4} + \frac{898}{10^7}L + \frac{441}{10^5}V \quad (4.3)$$

โดยที่ I คือ ตัวประกอบการกระแทก

L คือ ความยาวช่วงของสะพาน (m)

V คือ ความเร็วของรถบรรทุก (km/hr)

และ YANG (1995) ได้เสนอสูตรในการหาตัวประกอบการกระแทกดังสมการที่

4.4

$$I = \frac{1.2\pi V}{fL} \quad (4.4)$$

โดยที่ I คือ ตัวประกอบการกระแทก

f คือ ความยาวช่วงของสะพาน (Hz)

V คือ ความเร็วของรถบรรทุก (m/s)

ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกจากงานวิจัยต่างๆ

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกจากงานวิจัยต่างๆ				
มาตรฐาน \ ผิวทาง	ประเภท A	ประเภท B	ประเภท C	
CHANG (1994)	0.2244	0.1318	0.1884	
YANG (1995)	-0.0178	-0.0409	-0.0373	

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า ตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์กับสูตรประมาณค่าตัวประกอบการกระแทกจากงานวิจัย

ของ CHANG (1994) อยู่อย่างมีนัยสำคัญ แต่ก็ยังเป็นระดับความสัมพันธ์ที่ต่ำกว่ามาตรฐานของประเทศแคนาดา และถึงแม้ว่าสมการที่ใช้หาตัวประกอบการกระแทกของ CHANG (1995) จะเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพานและความเร็วรถบรรทุก แต่ความยาวช่วงสะพานในสมการที่ 4.3 นั้นจะมีผลต่อค่าตัวประกอบการกระแทกน้อยมากเมื่อเทียบกับผลจากความเร็วรถบรรทุก

สำหรับสูตรประมาณค่าตัวประกอบการกระแทกจากงานวิจัยของ YANG (1995) จะไม่มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบการกระแทกจากการวิเคราะห์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะสมการที่ 4.4 ซึ่งใช้หาตัวประกอบการกระแทกของ YANG (1995) เป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพาน เช่นเดียวกับมาตรฐานส่วนใหญ่ ถึงแม้ว่าจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ธรรมชาติสะพานและความเร็วรถบรรทุกด้วยก็ตาม

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับตัวแปรต่างๆ เช่น ความยาวช่วงของสะพาน ความถี่ธรรมชาติของสะพาน ความเร็วรถบรรทุกและน้ำหนักรถบรรทุกพบว่า ตัวประกอบการกระแทกมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของสะพาน ความเร็วและน้ำหนักของรถบรรทุก แต่จะไม่มีความสัมพันธ์กับความยาวช่วงของสะพาน โดยตัวประกอบการกระแทกจะแปรผกผันกับน้ำหนักของรถบรรทุก แต่จะแปรผันตามความเร็วรถบรรทุก นอกจากนี้ยังแปรผันตามความถี่ธรรมชาติของสะพานในช่วง 0 - 3.2 Hz และแปรผกผันกันในช่วง 3.2-12 Hz ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งผลที่ได้เหล่านี้จะสอดคล้องกับผลจากการหาความสัมพันธ์ของมาตรฐานการออกแบบสะพานต่างๆ รวมทั้งงานวิจัยที่ผ่านมา

4.4 ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาและมาตรฐานต่างๆ ที่ได้ศึกษาเรื่องตัวประกอบการกระแทก จะมีความสนใจเฉพาะตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเท่านั้น ด้วยมีความคิดที่ว่าตัวประกอบการกระแทกที่มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานทำให้การออกแบบตลอดทั้งความยาวสะพานด้วยค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมีความถูกต้องปลอดภัยเพียงพอแล้ว แต่ในความเป็นจริงอาจไม่เป็นเช่นนั้นเสมอไปเนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกไปบนสะพานมีปัจจัยหลายๆอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งมีผลต่อลักษณะการสั่นของรถบรรทุกและลักษณะการสั่นของสะพานที่ตำแหน่งต่างๆตามความยาวสะพาน ส่งผลไปยังผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ของสะพานที่ตำแหน่งต่างๆที่อาจทำให้ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่นๆจะมีค่ามากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ ดังนั้นงานวิจัย

นี้จะศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่ 7 ตำแหน่งตามความยาวสะพานคือ $L/8$, $L/4$, $3L/8$, $L/2$, $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$ ซึ่งเป็นตัวประกอบการกระแทกทั้งจากโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของสะพาน

โดยทั่วไปเมื่อมีแรงสถิตกระทำกับสะพานที่มีลักษณะเป็นคานช่วงเดียว โมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน แต่เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานจะเป็นลักษณะของแรงพลวัตที่กระทำต่อสะพาน ทำให้โมเมนต์ดัดสูงสุดอาจจะไม่ได้เกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ดังนั้นจึงทำการหาว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งอื่นๆจะมากกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานหรือไม่ตามสมการที่ 4.5

$$\hat{M}(x) = \frac{M(x)}{M\left(\frac{L}{2}\right)} \quad (4.5)$$

โดยที่

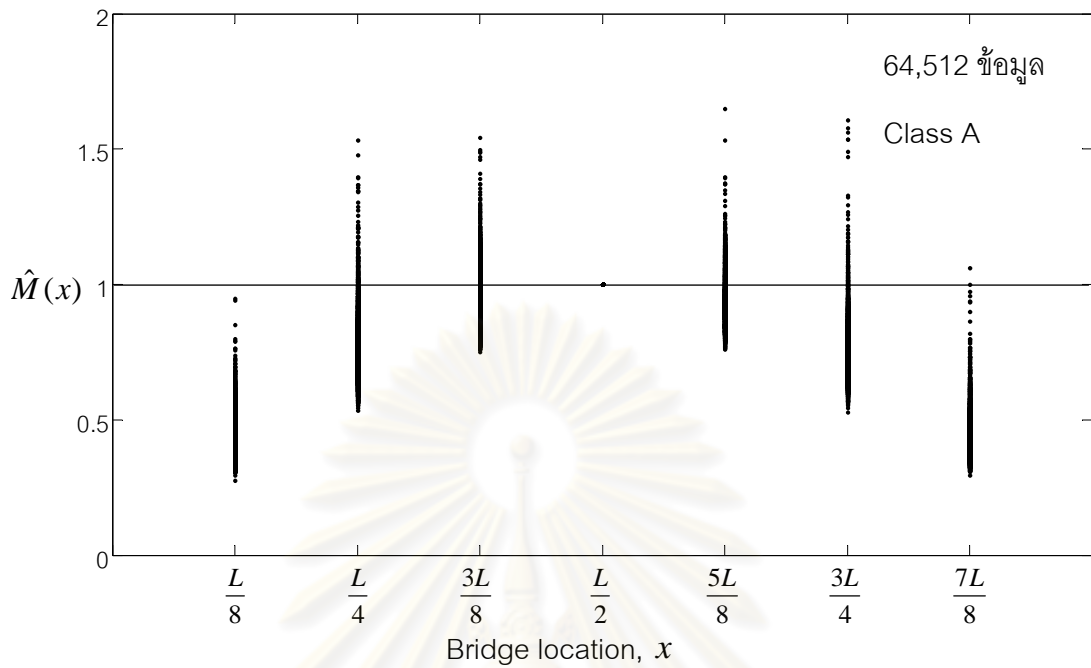
$\hat{M}(x)$ คือ อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

$M(x)$ คือ โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x

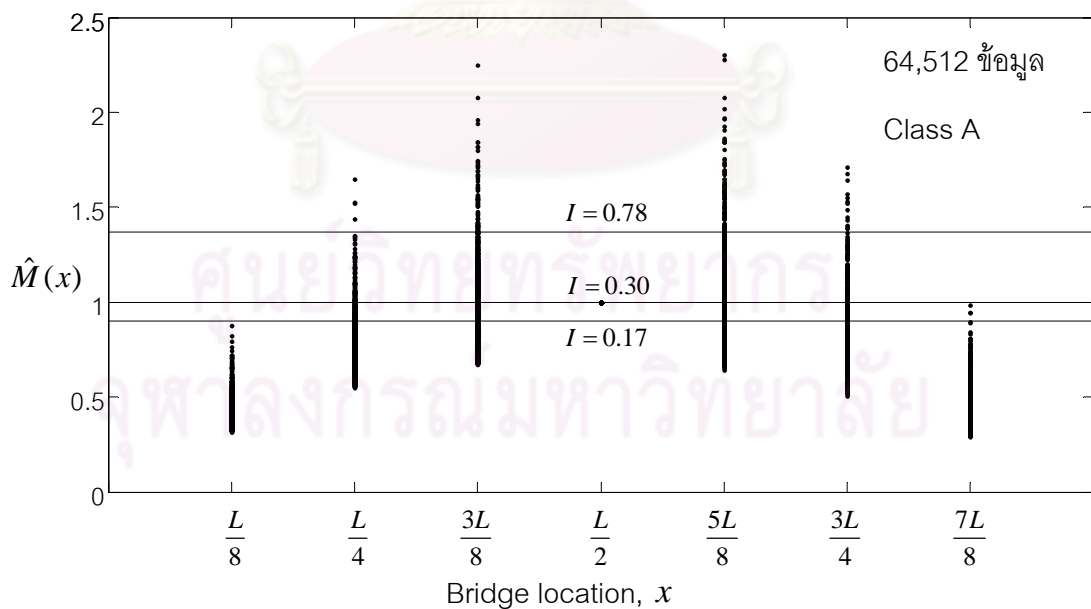
$M\left(\frac{L}{2}\right)$ คือ โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

จากสมการที่ 4.5 ทำให้สามารถหาอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานของ 9216 กรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานสำหรับผิวทางประเภท A ดังแสดงในภาพที่ 4.38 จะเห็นว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งอื่นๆอาจจะสูงกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้โดยเฉพาะตำแหน่งที่ใกล้กับกึ่งกลางสะพานซึ่งอาจจะสูงกว่าถึง 50%

นอกจากนี้ยังได้ทำการหาโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจากตัวประกอบการกระแทกที่มาตรฐานกำหนดโดยการนำตัวประกอบการกระแทกมาคูณเพิ่มจากโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิต ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ในที่นี้จะใช้ตัวประกอบการกระแทกจากมาตรฐานที่มีค่าเท่ากับ 0.3 แล้วนำไปหาอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานของ 9216 กรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานสำหรับผิวทางประเภท A ตามสมการที่ 4.5 ได้อัตราส่วนที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในภาพที่ 4.39 นำผลที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับผลจากภาพที่ 4.38



ภาพที่ 4.38 อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.39 อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง x กับโมเมนต์ดัดสูงสุดจากค่าตัวประกอบการกระทงสำหรับผิวทางประเภท A

จากภาพที่ 4.39 จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าจะออกแบบโมเมนต์ดัดสูงสุดที่กึ่งกลางสะพานด้วยตัวประกอบการกระทำตามมาตรฐาน โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งอื่นจะสูงกว่าได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้ตัวประกอบการกระทำเท่ากับ 0.17 และ 0.78 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระทำที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2 ได้ผลเช่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 4.39

นอกจากนี้ยังได้ทำการหาค่าตัวประกอบการกระทำ ณ ตำแหน่งต่างๆจากค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ณ ตำแหน่งต่างๆขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน กับค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิต ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังสมการที่ 4.6 เปรียบเทียบกับตัวประกอบการกระทำ 3 ค่าเช่นเดียวกับภาพที่ 4.39 ได้ผลแสดงในภาพที่ 4.40

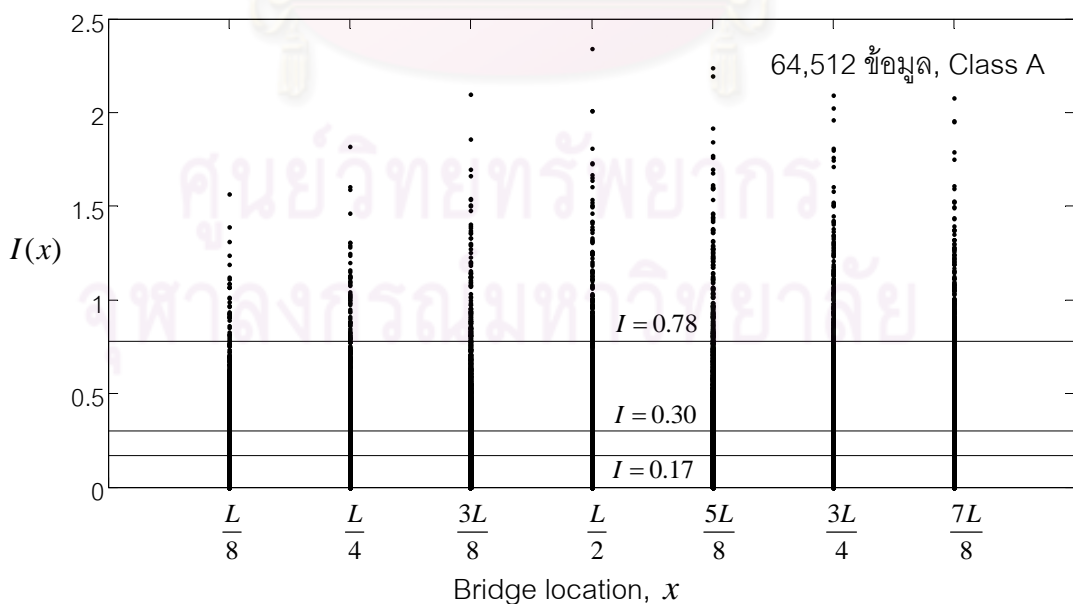
$$I(x) = \frac{M_d(x) - M_s(x)}{M_s(x)} \quad (4.6)$$

โดยที่

$I(x)$ คือ ค่าตัวประกอบการกระทำ ณ ตำแหน่ง x

$M_d(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ณ ตำแหน่ง x ขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน

$M_s(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิตสูงสุด ณ ตำแหน่ง x



ภาพที่ 4.40 ตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งต่างๆสำหรับผิวทางประเภท A

จากภาพที่ 4.40 จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งต่างๆจะมีโอกาสสูงกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่เรามักใช้ออกแบบได้ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการพิจารณาผลตอบสนองจากพลศาสตร์ของสะพานในรูปของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆแยกออกจากกัน

ต่อไปจะศึกษาว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆจะมีค่ามากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้หรือไม่ โดยจะศึกษาตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดของสะพาน ทำการหาผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งใดๆกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับทุกกรณีของการที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานตามสมการที่ 4.7

$$\Delta I(x) = I(x) - I\left(\frac{L}{2}\right) \quad (4.7)$$

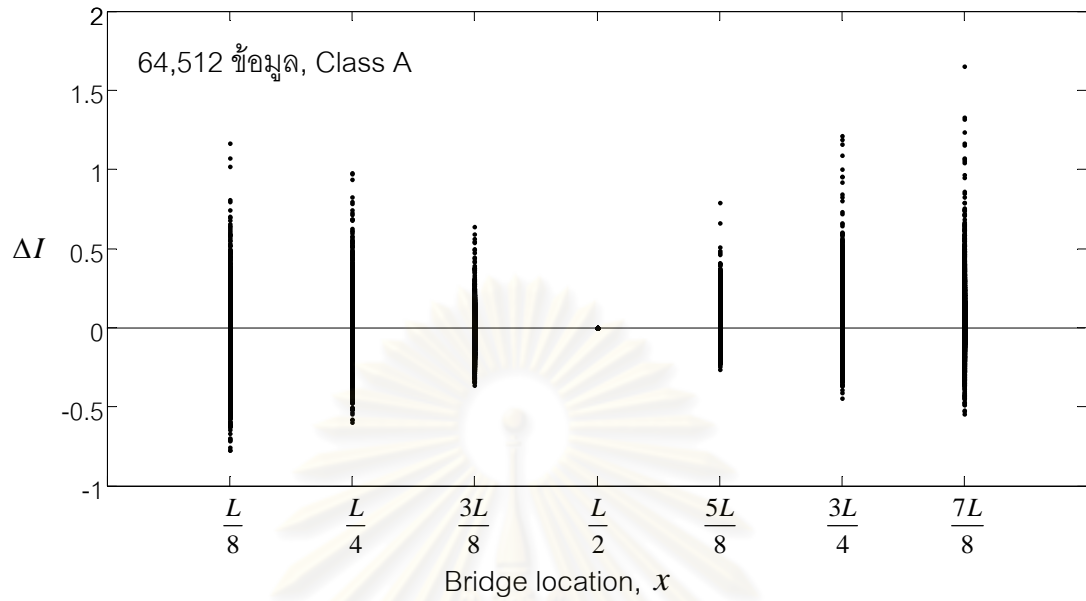
โดยที่

$\Delta I(x)$ คือ ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

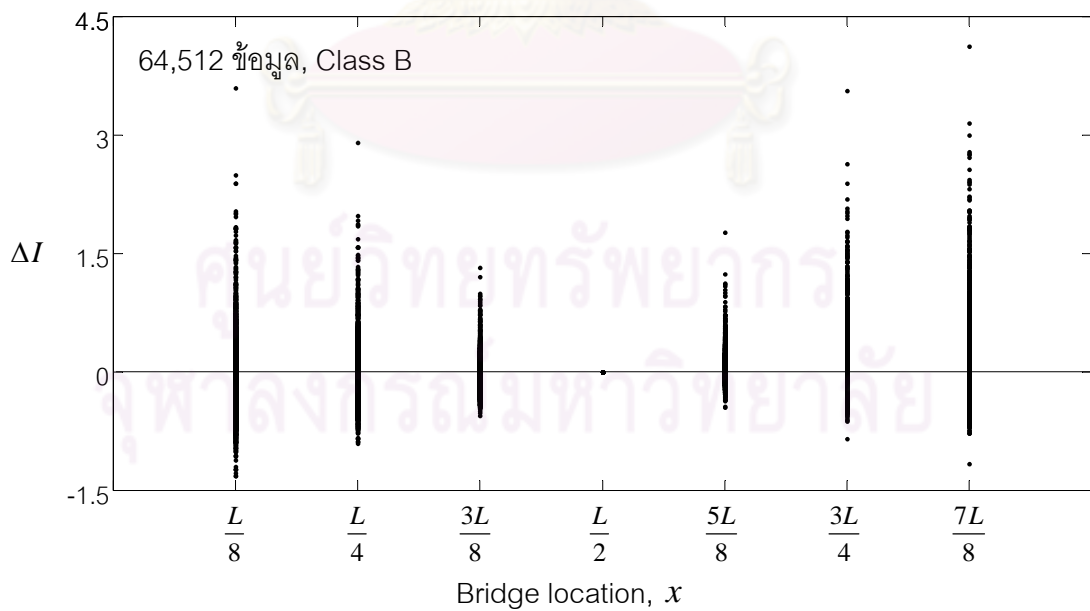
$I(x)$ คือ ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x

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

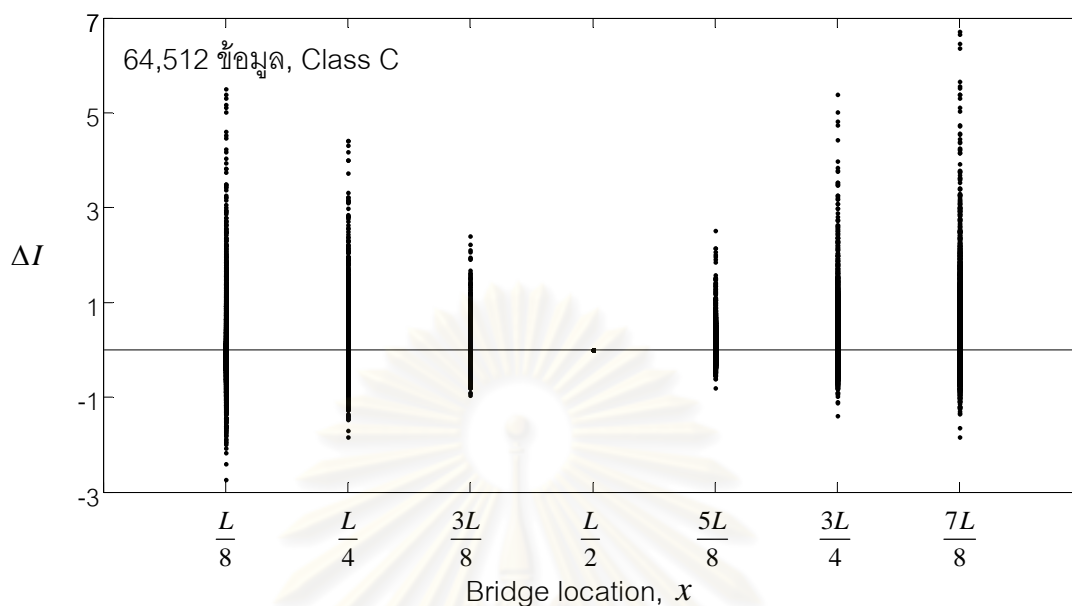
ภาพที่ 4.41-4.43 แสดงค่าผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A, B และ C ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดของสะพาน โดยแต่ละภาพหรือแต่ละผิวทางจะประกอบด้วยกราฟเคลื่อนที่ไปบนสะพานของรถบรรทุกทั้งหมด 9216 กรณี จากภาพทั้งสามจะเห็นได้ว่า ตัวประกอบการกระแทกที่ทุกๆตำแหน่งบนสะพานจะมีค่ามากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้เสมอ ซึ่งโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์เช่นนี้อาจเท่ากับโอกาสที่ตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานเป็นค่าสูงสุดหรือมีโอกาสมากกว่าด้วยซ้ำไป โดยความแตกต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งใดๆกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานนี้จะมากขึ้นอยู่กับลักษณะของการที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพาน ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาตัวประกอบการกระแทกที่ทุกๆตำแหน่งบนสะพานเพื่อที่จะทำให้การออกแบบสะพานมีความถูกต้อง



ภาพที่ 4.41 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.42 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.43 ผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท C

จากภาพที่ 4.41 แสดงผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท A จะเห็นได้ว่า ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งยิ่งห่างจากตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ผลต่างนี้จะยิ่งมากขึ้น ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานมีผลจากสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกก่อนเข้าสู่สะพานและที่ตำแหน่งหลังจากกึ่งกลางสะพานผลจากสภาพเริ่มต้นมีน้อยลง เนื่องจากการสลายพลังงานของรถบรรทุก แต่ขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบนสะพานจะทำให้สะพานสั่นมากขึ้น ดังนั้นสะพานจะสั่นอย่างมากเมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งหลังจากกึ่งกลางสะพาน โดยผลต่างที่มากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง $7L/8$

จากภาพที่ 4.42 แสดงผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท B การกระจายของผลต่างนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับผิวทางประเภท A แต่ผลต่างจะสูงกว่า

จากภาพที่ 4.43 แสดงผลต่างระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x กับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสำหรับผิวทางประเภท C การกระจายของผลต่างจะมีลักษณะเช่นเดียวกับผิวทางประเภท A และ B แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือผลต่างของผิวทางประเภท C จะสูงกว่า

ต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานดังสมการที่ 4.8 โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ ความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วรถบรรทุก และน้ำหนักรถบรรทุก ในการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละค่าของตัวแปรดังกล่าว ทำให้สามารถนำไปสร้างเป็นพื้นผิวที่ประกอบด้วยแกน 3 แกนคือ ตำแหน่ง ตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ และตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆเทียบกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

$$\hat{I}(x) = \frac{\bar{I}(x)}{\bar{I}(\frac{L}{2})} \quad (4.8)$$

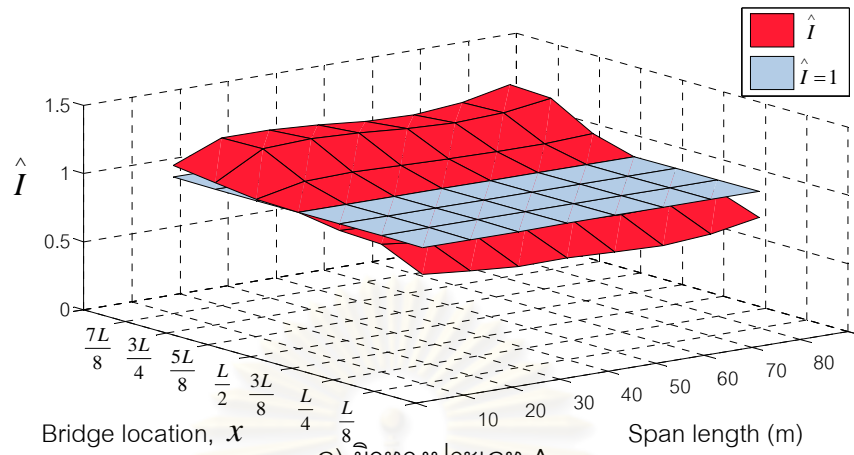
โดยที่

$\hat{I}(x)$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพาน

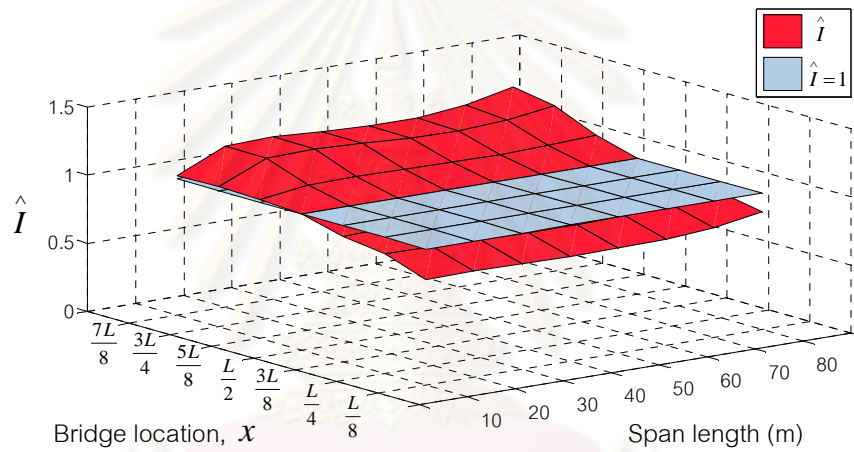
$\bar{I}(x)$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x

$\bar{I}(\frac{L}{2})$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

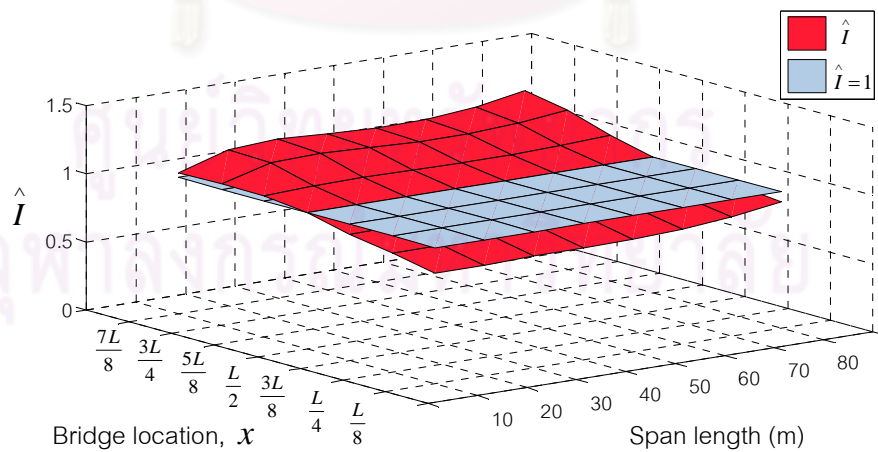
ภาพที่ 4.44 จะเป็นค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความยาวช่วงสะพานต่างๆ ภาพที่ 4.45 จะเป็นค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความเร็วรถบรรทุกต่างๆ และภาพที่ 4.46 จะเป็นค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ ซึ่งในแต่ละภาพจะประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C



ก) ผิวทางประเภท A

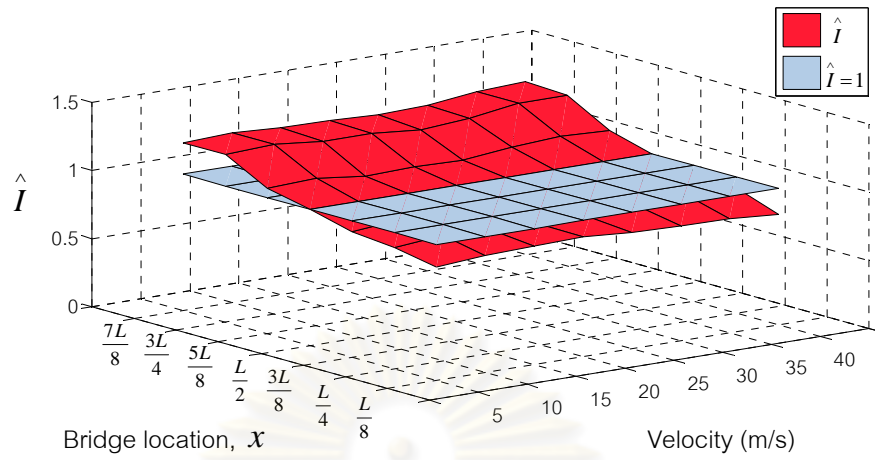


ข) ผิวทางประเภท B

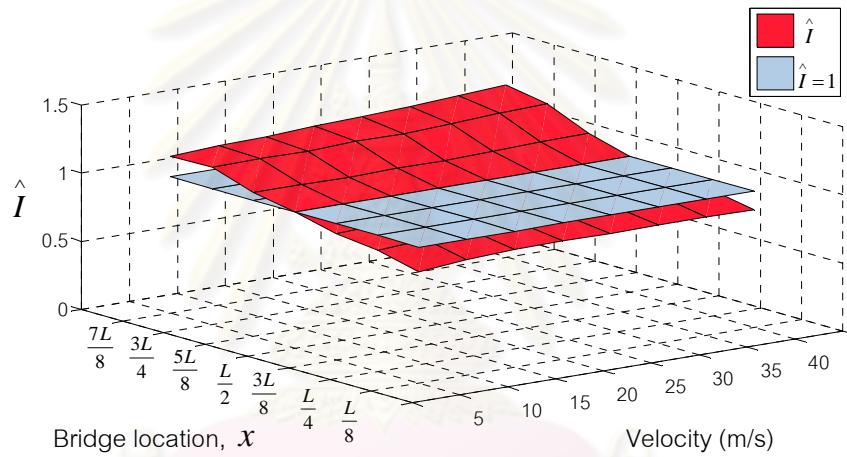


ค) ผิวทางประเภท C

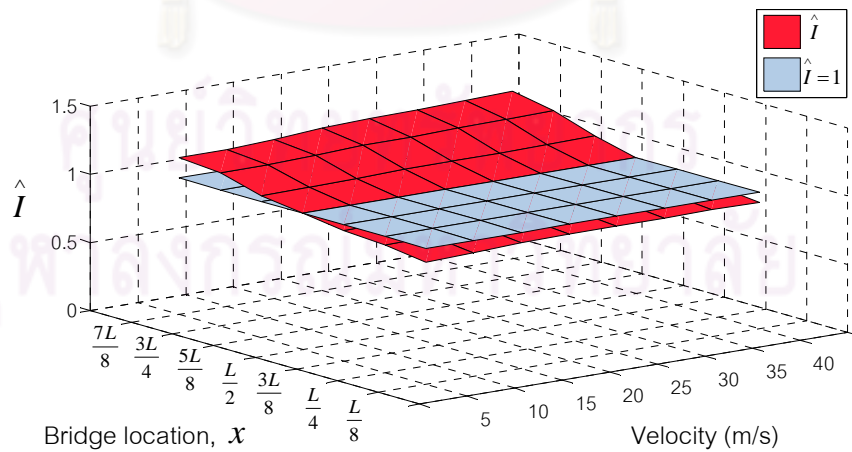
ภาพที่ 4.44 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ ความยาวช่วงต่างๆ ก) ผิวทางประเภท A ข) ผิวทางประเภท B ค) ผิวทางประเภท C



ก) ผิวทางประเภท A

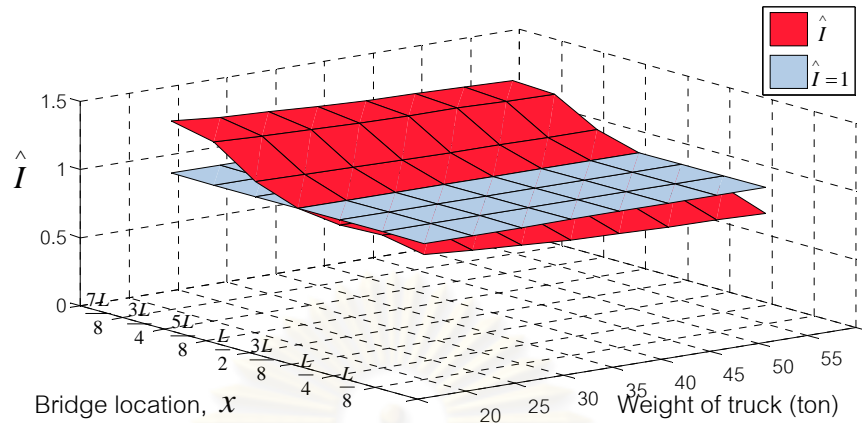


ข) ผิวทางประเภท B

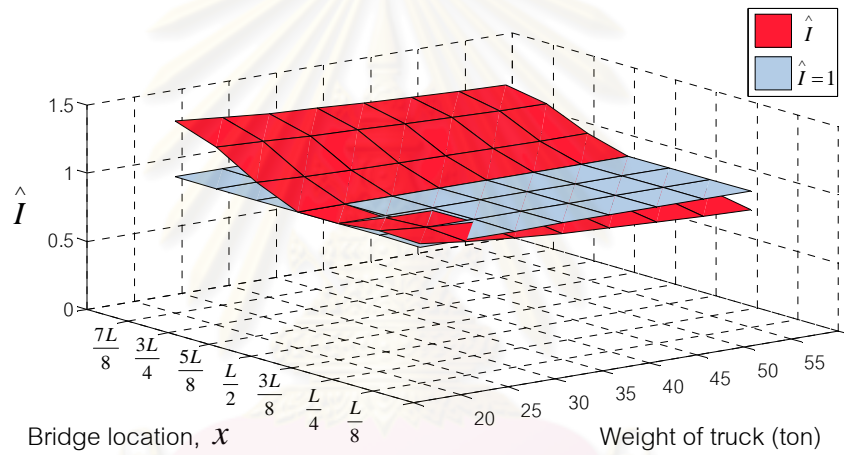


ค) ผิวทางประเภท C

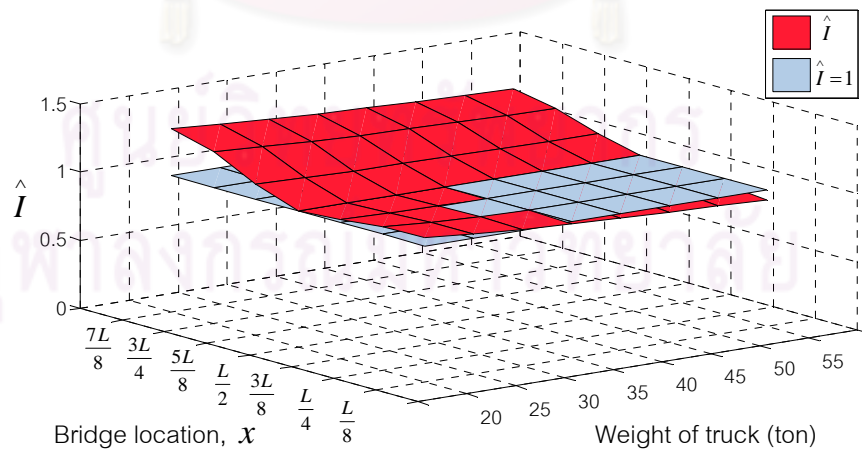
ภาพที่ 4.45 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ ความเร็วรถบรรทุกต่างๆ ก) ผิวทางประเภท A ข) ผิวทางประเภท B ค) ผิวทางประเภท C



ก) ผิวทางประเภท A



ข) ผิวทางประเภท B



ค) ผิวทางประเภท C

ภาพที่ 4.46 ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพานสำหรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ก) ผิวทางประเภท A ข) ผิวทางประเภท B ค) ผิวทางประเภท C

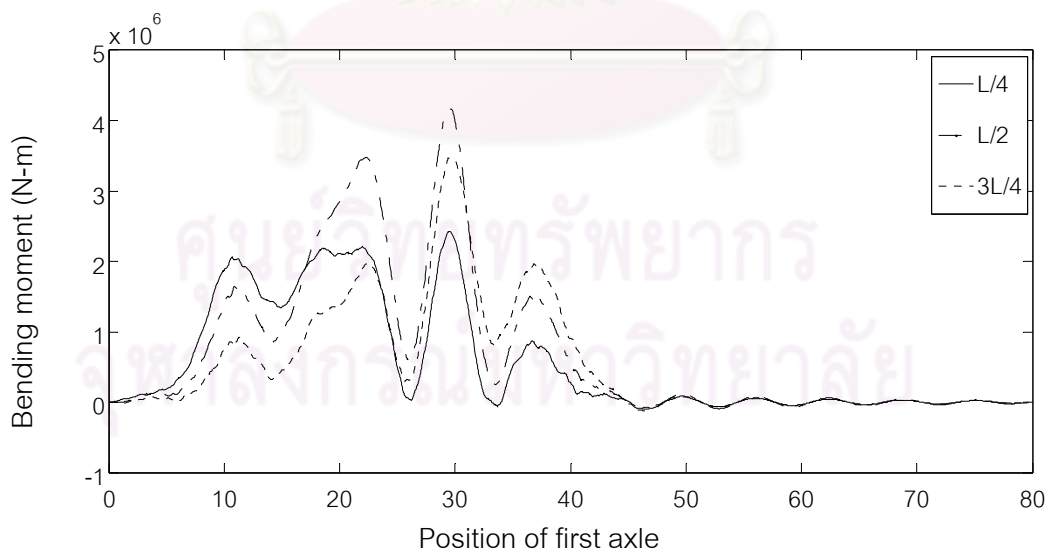
จากภาพที่ 4.44 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานตามความยาวช่วงต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานจะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเสมอ แต่ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานโดยจะมีค่าสูงกว่าไม่เกิน 20 % ในแต่ละความยาวช่วงสะพานสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ตัวแปรความยาวช่วงสะพานไม่ได้ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบนี้ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพานมากนัก

จากภาพที่ 4.45 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานตามความเร็วรถบรรทุกต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานจะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเสมอ แต่ค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมีค่าสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานโดยจะมีค่าสูงกว่าไม่เกิน 20 % ในแต่ละความเร็วรถบรรทุกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ตัวแปรความเร็วรถบรรทุกไม่ได้ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบนี้ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพานมากนัก

จากภาพที่ 4.46 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานตามน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานจะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ยกเว้นที่น้ำหนักรถบรรทุก 20-25 ตันสำหรับผิวทางประเภท B และ C ซึ่งเป็นน้ำหนักทางสถิติที่ต่ำ และตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมีค่าสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานโดยจะมีค่าสูงกว่าไม่เกิน 30 % ในแต่ละน้ำหนักรถบรรทุกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ตัวแปรน้ำหนักรถบรรทุกส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของการเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆ กล่าวคือน้ำหนักรถบรรทุกที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานมีค่าสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมากขึ้น เนื่องจากผลตอบสนองทางสถิติของสะพานที่ต่ำ

เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของผลที่ได้ในภาพที่ 4.44 - 4.46 ซึ่งตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานจะน้อยกว่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมากกว่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จึงทำการศึกษากรณีของตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $L/4$ น้อยกว่าตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานและตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $3L/4$ มากกว่าตัวประกอบการกระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยตัวประกอบการกระทำ ณ ตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ จะเท่ากับ 0.13, 0.48 และ 0.73 ตามลำดับ กรณีนี้เป็นกรณีที่รถบรรทุกน้ำหนัก 30 ตัน มีสปีดเฟสเป็นค่ากลางเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 35 เมตรต่อวินาทีไปบนสะพานที่มีความยาวช่วง 40 เมตร ความถี่ธรรมชาติเป็นค่าที่ขอบบนและอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.05

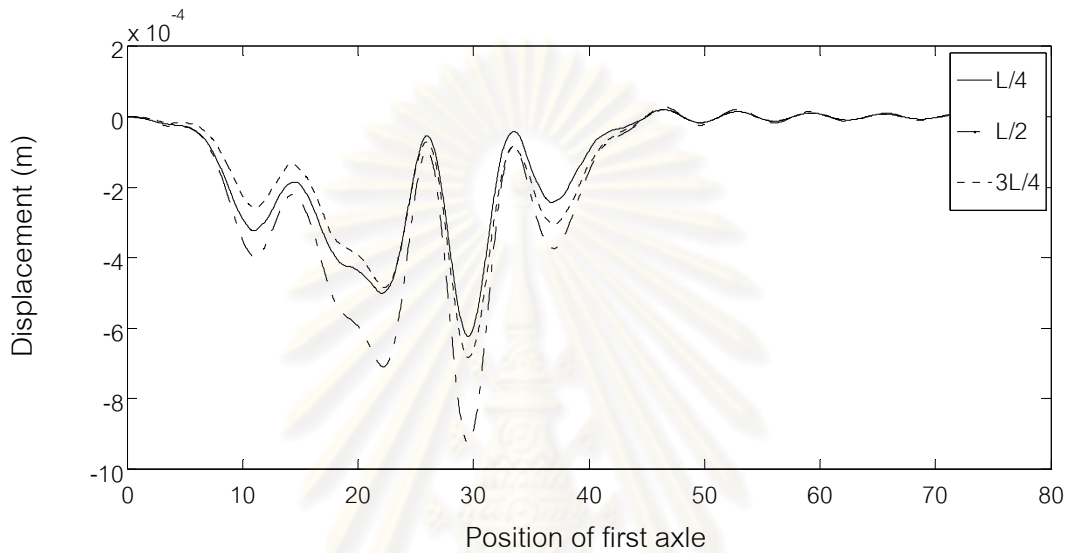
โมเมนต์ดัดของสะพานที่เวลาต่างๆทั้ง 3 ตำแหน่งบนสะพานขณะที่รถบรรทุกกำลังเคลื่อนที่แสดงในภาพที่ 4.47 จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของทั้ง 3 ตำแหน่งบนสะพานจะเกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะมีค่ามากที่สุด แต่ตัวประกอบการกระทำที่ตำแหน่ง $3L/4$ จะมีค่ามากที่สุดเนื่องจากที่ตำแหน่งนี้โมเมนต์ดัดทางสถิตมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 4.50 และ 4.51



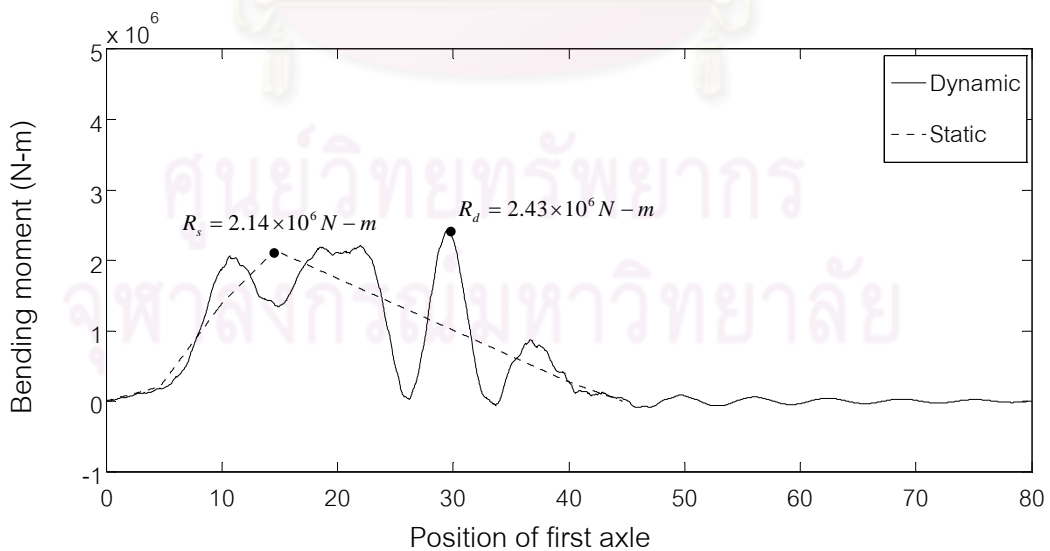
ภาพที่ 4.47 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน

การกระจัดของสะพานที่เวลาต่างๆแสดงในภาพที่ 4.48 จะเห็นว่าผลที่ได้มีลักษณะเหมือนกับภาพที่ 4.47 กล่าวคือการกระจัดสูงสุดของทั้ง 3 ตำแหน่งบนสะพานจะเกิดขึ้นที่

เวลาเดียวกัน และเกิดขึ้นที่เวลาเดียวกับที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด ซึ่งเป็นเวลาที่ตำแหน่งล้อหน้าอยู่ที่ $3L/4$ และล้อหลังอยู่ที่บริเวณถัดจากกึ่งกลางสะพาน โดยการกระจัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จะมีค่ามากที่สุด การกระจัดที่ตำแหน่ง $3L/4$ สะพานจะมีค่ารองลงมา และการกระจัดที่ตำแหน่ง $L/4$ จะมีค่าน้อยสุด

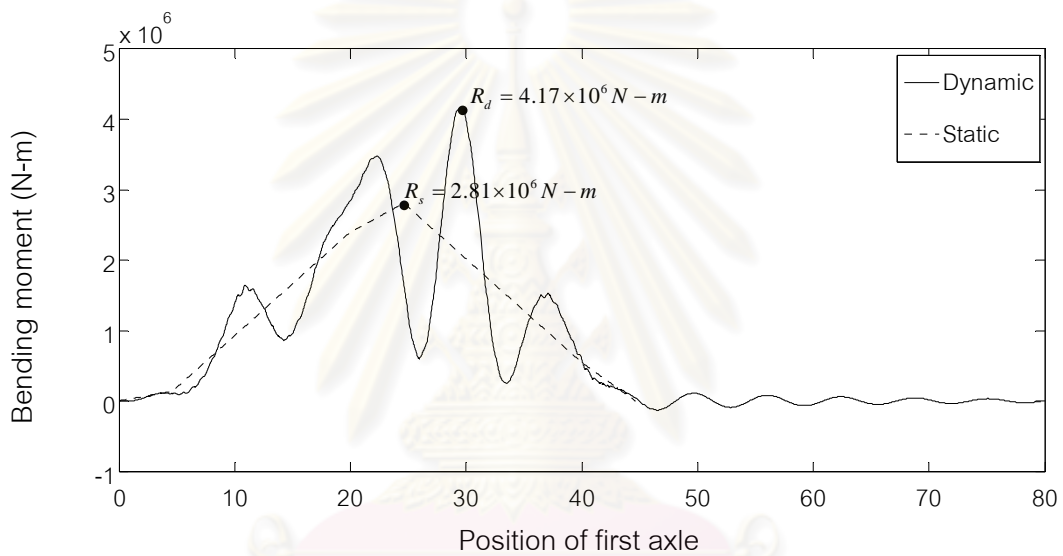


ภาพที่ 4.48 การกระจัดในแนวตั้งที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน

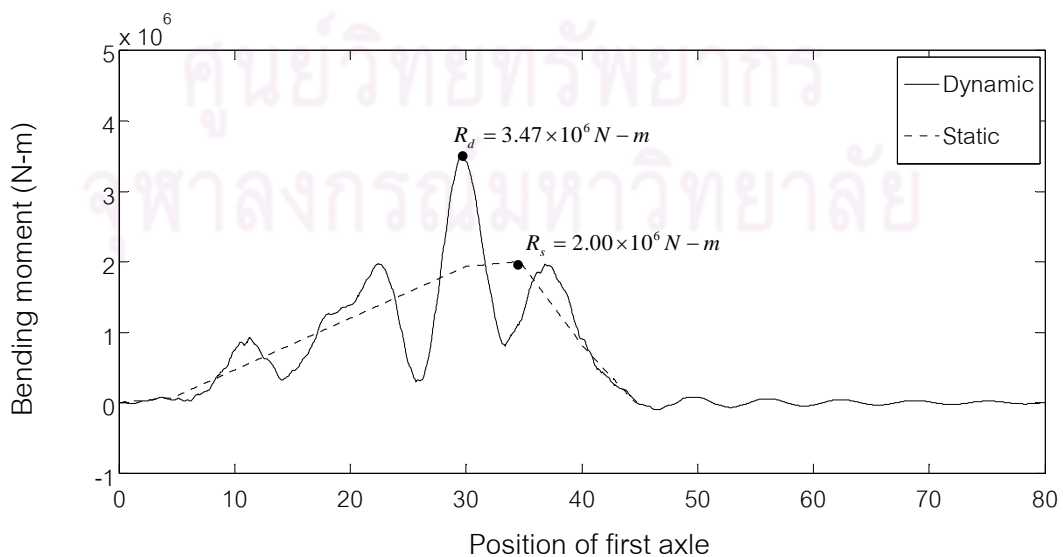


ภาพที่ 4.49 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/4$ ของสะพาน

เป็นที่น่าสังเกตว่า โมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $L/4$ จะมีลักษณะแตกต่างจากโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $3L/4$ ทั้งด้านพลศาสตร์และด้านสถิตดังแสดงในภาพที่ 4.49 และภาพที่ 4.51 ซึ่งในความเป็นจริงควรจะได้โมเมนต์ดัดที่มีลักษณะคล้ายกันเนื่องตำแหน่งที่สมมาตรกันบนสะพานที่เช่นนี้เนื่องจากน้ำหนักทางสถิตที่เพลหน้าและเพลหลังไม่เท่ากัน โดยน้ำหนักทางสถิตที่เพลหลังจะมีค่ามากกว่า จากภาพที่ 4.47 - 4.48 พอจะบ่งบอกได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปรถบรรทุกที่เคลื่อนอยู่บนสะพานจะทำให้สะพานสั่นมากขึ้น ซึ่งสะพานจะสั่นมากเมื่อรถบรรทุกอยู่ในตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพาน



ภาพที่ 4.50 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/2$ ของสะพาน



ภาพที่ 4.51 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $3L/4$ ของสะพาน

หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานดังสมการที่ 4.9 โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ ความยาวช่วงของสะพาน ความเร็วรถบรรทุก และน้ำหนักรถบรรทุก ในการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่แต่ละค่าของตัวแปรดังกล่าว ทำให้สามารถนำไปสร้างเป็นพื้นผิวที่ประกอบด้วยแกน 3 แกนคือ ตำแหน่ง ตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ และตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆเทียบกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

$$\hat{I}_{98}(x) = \frac{I^{98}(x)}{I^{98}\left(\frac{L}{2}\right)} \quad (4.9)$$

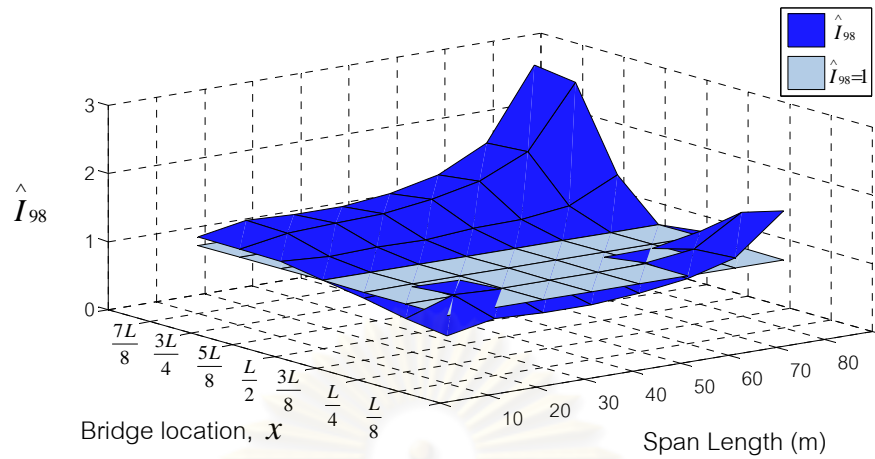
โดยที่

$\hat{I}_{98}(x)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพาน

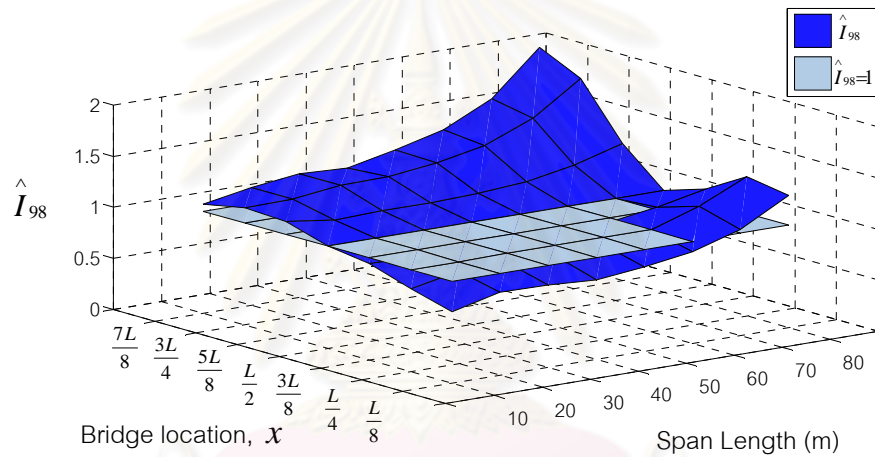
$I^{98}(x)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x

$I^{98}\left(\frac{L}{2}\right)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

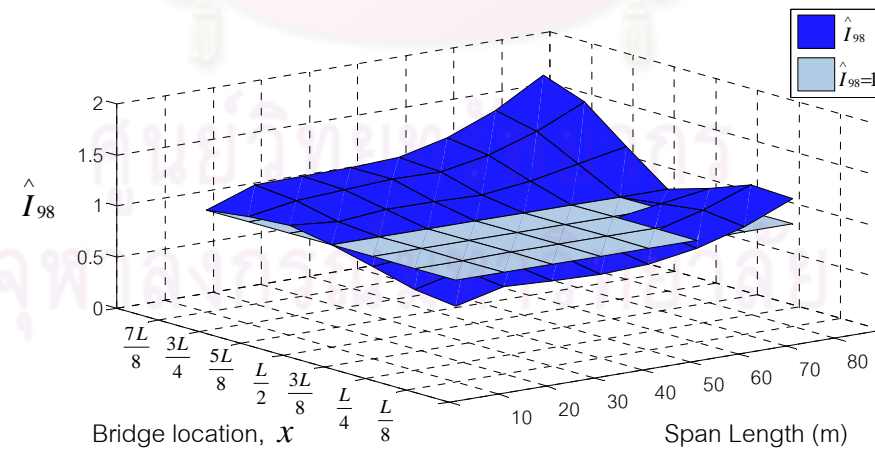
ภาพที่ 4.52 จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความยาวช่วงสะพานต่าง ภาพที่ 4.53 จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความเร็วรถบรรทุกต่างๆ และภาพที่ 4.54 จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่กึ่งกลางสะพานสำหรับน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ ซึ่งในแต่ละภาพจะประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C



ก) ผิวทางประเภท A

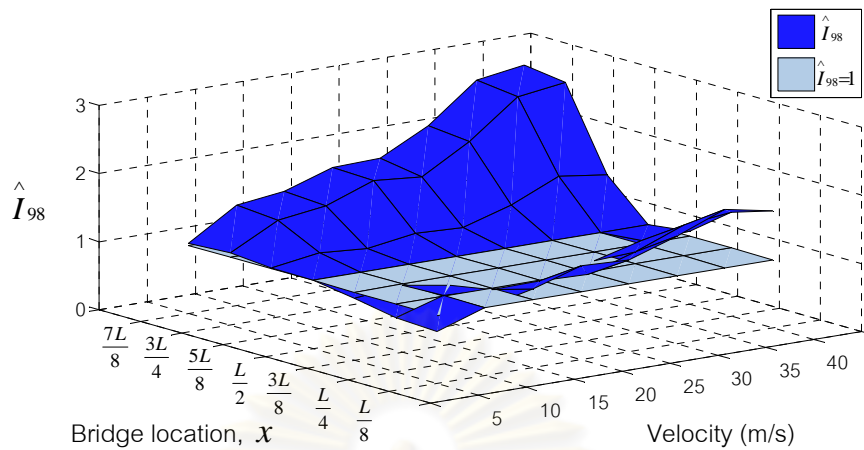


ข) ผิวทางประเภท B

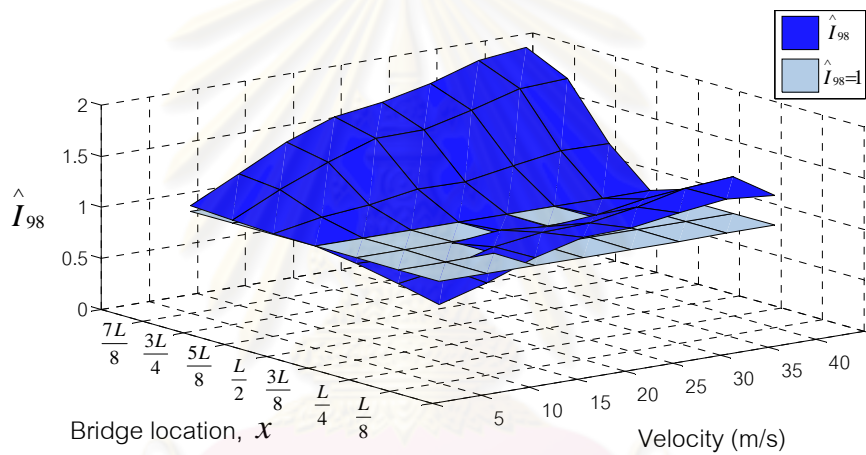


ค) ผิวทางประเภท C

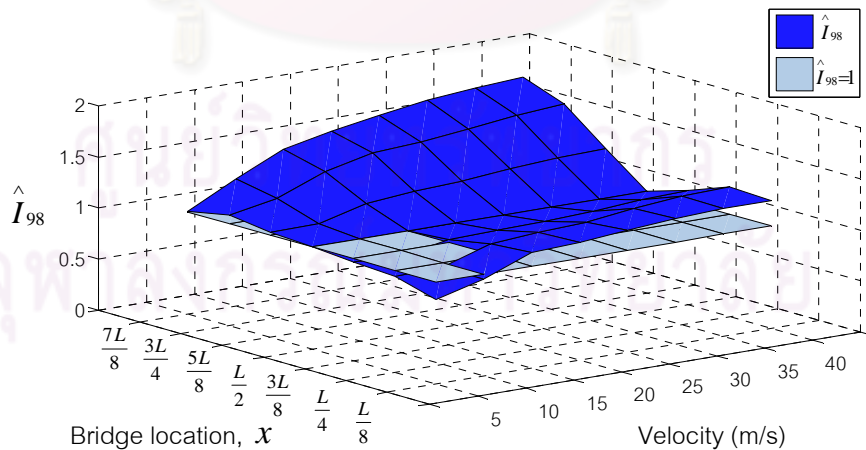
ภาพที่ 4.52 ค่าที่ 98th ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพานสำหรับความยาวช่วงต่างๆ ก) ผิวทางประเภท A ข) ผิวทางประเภท B ค) ผิวทางประเภท C



ก) ผิวทางประเภท A

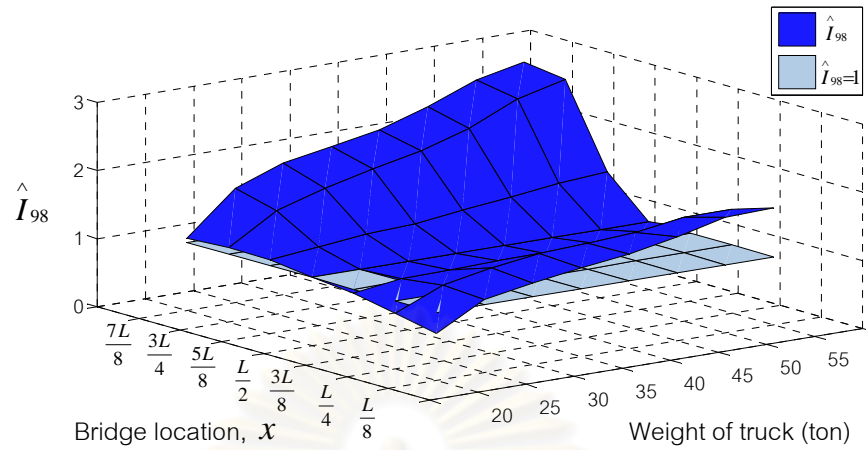


ข) ผิวทางประเภท B

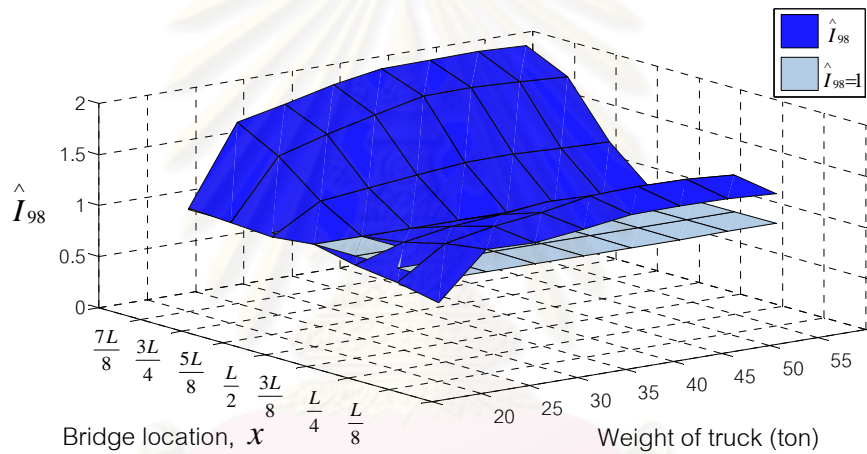


ค) ผิวทางประเภท C

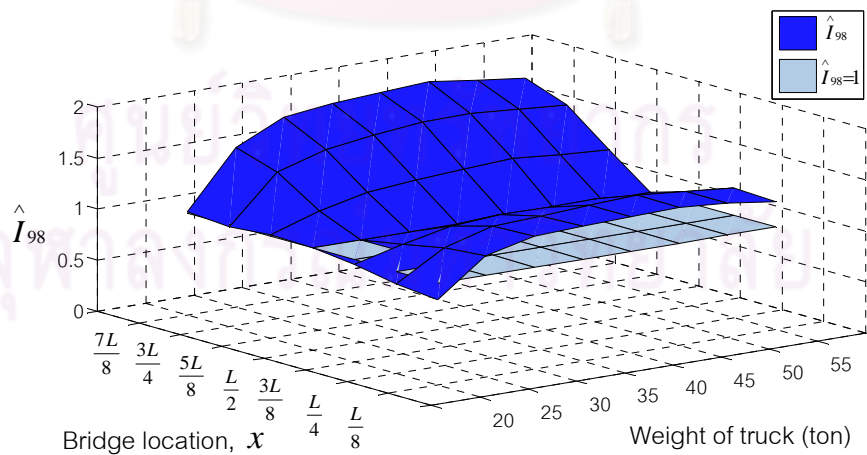
ภาพที่ 4.53 ค่าที่ 98th ตัวประกอบการระลอกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพานสำหรับ
ความเร็วรถบรรทุกต่างๆ ก) ผิวทางประเภท A ข) ผิวทางประเภท B ค) ผิวทางประเภท C



ก) ผิวทางประเภท A



ข) ผิวทางประเภท B



ค) ผิวทางประเภท C

ภาพที่ 4.54 ค่าที่ 98th ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง x เทียบกับที่กึ่งกลางสะพานสำหรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ก) ผิวทางประเภท A ข) ผิวทางประเภท B ค) ผิวทางประเภท C

จากภาพที่ 4.52 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานตามความยาวช่วงต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานจะมีค่าต่ำกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานยกเว้นที่ความยาวช่วง 70-80 เมตร และค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานโดยจะสูงกว่าไม่มากนักที่ความยาวช่วงน้อยๆ แต่เมื่อความยาวช่วงมากขึ้นจะทำให้ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งหลังจากกึ่งกลางสะพานมีค่าสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมากขึ้นตามไปด้วยสำหรับผิวทางประเภทต่างๆ โดยเฉพาะผิวทางประเภท A ที่อาจจะสูงถึง 2-3 เท่า เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานจะทำให้สะพานสั่นมากขึ้น ซึ่งเมื่อความยาวช่วงมากขึ้นทำให้ช่วงเวลาที่รถบรรทุกอยู่บนสะพานนานขึ้นด้วย จึงทำให้เมื่อรถบรรทุกมาอยู่ที่บริเวณปลายสะพานจะเกิดการสั่นของสะพานอย่างมาก รวมถึงผลของการใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ซึ่งเป็นกรณีวิกฤติที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนของรถบรรทุกไปบนสะพานที่ให้ค่าตัวประกอบการกระแทกสูงมาก ดังนั้นตัวแปรความยาวช่วงสะพานจะส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของการเปรียบเทียบนี้ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพานโดยจะแปรผันตามกัน

จากภาพที่ 4.53 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานตามความเร็วรถบรรทุกต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานเกือบทุกตำแหน่งจะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานโดยจะมีค่าสูงกว่าไม่มากนัก และค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานตามความเร็วรถบรรทุกที่มากขึ้นในแต่ผิวทางประเภทต่างๆ โดยเฉพาะผิวทางประเภท A ที่อาจจะสูงถึง 2-3 เท่า เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานที่มีความขรุขระด้วยความเร็วสูงขึ้นจะทำให้เกิดการสั่นของรถบรรทุกที่มากขึ้น ส่งผลให้สะพานสั่นมากขึ้นตามไปด้วย รวมถึงผลของการใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ซึ่งเป็นกรณีวิกฤติที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนของรถบรรทุกไปบนสะพานที่ให้ค่าตัวประกอบการกระแทกสูงมาก ดังนั้นตัว

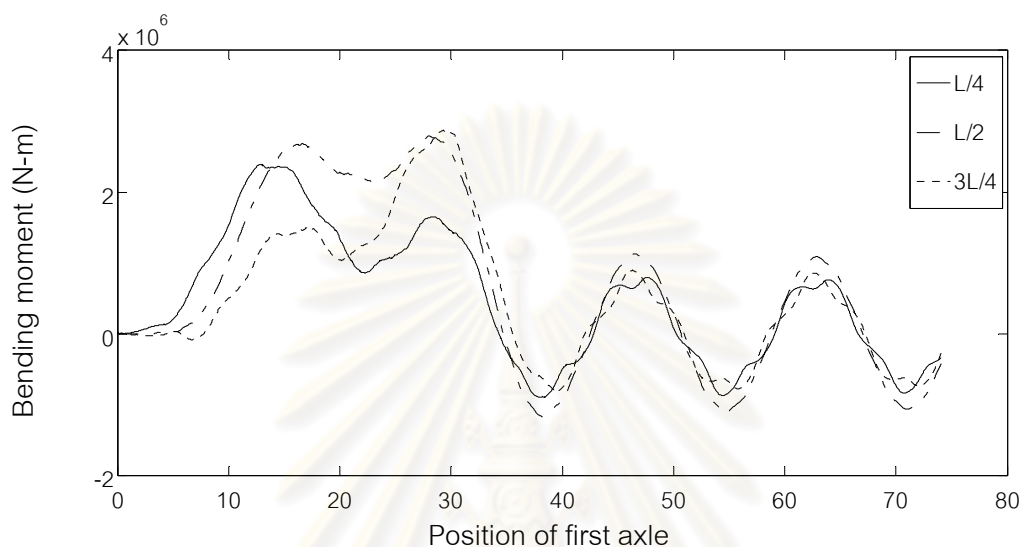
แปรความเร็วรถบรรทุกจะส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของการเปรียบเทียบนี้ที่ตำแหน่งต่างๆ ของสะพานโดยจะแปรผันตามกัน

จากภาพที่ 4.54 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่ง x เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง สะพานตามน้ำหนักรถบรรทุกต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผิวทางประเภท A, B และ C จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานเกือบทุกตำแหน่งจะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลาง สะพานแต่จะสูงกว่าไม่มากนัก และค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง ถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกที่ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานยกเว้นที่น้ำหนักรถบรรทุก 20 ตัน กล่าวคือตำแหน่งบนสะพานไม่มีผลต่อ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของตัวประกอบการกระแทกสำหรับรถบรรทุก 20 ตัน แต่ที่น้ำหนัก รถบรรทุกอื่นๆค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 98 ของการเปรียบเทียบจะสูงกว่าเกือบจะเท่าๆกันในผิวทาง ประเภท B และ C โดยอาจจะสูงถึง 1.5-2 เท่า นอกจากนี้สำหรับผิวทางประเภท A ค่าเปอร์เซ็นต์ ไทม์ที่ 98 ของการเปรียบเทียบนี้จะแปรผันตามน้ำหนักรถบรรทุกโดยอาจสูงได้ถึง 2-3 เท่า

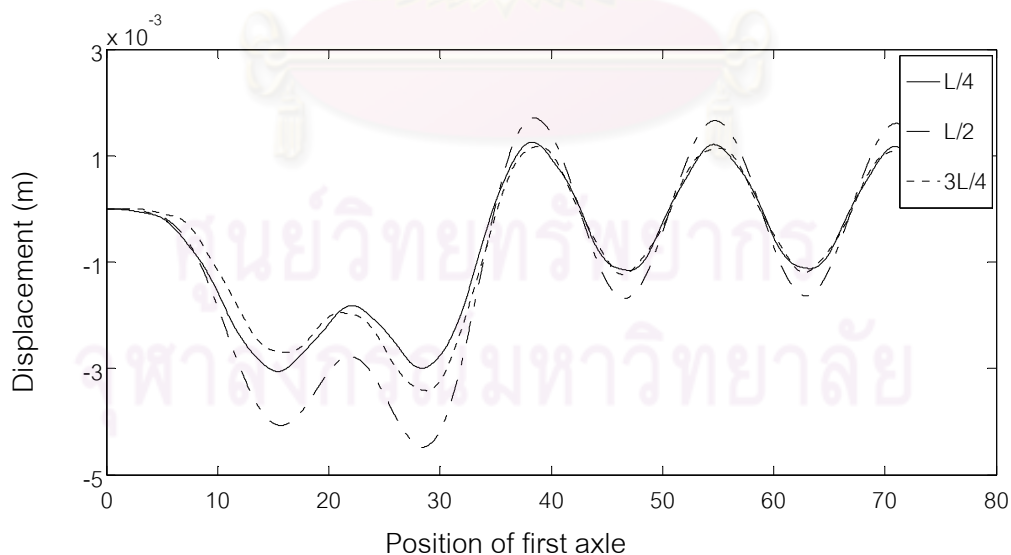
เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของผลที่ได้ในภาพที่ 4.52 - 4.54 ซึ่งค่าตัวประกอบการ กระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานจะมากกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง กึ่งกลางสะพาน และค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมากกว่า ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจึงทำการศึกษากกรณีในตัวประกอบการ กระแทก ณ ตำแหน่ง $L/4$ จะมากกว่าตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานและ ตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่ง $3L/4$ จะมากกว่าตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่ง กึ่งกลางสะพานด้วยเช่นกัน โดยตัวประกอบการกระแทก ณ ตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ จะ เท่ากับ 0.12, 0 และ 0.43 ตามลำดับ กรณีนี้เป็นกรณีที่รถบรรทุกน้ำหนัก 30 ตัน มีสติเฟเนสเป็น ค่าที่ขบถ่วงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 40 เมตรต่อวินาทีไปบนสะพานที่มีความยาวช่วง 40 เมตร ความถี่ธรรมชาติเป็นค่าที่ขบถ่วงและอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.005

โมเมนต์ดัดของสะพานที่เวลาต่างๆทั้ง 3 ตำแหน่งบนสะพานขณะที่รถบรรทุก กำลังเคลื่อนที่แสดงในภาพที่ 4.55 จะเห็นได้ว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของทั้ง 3 ตำแหน่งบนสะพานจะ ไม่ได้เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ $3L/4$ จะมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานอยู่เล็กน้อย แต่ตัวประกอบการกระแทกของทั้ง 2 ตำแหน่งจะแตกต่างกัน

มากซึ่งที่ตำแหน่ง $3L/4$ จะเท่ากับ 0.43 และที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะเท่ากับ 0 เนื่องจากที่ตำแหน่ง $3L/4$ โมเมนต์ดัดทางสถิติมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ดัดทางสถิติที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 4.58 และ 4.59



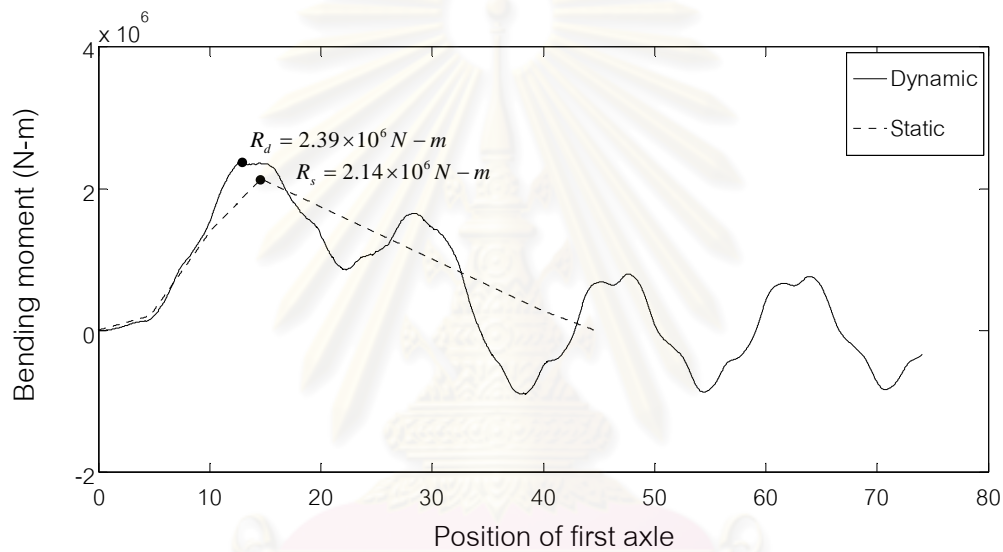
ภาพที่ 4.55 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์ที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน



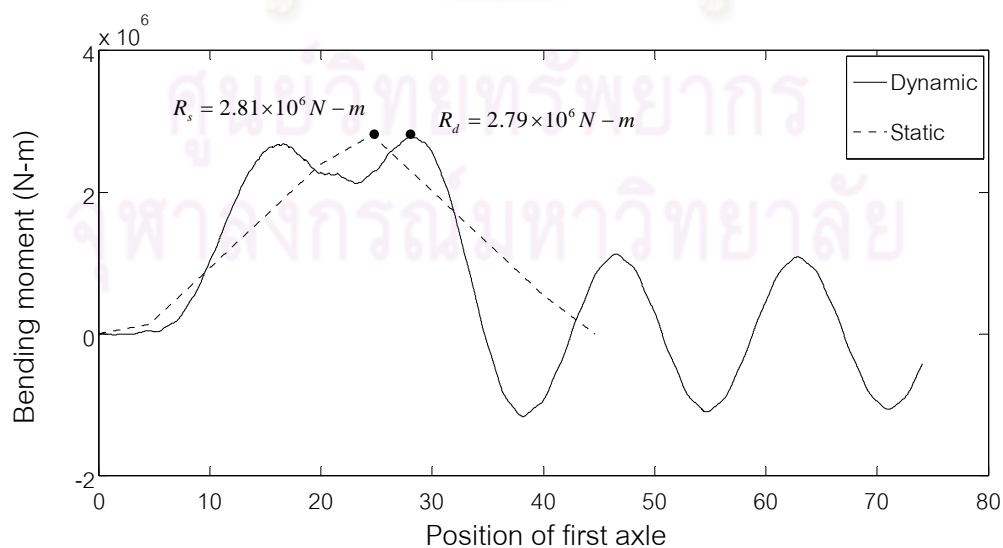
ภาพที่ 4.56 การกระจัดในแนวตั้งที่ตำแหน่งต่างๆของสะพาน

นอกจากนี้จากภาพที่ 4.55 ยังพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปโมเมนต์ดัดอาจไม่ได้สูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่ตำแหน่ง $L/4$ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ประกอบกับ

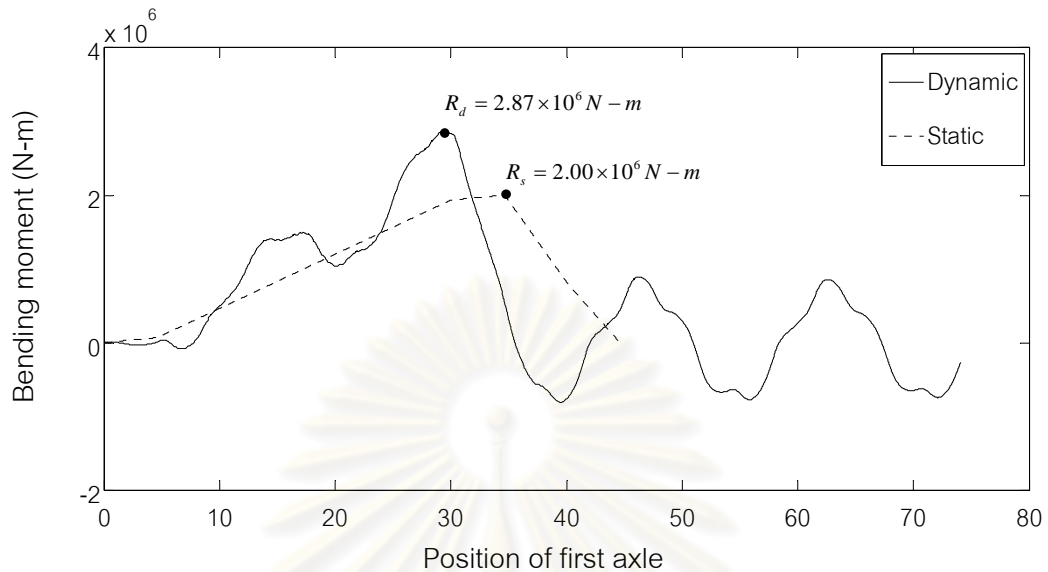
คุณสมบัติด้านการสลายพลังงานที่ต่ำของสะพาน ($\xi = 0.005$) และเห็นได้ว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง $3L/4$ มีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่ง $L/4$ อยู่เล็กน้อย แต่ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $3L/4$ จะมากกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่ง $L/4$ อย่างชัดเจน โดยที่ตำแหน่ง $3L/4$ จะเท่ากับ 0.43 และที่ตำแหน่ง $L/4$ เท่ากับ 0.12 เนื่องจากว่าโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $3L/4$ มีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/4$ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าน้ำหนักทางสถิตที่เพลหน้าและเพลหลังไม่เท่ากัน โดยน้ำหนักทางสถิตที่เพลหลังจะมีค่ามากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.57 และ 4.59



ภาพที่ 4.57 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/4$ ของสะพาน



ภาพที่ 4.58 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $L/2$ ของสะพาน



ภาพที่ 4.59 โมเมนต์ดัดทางพลศาสตร์และโมเมนต์ดัดทางสถิตที่ตำแหน่ง $3L/4$ ของสะพาน

จากภาพที่ 4.56 ได้ว่าการกระจัดของทั้ง 3 ตำแหน่งบนสะพานที่เวลาต่างๆจะมีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 4.55 แต่แตกต่างกันตรงที่การกระจัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะมีค่ามากที่สุด

จากการพิจารณาตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆ โดยแบ่งเป็น 3 โซนคือ ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพาน ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน และตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพาน เมื่อทำการพิจารณาตัวประกอบการกระแทกทั้ง 3 โซนนี้ พบว่ามี 4 กรณีที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 คือ $I_n > I_m > I_f$

กรณีที่ 2 คือ I_m มีค่ามากที่สุด

กรณีที่ 3 คือ $I_f > I_m > I_n$

กรณีที่ 4 คือ $I_n > I_m$ และ $I_f > I_m$

โดยที่

I_n คือ ตัวประกอบการกระแทกที่มีค่ามากที่สุดจาก 3 ตำแหน่งคือ $L/8$, $L/4$ และ $3L/8$

I_m คือ ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน

I_f คือ ตัวประกอบการกระแทกที่มีค่ามากที่สุดจาก 3 ตำแหน่งคือ $5L/8$, $3L/4$ และ $7L/8$

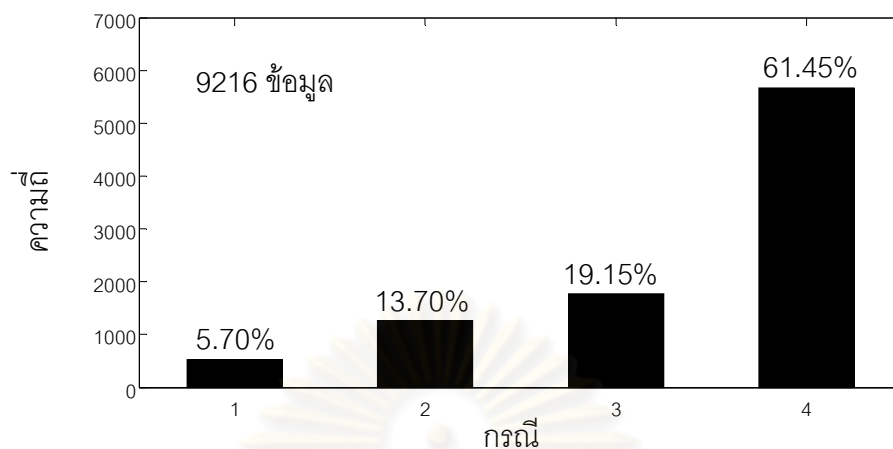
ในการวิเคราะห์หาตัวประกอบการกระแทกจากการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกไปบนสะพานทั้งหมด 9,216 เหตุการณ์สำหรับผิวทางประเภทต่างๆ ทำให้สามารถนับความถี่ของเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดกรณีที่น่าสนใจทั้ง 4 กรณีดังกล่าวได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ตารางแจกแจงความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับแต่ละประเภทผิวทาง

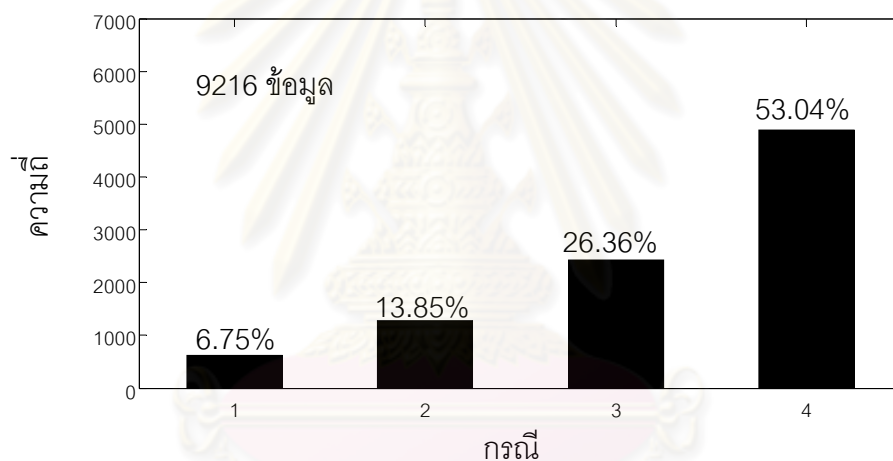
ประเภทผิวทาง	กรณีที่	ความถี่	ความน่าจะเป็น
A	1	525	5.70%
	2	1263	13.70%
	3	1765	19.15%
	4	5663	61.45%
B	1	622	6.75%
	2	1276	13.85%
	3	2430	26.36%
	4	4888	53.04%
C	1	652	7.07%
	2	1252	13.59%
	3	2803	30.41%
	4	4509	48.93%

จากตารางที่ 4.15 จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 4 ซึ่งคือค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานและถัดจากกึ่งกลางสะพานสูงกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด และกรณีที่ 1 ซึ่งคือ ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานสูงกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน แต่ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานต่ำกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยที่สุด

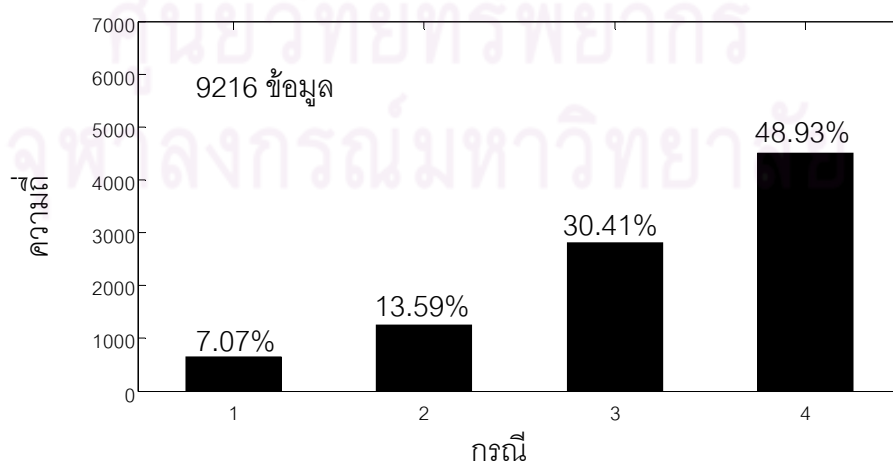
จากข้อมูลในตารางที่ 4.15 สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพการกระจายของกรณีต่างๆสำหรับแต่ละประเภทผิวทางได้ดังภาพที่ 4.60-4.62 จะเห็นได้ว่า การกระจายของกรณีต่างๆสำหรับแต่ละประเภทผิวทางจะมีลักษณะที่คล้ายกัน



ภาพที่ 4.60 แผนภาพการกระจายความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท A



ภาพที่ 4.61 แผนภาพการกระจายความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท B



ภาพที่ 4.62 แผนภาพการกระจายความถี่ของเหตุการณ์ตามกรณีต่างๆ สำหรับผิวทางประเภท C

บทที่ 5

สรุปผล

การศึกษานี้พิจารณาหาค่าตัวประกอบการกระแทกด้านโมเมนต์ตัดจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองสองมิติแสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน โดยจำลองสะพานเป็นคานช่วงเดียว และจำลองรถบรรทุกที่มีสองเพลลา รวมทั้งจำลองสภาพผิวทางของสะพาน สุดท้ายจึงจำลองเหตุการณ์การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกไปบนสะพานภายใต้ตัวแปรหรือเงื่อนไขต่างๆที่ต้องการศึกษา สรุปผลที่ได้เป็นดังนี้

1) เนื่องจากการศึกษาในอดีตมักคำนวณค่าตัวประกอบการกระแทกของสะพานจากสภาพเริ่มต้นที่เป็นศูนย์กล่าวคือตัวรถไม่มีการสั่นตัวเริ่มต้น หรือมีการพิจารณาเพียงผลของรอยต่อสะพาน (expansion joint) แต่ไม่มีงานศึกษาใดพิจารณาผลของการสั่นตัวเริ่มต้นของรถที่เกิดจากการเคลื่อนบนผิวทางตามปกติ ทั้งที่ในเหตุการณ์จริงก่อนที่รถบรรทุกจะเคลื่อนที่เข้าสู่สะพานย่อมมีสภาพเริ่มต้นเนื่องจากผลดังกล่าวด้วยกันทั้งนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณาให้รถบรรทุกมีสภาพเริ่มต้นเป็นการกระจัดตามแนวตั้ง ซึ่งกำหนดจากพลังงานสะสมเฉลี่ยของรถบรรทุกคันเดียวกัน หากต้องเคลื่อนที่ไปบนผิวทางซึ่งมีความขรุขระเป็นระยะทาง 200 เมตร จากการวิเคราะห์ผลจากสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุกที่มีต่อค่าตัวประกอบการกระแทกพบว่า ได้ค่าตัวประกอบการกระแทกสูงกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก โดยพบว่าผลของการกระจัดเริ่มต้นที่ได้พิจารณาในวิเคราะห์อาจทำให้ค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-80 ซึ่งถือเป็นการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบการกระแทกอย่างมาก จึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นต้องพิจารณาเสมอในการหาค่าตัวประกอบการกระแทกของสะพาน เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและสอดคล้องความเป็นจริงที่สุด

2) ผลการศึกษาการกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกพบว่า การกระจายของตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางประเภทต่างๆจะมีลักษณะการกระจายที่คล้ายกัน จะต่างกันตรงที่ช่วงของค่าตัวประกอบการกระแทกและความถี่ของข้อมูล ซึ่งค่าตัวประกอบการกระแทกจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างผิวทางแต่ละประเภท สาเหตุเป็นเพราะการสั่นของสะพานที่มีความรุนแรงขึ้นเมื่อผิวทางแฉ่ง นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้จากการสั่นของรถบรรทุกอีกด้วย ดังนั้นเพื่อความแม่นยำของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระแทกในประเด็นต่างๆ จึงมีความจำเป็นต้องแยกการวิเคราะห์ออกเป็นผิวทางประเภทต่างๆ เนื่องจากความขรุขระของผิวทางจะส่งผลอย่างมากต่อค่าตัวประกอบการกระแทก อีกทั้งยังพบว่าการกระจายของค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆบนสะพานจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน และ

จากการหาค่าเฉลี่ย ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 และค่าสูงสุดของตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆของสะพานสำหรับผิวทางแต่ละประเภทพบว่า ตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่นๆอาจมีค่าสูงกว่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ ซึ่งได้ผลเป็นเช่นนี้ทุกสภาพผิวทาง

3) จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับตัวแปรต่างๆเช่น ความยาวช่วงของสะพาน ความถี่ธรรมชาติของสะพาน ความเร็วรถบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกพบว่า ตัวประกอบการกระแทกมีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของสะพาน ความเร็วและน้ำหนักของรถบรรทุก แต่จะไม่มีความสัมพันธ์กับความยาวช่วงของสะพาน โดยตัวประกอบการกระแทกจะแปรผกผันกับน้ำหนักของรถบรรทุก แต่จะแปรผันตามความเร็วรถบรรทุก นอกจากนี้ยังแปรผันตามความถี่ธรรมชาติของสะพานในช่วงความถี่ 0 - 3.2 Hz และแปรผกผันกันในช่วงความถี่ 3.2-12 Hz ซึ่งตัวประกอบการกระแทกจะมีความสัมพันธ์มากที่สุดกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกกับความเร็วรถบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกจะใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบการกระแทกกับค่าความถี่ถึงประมาณ 0.40 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวกับค่าความเร็วรถบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกจะมีค่าประมาณ 0.20 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์กับตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากมาตรฐานต่างๆได้ผลที่สอดคล้องกับเบื้องต้นคือ มาตรฐานส่วนใหญ่ที่ให้ตัวประกอบการกระแทกเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพานจะไม่มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ แต่จะมีความสัมพันธ์กับมาตรฐานของประเทศแคนาดาที่ให้ตัวประกอบการกระแทกอยู่ในรูปของความถี่ธรรมชาติสะพาน

4) การศึกษาได้พิจารณาค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆบนสะพาน เพราะมีสมมติฐานว่าตัวประกอบการกระแทกที่มีค่าสูงสุดอาจไม่ได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน แม้งานวิจัยที่ผ่านมาจะศึกษาเฉพาะตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งนี้ อีกทั้งมาตรฐานการออกแบบสะพานจะกำหนดค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานมาใช้ในการออกแบบ จึงทำการเปรียบเทียบตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งต่างๆกับตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยนำค่าเฉลี่ยและค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 มาใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ ความยาวช่วงสะพาน ความเร็วรถบรรทุก และน้ำหนักบรรทุก พบว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งอื่นๆอาจมีค่าสูงกว่าค่าตัวประกอบการกระแทกที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้ ประกอบกับผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าใน

กรณีที่รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานนั้น ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งอื่นๆ อาจมีค่ามากกว่า โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้เช่นเดียวกัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง พิจารณาตัวประกอบภาระกระทำของแต่ละตำแหน่งบนสะพานเพื่อให้การออกแบบมีความถูกต้อง ซึ่งจากการนำค่าเฉลี่ยและค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 98 มาวิเคราะห์ตัวประกอบภาระกระทำที่แต่ละ ตำแหน่งบนสะพานพบว่า ตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานมีแนวโน้มที่จะ มีค่าสูงกว่าตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเสมอ ซึ่งเป็นเพราะว่าขณะที่ รถบรรทุกเคลื่อนไปบนสะพานที่มีความขรุขระจะทำให้สะพานสั่นเพิ่มมากขึ้นตามเวลา ประกอบ กับค่าโมเมนต์ดัดเชิงสถิติมีค่าต่ำลงเมื่อตำแหน่งบนสะพานเข้าใกล้ฐานรองรับ แต่ในบางกรณีตัว ประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานก็อาจจะมีค่าสูงกว่าตัวประกอบภาระ กระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เกิดจากผลของสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ที่ในช่วงแรกรถบรรทุกจะมีพลังงานสูงจึงสร้างแรงกระทำต่อสะพานมาก แล้วค่อยๆสลายไปจาก ความหน่วงของรถบรรทุกเอง นอกจากนี้คุณสมบัติด้านการสลายพลังงานที่ต่ำของสะพาน ($\xi = 0.005$) ก็มีผลที่ทำให้ตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งอื่นๆ มากกว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลาง สะพานได้เช่นเดียวกัน ซึ่งจากการศึกษาทั้งหมด 9216 เหตุการณ์ของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปบน สะพานสำหรับผิวทางประเภทต่างๆพบว่า กรณีที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุดคือการที่ตัว ประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งก่อนถึงกึ่งกลางสะพานและตำแหน่งถัดจากกึ่งกลางสะพานจะมี ค่าสูงกว่าตัวประกอบภาระกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยมีโอกาสเกิดขึ้นได้ถึง 48-62%

ข้อเสนอแนะ

- 1) แนวทางการศึกษาต่อไปควรมีการพิจารณาสภาพเริ่มต้นของรถบรรทุก ที่ เป็น การสั่นเริ่มต้นทั้งจากสภาพถนนก่อนเข้าสู่สะพานและจากรอยต่อสะพาน
- 2) สภาพผิวทางของสะพานจะส่งผลอย่างมากต่อค่าตัวประกอบภาระกระทำ ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาสภาพผิวทางของสะพานเป็นลำดับแรก
- 3) สูตรที่ใช้ในหาค่าตัวประกอบภาระกระทำควรถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของ ความถี่ธรรมชาติของสะพานเช่นเดียวกับมาตรฐานแคนาดาเนื่องจากมีผลจากการสั่นพ้อง
- 4) ในการออกแบบสะพานจำเป็นต้องพิจารณาผลตอบแทนที่ตำแหน่งๆต่าง อย่างรอบคอบ เนื่องจากไม่มีตำแหน่งใดที่ผลตอบแทนจะครอบคลุมตำแหน่งอื่นๆได้ทั้งหมด
- 5) งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับแบบจำลองสะพานกับรถบรรทุก และการ จำลองความขรุขระที่อาจคลาดเคลื่อนจริง ทำให้ค่าตัวประกอบภาระกระทำที่ได้ อาจมีแนวโน้มสูง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ออกแบบควรมาจากผลการทดสอบสะพานในภาคสนามที่จะมีการศึกษาในอนาคต

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมทางหลวง 2549. รายงานบทสรุปสำหรับผู้บริหาร. โครงการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานในการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและออกแบบเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างสะพาน

กรมทางหลวง 2549. รายงานการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างสะพาน Multi Beams. โครงการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานในการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและออกแบบเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างสะพาน

กรมทางหลวงชนบท 2552. การศึกษาและจัดทำแบบมาตรฐานโครงสร้างช่วงความยาว 40 – 100 เมตร

กรมทางหลวง 2544. แบบมาตรฐานงานก่อสร้างถนนและสะพาน

กองบูรณะและบำรุงรักษา กรมโยธาธิการ 2544. แบบมาตรฐานงานก่อสร้างถนนและสะพาน

สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท 2545. แบบมาตรฐานทางหลวงชนบท

ภาษาอังกฤษ

Ashebo, B., Chan, H.T., and Yu, L. 2007. Evaluation of Dynamic Loads on a Skew Box Girder Continuous Bridge. Engineering Structures, Vol.29: 1052 – 1073.

Brady, S.P., O'Brien, E.J., and Znidaric, A. 2006. Effect of Vehicle Velocity on the Dynamic Amplification of a Vehicle Crossing a Simply Supported Bridge. Journal of Bridge Engineering, Vol.11 No.2: 241 – 249.

Chang, D., and Lee, H. 1994. Impact Factors for Simple- Span Highway Girder Bridges. Journal of Structural Engineering, Vol.120 No.3: 704 – 715.

Chopra, A. K. 1995. Dynamics of Structures. New Jersey: Prentice-Hall.

- Daniel, J. I. 1996. Engineering Vibration. New Jersey: Prentice-Hall
- Deng, L., and Cai, C.S. 2010. Development of Dynamic Impact Factor for Performance Evaluation of Existing Multi-Girder Concrete Bridge. Engineering Structures, Vol.32: 21 – 31.
- Da Silva, J.G.S. 2004. Dynamical Performance of Highway Bridge Decks with Irregular Pavement Surface. Computers & Structures, Vol.82: 871-881.
- Gary, C. H., and Wong, K. 1999. Structural Dynamics for Structural Engineers. New York: John Wiley & Sons.
- Gonzalez, A., Obrien, E.J., Li, Y.Y., and Cashell, K. 2000. The Use of Vehicle Acceleration Measurements to Estimate Road Roughness. Vehicle system dynamics, Vol.46: 483 – 499.
- ISO 8608 1995. Mechanical Vibration - Road Roughness Profiles.
- Kim, S., and Nowak, S. 1997. Load Distribution and Impact Factors for I-Girder Bridges. Journal of Bridge Engineering, Vol.2 No.3: 97 – 104.
- Kwasniewski, L., et al 2006. Experimental Evaluation of Dynamic Effects for a Selected Highway Bridge. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol.20 No.3: 253 – 260.
- Law, S.S., and Zhu, X.Q. 2005. Bridge Dynamic Responses due to Road Surface Roughness and Braking of Vehicle. Journal of Sound and Vibration, Vol.282: 805 – 830.
- Li, H., Wekezer, J., and Kwasniewski, L. 2008. Dynamic Response of a Highway Bridge Subjected to Moving Vehicles. Journal of Bridge Engineering, Vol.13 No.5: 439 – 448.

- Liu, C., Huang, D., and Wang, T.L. 2002. Analytical Dynamic Impact Study based on Correlated Road Roughness. Computers & Structures, Vol.80: 1639 – 1650.
- Moghimi, H., and Ronagh, H.R. 2008. Impact Factors for a Composite Steel Bridge using Non-Linear Dynamic Simulation. International Journal of Impact Engineering, Vol.35: 1228 - 1243
- Potisuk, T., and Higgins, C. 2007. Field Testing and Analysis of CRC Deck Girder Bridges. Journal of Bridge Engineering, Vol.12 No.1: 53 – 63.
- Shi, X., Cai, C.S., and Chen, S. 2008. Vehicle Induced Dynamic Behavior of Short-Span Slab Bridges Considering Effect of Approach Slab Condition. Journal of Bridge Engineering, Vol.13: 83 – 92.
- Sangjin, K., and Nowak, A. 1998. Load Distribution and Impact Factor for I-Girder Bridges. Journal of Bridge Engineering, Vol.2 No.3: 97-104
- Sukhavarsh, J. and Sanjay, G. 2008. Road Surface Roughness Generation by Power Spectral Density in Bridge Design. Structure Congress. ASCE
- Silva J.G.S. 2004. Dynamical Performance of Highway Bridge Decks with Irregular Pavement Surface. Computers & Structures, Vol.82: 871 – 881.
- Yang, Y.B., Liao, S.S., and Lin, B.H. 1995. Impact Formulas for Vehicles Moving Over Simple and Continuous Beams. Journal of Structural Engineering, Vol.121 No.11: 1644 – 1650.
- Zhang, X., Sennah K., and Kennedy J.B. 2003. Evaluation of Impact Factor for Composite Concrete-Steel Cellular Straight Bridges. Engineering Structures, Vol.25: 313 – 321.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.1 ความถี่ธรรมชาติของสะพานจากการทดสอบในภาคสนาม (กรมทางหลวง, 2549)

จังหวัดที่ตั้งของ สะพาน	ประเภทของ สะพาน	ความกว้าง (m)	ความยาวช่วง (m)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
กาญจนบุรี	RC Slab	11.0	9.0	12.59
สมุทรสงคราม	RC Slab	15.5	10.0	12.60
อ่างทอง	RC Slab	11.0	10.0	10.18
อุบลราชธานี	RC Slab	10.0	10.0	10.65
สุโขทัย	RC Slab	10.0	10.0	11.51
สมุทรสงคราม	RC Slab	12.0	10.0	12.73
เพชรบูรณ์	Plank Girder	11.0	10.0	10.77
ปทุมธานี	Plank Girder	12.0	10.0	10.49
อ่างทอง	Plank Girder	11.0	10.0	11.09
ตราด	Box Girder	8.0	10.0	12.91
ชัยนาท	Plank Girder	11.0	10.0	12.15
ลำพูน	Plank Girder	12.0	10.0	11.27
ฉะเชิงเทรา	Plank Girder	11.0	10.0	11.34
ชลบุรี	Multi Beam	13.0	12.0	10.57
อยุธยา	Multi Beam	11.0	12.0	12.26
ชลบุรี	Multi Beam	13.0	12.0	10.57
สมุทรสาคร	Multi Beam	11.0	24.0	3.85
สมุทรสาคร	Multi Beam	11.0	25.0	3.85
เพชรบุรี	Box Girder	12.0	20.0	5.10
นครราชสีมา	Box Girder	12.0	20.0	4.77
นครปฐม	Box Girder	12.0	20.0	4.66
นครราชสีมา	Box Girder	10.0	20.0	4.93
สุพรรณบุรี	Box Girder	12.0	20.0	5.20
อุทัยธานี	Box Girder	12.0	20.0	4.93
ชัยนาท	Box Girder	12.0	20.0	4.74
ฉะเชิงเทรา	I Girder	-	30.0	3.80
สุราษฎร์ธานี	I Girder	-	30.0	4.75

กำแพงเพชร	I Girder	-	30.0	4.60
ฉะเชิงเทรา	I Girder	-	30.0	3.12
นนทบุรี	I Girder	-	25.0	5.90
ปราจีนบุรี	I Girder	-	21.0	4.94
ตาก	I Girder	-	30.0	3.69
สุราษฎร์ธานี	I Girder	-	30.0	5.00

ตารางที่ ผ.2 มวลต่อความยาวสะพานจากแบบมาตรฐานต่างๆ

หน่วยงาน	ประเภทของ สะพาน	ความกว้าง (m)	ความยาวช่วง (m)	มวลต่อความยาว (Kg/m)
กรมโยธาธิการ	RC Slab	10.0	5.0	8400
	RC Slab	10.0	6.0	8400
	RC Slab	10.0	7.0	9600
	RC Slab	10.0	8.0	10800
	RC Slab	10.0	9.0	12000
	RC Slab	10.0	10.0	12000
	RC Slab	10.0	12.0	13200
กรมทางหลวง ชนบท	RC Slab	9.0	5.0	7560
	RC Slab	9.0	6.0	7560
	RC Slab	9.0	7.0	8640
	RC Slab	9.0	8.0	9720
	RC Slab	9.0	9.0	10800
	RC Slab	9.0	10.0	10800
	Box Girder	13.5	30.0	21600
	Box Girder	13.5	40.0	22140
	Box Girder	13.5	50.0	22140
	Box Girder	13.5	60.0	23520
	Box Girder	13.5	70.0	23520
	Box Girder	13.5	80.0	23520

หน่วยงาน	ประเภทของ สะพาน	ความกว้าง (m)	ความยาวช่วง (m)	มวลต่อความยาว (Kg/m)
กรมทางหลวง	RC Slab	10.0	5.0	7680
	RC Slab	10.0	6.0	8640
	RC Slab	10.0	7.0	9360
	RC Slab	10.0	8.0	10320
	RC Slab	10.0	9.0	11280
	RC Slab	10.0	10.0	12720
	Multi Beam	10.0	6.0	7680
	Multi Beam	10.0	8.0	9120
	Multi Beam	10.0	10.0	11520
	Multi Beam	10.0	12.0	13680
	Multi Beam	10.0	14.0	14880
	Multi Beam	10.0	16.0	16080
	Multi Beam	10.0	18.0	17280
	Multi Beam	10.0	20.0	19440
	Multi Beam	10.0	22.0	20640
	Multi Beam	10.0	24.0	22320
	I Girder	10.0	20.0	12450

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.3 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับผิวทางประเภท A

Span length (m)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
10	1/8	0.00	0.12	0.35	0.46	1152
	1/4	0.00	0.14	0.39	0.56	1152
	3/8	0.00	0.14	0.45	0.84	1152
	1/2	0.00	0.15	0.50	0.86	1152
	5/8	0.00	0.15	0.55	1.22	1152
	3/4	0.00	0.15	0.55	1.30	1152
	7/8	0.00	0.16	0.56	1.05	1152
20	1/8	0.00	0.12	0.36	0.58	1152
	1/4	0.00	0.14	0.44	0.72	1152
	3/8	0.00	0.15	0.54	0.85	1152
	1/2	0.00	0.17	0.60	0.98	1152
	5/8	0.00	0.19	0.71	1.27	1152
	3/4	0.00	0.24	0.81	1.51	1152
	7/8	0.00	0.23	0.80	1.43	1152
30	1/8	0.00	0.13	0.40	0.67	1152
	1/4	0.00	0.16	0.46	0.59	1152
	3/8	0.00	0.17	0.49	0.74	1152
	1/2	0.00	0.19	0.54	0.84	1152
	5/8	0.00	0.20	0.59	0.97	1152
	3/4	0.01	0.24	0.66	0.96	1152
	7/8	0.00	0.23	0.65	0.94	1152
40	1/8	0.00	0.15	0.56	1.39	1152
	1/4	0.00	0.17	0.73	1.60	1152
	3/8	0.00	0.19	0.74	1.86	1152
	1/2	0.00	0.20	0.83	2.01	1152
	5/8	0.00	0.21	0.80	1.84	1152
	3/4	0.00	0.24	0.87	1.71	1152
	7/8	0.00	0.23	0.83	1.52	1152
50	1/8	0.00	0.17	0.70	1.57	1152
	1/4	0.00	0.22	0.88	1.82	1152
	3/8	0.00	0.24	1.08	2.10	1152
	1/2	0.00	0.25	1.20	2.34	1152
	5/8	0.00	0.26	1.25	2.24	1152
	3/4	0.00	0.28	1.16	2.09	1152
	7/8	0.00	0.27	1.09	2.08	1152
60	1/8	0.00	0.15	0.54	1.09	1152
	1/4	0.00	0.19	0.69	1.28	1152
	3/8	0.00	0.22	0.87	1.54	1152
	1/2	0.00	0.23	0.97	1.65	1152
	5/8	0.00	0.23	0.97	1.70	1152
	3/4	0.00	0.25	0.93	1.81	1152
	7/8	0.00	0.25	0.88	1.61	1152
70	1/8	0.00	0.13	0.42	0.83	1152
	1/4	0.00	0.13	0.43	0.82	1152
	3/8	0.00	0.13	0.47	0.67	1152
	1/2	0.00	0.13	0.51	0.84	1152
	5/8	0.00	0.14	0.55	0.91	1152
	3/4	0.00	0.18	0.63	1.21	1152
	7/8	0.00	0.20	0.60	1.35	1152
80	1/8	0.00	0.14	0.52	1.19	1152
	1/4	0.00	0.12	0.51	1.03	1152
	3/8	0.00	0.08	0.32	0.74	1152
	1/2	0.00	0.07	0.27	0.48	1152
	5/8	0.00	0.09	0.33	0.81	1152
	3/4	0.00	0.15	0.53	1.31	1152
	7/8	0.00	0.18	0.64	1.75	1152

ตารางที่ ๘.4 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดสำหรับผิวทางประเภท A

Velocity (m/s)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
5	1/8	0.00	0.08	0.28	0.56	1152
	1/4	0.00	0.08	0.30	0.76	1152
	3/8	0.00	0.08	0.34	0.71	1152
	1/2	0.00	0.09	0.37	0.77	1152
	5/8	0.00	0.10	0.38	0.82	1152
	3/4	0.00	0.11	0.39	0.83	1152
	7/8	0.00	0.11	0.38	0.80	1152
10	1/8	0.00	0.11	0.35	1.01	1152
	1/4	0.00	0.12	0.48	1.25	1152
	3/8	0.00	0.12	0.47	1.50	1152
	1/2	0.00	0.12	0.51	1.51	1152
	5/8	0.00	0.13	0.56	1.31	1152
	3/4	0.00	0.16	0.54	1.16	1152
	7/8	0.00	0.15	0.53	1.19	1152
15	1/8	0.00	0.15	0.47	0.92	1152
	1/4	0.00	0.14	0.57	1.13	1152
	3/8	0.00	0.15	0.63	1.16	1152
	1/2	0.00	0.16	0.71	1.30	1152
	5/8	0.00	0.16	0.71	1.29	1152
	3/4	0.00	0.19	0.73	1.24	1152
	7/8	0.00	0.19	0.68	1.12	1152
20	1/8	0.00	0.15	0.50	1.09	1152
	1/4	0.00	0.14	0.58	1.28	1152
	3/8	0.00	0.16	0.73	1.54	1152
	1/2	0.00	0.16	0.68	1.65	1152
	5/8	0.00	0.17	0.73	1.59	1152
	3/4	0.00	0.20	0.72	1.51	1152
	7/8	0.00	0.20	0.72	1.60	1152
25	1/8	0.00	0.15	0.51	1.57	1152
	1/4	0.00	0.16	0.61	1.82	1152
	3/8	0.00	0.15	0.70	2.10	1152
	1/2	0.00	0.19	0.78	2.34	1152
	5/8	0.00	0.19	0.78	2.20	1152
	3/4	0.00	0.21	0.85	2.02	1152
	7/8	0.00	0.22	0.83	1.79	1152
30	1/8	0.00	0.15	0.50	1.19	1152
	1/4	0.00	0.19	0.60	1.16	1152
	3/8	0.00	0.17	0.70	1.39	1152
	1/2	0.00	0.19	0.81	1.42	1152
	5/8	0.00	0.23	0.85	1.60	1152
	3/4	0.00	0.25	0.90	1.96	1152
	7/8	0.00	0.24	0.81	2.08	1152
35	1/8	0.00	0.16	0.57	1.11	1152
	1/4	0.00	0.21	0.68	1.31	1152
	3/8	0.00	0.22	0.81	1.48	1152
	1/2	0.00	0.20	0.93	1.67	1152
	5/8	0.00	0.24	0.93	1.77	1152
	3/4	0.00	0.30	1.00	1.80	1152
	7/8	0.00	0.29	0.94	1.95	1152
40	1/8	0.00	0.17	0.59	1.39	1152
	1/4	0.00	0.22	0.72	1.59	1152
	3/8	0.00	0.26	0.81	1.86	1152
	1/2	0.00	0.25	0.97	2.01	1152
	5/8	0.00	0.25	0.97	2.24	1152
	3/4	0.00	0.31	1.05	2.09	1152
	7/8	0.00	0.34	1.03	1.95	1152

ตารางที่ ผ.5 ค่าตัวประกอบการกระจายที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดสำหรับผิวทางประเภท A

Weight of truck (ton)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
20	1/8	0.00	0.08	0.28	0.56	1152
	1/4	0.00	0.08	0.30	0.76	1152
	3/8	0.00	0.08	0.34	0.71	1152
	1/2	0.00	0.09	0.37	0.77	1152
	5/8	0.00	0.10	0.38	0.82	1152
	3/4	0.00	0.11	0.39	0.83	1152
	7/8	0.00	0.11	0.38	0.80	1152
25	1/8	0.00	0.11	0.35	1.01	1152
	1/4	0.00	0.12	0.48	1.25	1152
	3/8	0.00	0.12	0.47	1.50	1152
	1/2	0.00	0.12	0.51	1.51	1152
	5/8	0.00	0.13	0.56	1.31	1152
	3/4	0.00	0.16	0.54	1.16	1152
	7/8	0.00	0.15	0.53	1.19	1152
30	1/8	0.00	0.15	0.47	0.92	1152
	1/4	0.00	0.14	0.57	1.13	1152
	3/8	0.00	0.15	0.63	1.16	1152
	1/2	0.00	0.16	0.71	1.30	1152
	5/8	0.00	0.16	0.71	1.29	1152
	3/4	0.00	0.19	0.73	1.24	1152
	7/8	0.00	0.19	0.68	1.12	1152
35	1/8	0.00	0.15	0.50	1.09	1152
	1/4	0.00	0.14	0.58	1.28	1152
	3/8	0.00	0.16	0.73	1.54	1152
	1/2	0.00	0.16	0.68	1.65	1152
	5/8	0.00	0.17	0.73	1.59	1152
	3/4	0.00	0.20	0.72	1.51	1152
	7/8	0.00	0.20	0.72	1.60	1152
40	1/8	0.00	0.15	0.51	1.57	1152
	1/4	0.00	0.16	0.61	1.82	1152
	3/8	0.00	0.15	0.70	2.10	1152
	1/2	0.00	0.19	0.78	2.34	1152
	5/8	0.00	0.19	0.78	2.20	1152
	3/4	0.00	0.21	0.85	2.02	1152
	7/8	0.00	0.22	0.83	1.79	1152
45	1/8	0.00	0.15	0.50	1.19	1152
	1/4	0.00	0.19	0.60	1.16	1152
	3/8	0.00	0.17	0.70	1.39	1152
	1/2	0.00	0.19	0.81	1.42	1152
	5/8	0.00	0.23	0.85	1.60	1152
	3/4	0.00	0.25	0.90	1.96	1152
	7/8	0.00	0.24	0.81	2.08	1152
50	1/8	0.00	0.16	0.57	1.11	1152
	1/4	0.00	0.21	0.68	1.31	1152
	3/8	0.00	0.22	0.81	1.48	1152
	1/2	0.00	0.20	0.93	1.67	1152
	5/8	0.00	0.24	0.93	1.77	1152
	3/4	0.00	0.30	1.00	1.80	1152
	7/8	0.00	0.29	0.94	1.95	1152
55	1/8	0.00	0.17	0.59	1.39	1152
	1/4	0.00	0.22	0.72	1.59	1152
	3/8	0.00	0.26	0.81	1.86	1152
	1/2	0.00	0.25	0.97	2.01	1152
	5/8	0.00	0.25	0.97	2.24	1152
	3/4	0.00	0.31	1.05	2.09	1152
	7/8	0.00	0.34	1.03	1.95	1152

ตารางที่ ผ.6 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับผิวทางประเภท B

Span length (m)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
10	1/8	0.00	0.30	0.87	1.47	1152
	1/4	0.00	0.34	1.01	1.62	1152
	3/8	0.00	0.35	1.17	1.96	1152
	1/2	0.00	0.38	1.24	2.03	1152
	5/8	0.00	0.39	1.40	2.18	1152
	3/4	0.00	0.40	1.42	2.52	1152
	7/8	0.00	0.39	1.32	2.08	1152
20	1/8	0.00	0.35	1.08	2.29	1152
	1/4	0.00	0.39	1.24	2.58	1152
	3/8	0.00	0.43	1.42	2.86	1152
	1/2	0.00	0.45	1.59	3.18	1152
	5/8	0.00	0.50	1.75	3.63	1152
	3/4	0.00	0.59	1.99	3.88	1152
	7/8	0.01	0.60	1.97	4.05	1152
30	1/8	0.00	0.38	1.17	2.32	1152
	1/4	0.00	0.43	1.23	2.70	1152
	3/8	0.00	0.47	1.39	2.61	1152
	1/2	0.00	0.50	1.51	2.65	1152
	5/8	0.00	0.54	1.56	2.62	1152
	3/4	0.01	0.60	1.65	2.77	1152
	7/8	0.02	0.61	1.70	3.67	1152
40	1/8	0.01	0.42	1.56	3.35	1152
	1/4	0.00	0.47	1.78	3.70	1152
	3/8	0.00	0.53	1.93	4.06	1152
	1/2	0.00	0.57	2.10	4.42	1152
	5/8	0.00	0.59	2.12	4.83	1152
	3/4	0.00	0.64	2.18	4.92	1152
	7/8	0.03	0.63	2.17	4.70	1152
50	1/8	0.00	0.54	2.34	5.21	1152
	1/4	0.00	0.60	2.67	5.67	1152
	3/8	0.00	0.65	2.97	6.10	1152
	1/2	0.00	0.70	3.16	6.44	1152
	5/8	0.01	0.73	3.10	6.64	1152
	3/4	0.02	0.77	3.05	6.58	1152
	7/8	0.02	0.77	2.83	6.29	1152
60	1/8	0.00	0.49	1.81	2.65	1152
	1/4	0.00	0.54	1.98	3.02	1152
	3/8	0.00	0.57	2.13	3.39	1152
	1/2	0.00	0.60	2.22	3.54	1152
	5/8	0.00	0.62	2.23	3.40	1152
	3/4	0.01	0.67	2.19	3.24	1152
	7/8	0.02	0.69	2.17	3.15	1152
70	1/8	0.00	0.38	1.23	3.69	1152
	1/4	0.00	0.37	1.31	2.99	1152
	3/8	0.00	0.36	1.34	1.85	1152
	1/2	0.00	0.36	1.36	2.03	1152
	5/8	0.00	0.41	1.43	2.13	1152
	3/4	0.01	0.49	1.56	3.65	1152
	7/8	0.01	0.55	1.69	4.22	1152
80	1/8	0.00	0.37	1.49	2.70	1152
	1/4	0.00	0.31	1.19	2.13	1152
	3/8	0.00	0.23	0.80	1.24	1152
	1/2	0.00	0.19	0.73	1.24	1152
	5/8	0.00	0.26	0.88	1.33	1152
	3/4	0.00	0.39	1.40	2.84	1152
	7/8	0.00	0.50	1.91	3.36	1152

ตารางที่ ผ.7 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดสำหรับผิวทางประเภท B

Velocity (m/s)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
5	1/8	0.00	0.26	0.94	1.98	1152
	1/4	0.00	0.28	1.05	2.27	1152
	3/8	0.00	0.29	1.16	2.53	1152
	1/2	0.00	0.31	1.22	2.80	1152
	5/8	0.00	0.33	1.23	3.02	1152
	3/4	0.00	0.36	1.25	2.82	1152
	7/8	0.00	0.36	1.29	2.57	1152
10	1/8	0.01	0.36	1.23	3.34	1152
	1/4	0.00	0.38	1.35	3.72	1152
	3/8	0.00	0.39	1.45	3.80	1152
	1/2	0.00	0.41	1.55	3.61	1152
	5/8	0.00	0.43	1.69	3.52	1152
	3/4	0.00	0.48	1.71	3.42	1152
	7/8	0.00	0.49	1.68	3.56	1152
15	1/8	0.00	0.44	1.60	4.20	1152
	1/4	0.00	0.45	1.78	4.50	1152
	3/8	0.00	0.47	1.91	4.80	1152
	1/2	0.00	0.49	1.92	5.08	1152
	5/8	0.00	0.51	2.02	5.47	1152
	3/4	0.00	0.57	2.06	5.45	1152
	7/8	0.00	0.58	1.90	4.94	1152
20	1/8	0.00	0.42	1.69	3.23	1152
	1/4	0.00	0.42	1.84	3.66	1152
	3/8	0.00	0.45	1.87	4.09	1152
	1/2	0.00	0.47	2.09	4.52	1152
	5/8	0.00	0.51	2.15	4.42	1152
	3/4	0.00	0.57	2.21	4.41	1152
	7/8	0.00	0.59	2.24	4.31	1152
25	1/8	0.00	0.41	1.64	3.32	1152
	1/4	0.00	0.43	1.81	3.68	1152
	3/8	0.00	0.44	1.96	4.03	1152
	1/2	0.00	0.48	2.08	4.37	1152
	5/8	0.00	0.50	2.15	4.73	1152
	3/4	0.00	0.55	2.09	5.04	1152
	7/8	0.00	0.60	2.09	4.64	1152
30	1/8	0.00	0.42	1.76	4.23	1152
	1/4	0.00	0.46	1.87	4.57	1152
	3/8	0.00	0.46	1.99	4.84	1152
	1/2	0.00	0.48	2.14	5.19	1152
	5/8	0.00	0.54	2.22	5.51	1152
	3/4	0.00	0.60	2.28	5.59	1152
	7/8	0.00	0.62	2.22	6.01	1152
35	1/8	0.00	0.46	1.65	4.67	1152
	1/4	0.00	0.50	1.75	5.05	1152
	3/8	0.00	0.52	1.94	5.38	1152
	1/2	0.00	0.53	2.05	5.60	1152
	5/8	0.00	0.60	2.06	5.73	1152
	3/4	0.00	0.69	2.19	5.71	1152
	7/8	0.00	0.72	2.27	5.24	1152
40	1/8	0.00	0.48	1.69	5.21	1152
	1/4	0.00	0.54	1.82	5.67	1152
	3/8	0.00	0.57	1.98	6.10	1152
	1/2	0.00	0.57	2.11	6.44	1152
	5/8	0.00	0.62	2.17	6.64	1152
	3/4	0.00	0.72	2.31	6.58	1152
	7/8	0.00	0.78	2.32	6.29	1152

ตารางที่ ๘.8 ค่าตัวประกอบการกระจายที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดสำหรับผิวทางประเภท B

Weight of truck (ton)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
20	1/8	0.00	0.26	0.94	1.98	1152
	1/4	0.00	0.28	1.05	2.27	1152
	3/8	0.00	0.29	1.16	2.53	1152
	1/2	0.00	0.31	1.22	2.80	1152
	5/8	0.00	0.33	1.23	3.02	1152
	3/4	0.00	0.36	1.25	2.82	1152
	7/8	0.00	0.36	1.29	2.57	1152
25	1/8	0.01	0.36	1.23	3.34	1152
	1/4	0.00	0.38	1.35	3.72	1152
	3/8	0.00	0.39	1.45	3.80	1152
	1/2	0.00	0.41	1.55	3.61	1152
	5/8	0.00	0.43	1.69	3.52	1152
	3/4	0.00	0.48	1.71	3.42	1152
	7/8	0.00	0.49	1.68	3.56	1152
30	1/8	0.00	0.44	1.60	4.20	1152
	1/4	0.00	0.45	1.78	4.50	1152
	3/8	0.00	0.47	1.91	4.80	1152
	1/2	0.00	0.49	1.92	5.08	1152
	5/8	0.00	0.51	2.02	5.47	1152
	3/4	0.00	0.57	2.06	5.45	1152
	7/8	0.00	0.58	1.90	4.94	1152
35	1/8	0.00	0.42	1.69	3.23	1152
	1/4	0.00	0.42	1.84	3.66	1152
	3/8	0.00	0.45	1.87	4.09	1152
	1/2	0.00	0.47	2.09	4.52	1152
	5/8	0.00	0.51	2.15	4.42	1152
	3/4	0.00	0.57	2.21	4.41	1152
	7/8	0.00	0.59	2.24	4.31	1152
40	1/8	0.00	0.41	1.64	3.32	1152
	1/4	0.00	0.43	1.81	3.68	1152
	3/8	0.00	0.44	1.96	4.03	1152
	1/2	0.00	0.48	2.08	4.37	1152
	5/8	0.00	0.50	2.15	4.73	1152
	3/4	0.00	0.55	2.09	5.04	1152
	7/8	0.00	0.60	2.09	4.64	1152
45	1/8	0.00	0.42	1.76	4.23	1152
	1/4	0.00	0.46	1.87	4.57	1152
	3/8	0.00	0.46	1.99	4.84	1152
	1/2	0.00	0.48	2.14	5.19	1152
	5/8	0.00	0.54	2.22	5.51	1152
	3/4	0.00	0.60	2.28	5.59	1152
	7/8	0.00	0.62	2.22	6.01	1152
50	1/8	0.00	0.46	1.65	4.67	1152
	1/4	0.00	0.50	1.75	5.05	1152
	3/8	0.00	0.52	1.94	5.38	1152
	1/2	0.00	0.53	2.05	5.60	1152
	5/8	0.00	0.60	2.06	5.73	1152
	3/4	0.00	0.69	2.19	5.71	1152
	7/8	0.00	0.72	2.27	5.24	1152
55	1/8	0.00	0.48	1.69	5.21	1152
	1/4	0.00	0.54	1.82	5.67	1152
	3/8	0.00	0.57	1.98	6.10	1152
	1/2	0.00	0.57	2.11	6.44	1152
	5/8	0.00	0.62	2.17	6.64	1152
	3/4	0.00	0.72	2.31	6.58	1152
	7/8	0.00	0.78	2.32	6.29	1152

ตารางที่ ผ.9 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับผิวทางประเภท C

Span length (m)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
10	1/8	0.00	0.68	1.91	2.84	1152
	1/4	0.00	0.73	2.02	3.49	1152
	3/8	0.00	0.77	2.31	3.65	1152
	1/2	0.00	0.83	2.55	3.98	1152
	5/8	0.00	0.86	2.75	3.72	1152
	3/4	0.00	0.86	2.68	3.79	1152
	7/8	0.00	0.86	2.55	4.85	1152
20	1/8	0.00	0.82	2.78	5.36	1152
	1/4	0.00	0.88	3.00	5.73	1152
	3/8	0.00	0.94	3.22	6.24	1152
	1/2	0.03	1.01	3.43	6.80	1152
	5/8	0.02	1.08	3.82	7.41	1152
	3/4	0.06	1.22	3.97	8.45	1152
	7/8	0.06	1.25	4.09	8.11	1152
30	1/8	0.07	0.92	2.50	4.25	1152
	1/4	0.03	0.98	2.69	4.41	1152
	3/8	0.00	1.05	2.86	4.89	1152
	1/2	0.00	1.09	2.99	4.40	1152
	5/8	0.05	1.16	3.15	4.91	1152
	3/4	0.07	1.27	3.25	4.91	1152
	7/8	0.09	1.31	3.50	5.39	1152
40	1/8	0.07	1.03	3.63	9.04	1152
	1/4	0.04	1.11	4.04	9.50	1152
	3/8	0.05	1.19	4.32	10.26	1152
	1/2	0.04	1.26	4.60	10.86	1152
	5/8	0.07	1.31	4.88	10.66	1152
	3/4	0.10	1.37	4.94	10.37	1152
	7/8	0.09	1.38	4.90	9.64	1152
50	1/8	0.10	1.28	5.32	9.94	1152
	1/4	0.04	1.36	5.67	10.64	1152
	3/8	0.07	1.45	6.15	11.39	1152
	1/2	0.09	1.51	6.43	12.01	1152
	5/8	0.11	1.56	6.57	12.34	1152
	3/4	0.13	1.63	6.44	13.03	1152
	7/8	0.10	1.64	6.21	12.68	1152
60	1/8	0.06	1.23	4.25	8.69	1152
	1/4	0.03	1.29	4.52	9.43	1152
	3/8	0.00	1.33	4.77	9.97	1152
	1/2	0.03	1.36	5.00	10.25	1152
	5/8	0.04	1.43	5.12	10.23	1152
	3/4	0.07	1.51	5.11	10.24	1152
	7/8	0.11	1.55	4.99	9.80	1152
70	1/8	0.03	0.97	3.02	5.83	1152
	1/4	0.00	0.93	3.01	5.19	1152
	3/8	0.00	0.88	2.95	5.45	1152
	1/2	0.01	0.85	3.08	5.56	1152
	5/8	0.04	0.94	3.22	5.66	1152
	3/4	0.06	1.09	3.40	5.60	1152
	7/8	0.06	1.21	3.54	6.99	1152
80	1/8	0.06	0.86	2.91	5.92	1152
	1/4	0.01	0.74	2.56	4.84	1152
	3/8	0.00	0.56	1.86	3.54	1152
	1/2	0.00	0.46	1.71	3.65	1152
	5/8	0.00	0.60	1.99	3.58	1152
	3/4	0.02	0.85	2.77	5.81	1152
	7/8	0.06	1.08	3.44	7.25	1152

ตารางที่ ผ.10 ค่าตัวประกอบการกระแทกที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดสำหรับผิวทางประเภท C

Velocity (m/s)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
5	1/8	0.03	0.58	2.01	6.46	1152
	1/4	0.01	0.61	2.27	7.07	1152
	3/8	0.03	0.62	2.35	7.51	1152
	1/2	0.02	0.65	2.42	7.91	1152
	5/8	0.00	0.68	2.49	7.76	1152
	3/4	0.04	0.73	2.63	7.62	1152
	7/8	0.01	0.75	2.44	7.15	1152
10	1/8	0.04	0.82	2.70	5.58	1152
	1/4	0.00	0.85	2.85	6.13	1152
	3/8	0.01	0.87	3.04	6.89	1152
	1/2	0.01	0.89	3.18	6.73	1152
	5/8	0.00	0.94	3.20	7.14	1152
	3/4	0.00	1.01	3.21	6.78	1152
	7/8	0.06	1.03	3.29	6.38	1152
15	1/8	0.03	0.96	3.72	6.30	1152
	1/4	0.00	0.98	4.17	6.84	1152
	3/8	0.00	1.00	4.37	7.13	1152
	1/2	0.00	1.02	4.51	7.33	1152
	5/8	0.00	1.08	4.56	7.98	1152
	3/4	0.01	1.17	4.61	7.64	1152
	7/8	0.00	1.22	4.60	7.07	1152
20	1/8	0.04	0.93	3.55	8.33	1152
	1/4	0.00	0.94	3.82	9.23	1152
	3/8	0.00	0.97	4.08	10.10	1152
	1/2	0.00	0.99	4.26	11.06	1152
	5/8	0.00	1.07	4.62	10.80	1152
	3/4	0.01	1.18	4.60	10.83	1152
	7/8	0.00	1.24	4.59	11.33	1152
25	1/8	0.06	0.95	3.36	8.24	1152
	1/4	0.02	0.97	3.57	8.67	1152
	3/8	0.00	0.98	3.64	9.32	1152
	1/2	0.02	1.02	3.86	9.47	1152
	5/8	0.00	1.08	3.99	9.52	1152
	3/4	0.00	1.19	4.21	10.22	1152
	7/8	0.00	1.27	4.31	10.79	1152
30	1/8	0.00	1.07	3.77	7.78	1152
	1/4	0.07	1.11	3.90	8.49	1152
	3/8	0.00	1.12	4.20	9.43	1152
	1/2	0.00	1.14	4.38	9.94	1152
	5/8	0.03	1.22	4.52	9.63	1152
	3/4	0.00	1.34	4.66	9.22	1152
	7/8	0.00	1.40	4.58	8.61	1152
35	1/8	0.00	1.21	4.09	7.69	1152
	1/4	0.04	1.26	4.34	8.33	1152
	3/8	0.05	1.28	4.57	8.71	1152
	1/2	0.00	1.30	4.86	9.29	1152
	5/8	0.07	1.41	4.91	9.59	1152
	3/4	0.06	1.55	4.96	9.87	1152
	7/8	0.04	1.62	5.03	10.04	1152
40	1/8	0.00	1.26	4.13	9.94	1152
	1/4	0.00	1.31	4.26	10.64	1152
	3/8	0.02	1.33	4.56	11.39	1152
	1/2	0.00	1.35	4.76	12.01	1152
	5/8	0.05	1.47	4.93	12.34	1152
	3/4	0.11	1.64	4.89	13.03	1152
	7/8	0.00	1.75	4.94	12.68	1152

ตารางที่ ผ.11 ค่าตัวประกอบการกระจายที่คำนวณจากโมเมนต์ตัดสำหรับผิวทางประเภท C

Weight of truck (ton)	Position	Min	Mean	98 th	Max	Number of Data
20	1/8	0.03	0.58	2.01	6.46	1152
	1/4	0.01	0.61	2.27	7.07	1152
	3/8	0.03	0.62	2.35	7.51	1152
	1/2	0.02	0.65	2.42	7.91	1152
	5/8	0.00	0.68	2.49	7.76	1152
	3/4	0.04	0.73	2.63	7.62	1152
	7/8	0.01	0.75	2.44	7.15	1152
25	1/8	0.04	0.82	2.70	5.58	1152
	1/4	0.00	0.85	2.85	6.13	1152
	3/8	0.01	0.87	3.04	6.89	1152
	1/2	0.01	0.89	3.18	6.73	1152
	5/8	0.00	0.94	3.20	7.14	1152
	3/4	0.00	1.01	3.21	6.78	1152
	7/8	0.06	1.03	3.29	6.38	1152
30	1/8	0.03	0.96	3.72	6.30	1152
	1/4	0.00	0.98	4.17	6.84	1152
	3/8	0.00	1.00	4.37	7.13	1152
	1/2	0.00	1.02	4.51	7.33	1152
	5/8	0.00	1.08	4.56	7.98	1152
	3/4	0.01	1.17	4.61	7.64	1152
	7/8	0.00	1.22	4.60	7.07	1152
35	1/8	0.04	0.93	3.55	8.33	1152
	1/4	0.00	0.94	3.82	9.23	1152
	3/8	0.00	0.97	4.08	10.10	1152
	1/2	0.00	0.99	4.26	11.06	1152
	5/8	0.00	1.07	4.62	10.80	1152
	3/4	0.01	1.18	4.60	10.83	1152
	7/8	0.00	1.24	4.59	11.33	1152
40	1/8	0.06	0.95	3.36	8.24	1152
	1/4	0.02	0.97	3.57	8.67	1152
	3/8	0.00	0.98	3.64	9.32	1152
	1/2	0.02	1.02	3.86	9.47	1152
	5/8	0.00	1.08	3.99	9.52	1152
	3/4	0.00	1.19	4.21	10.22	1152
	7/8	0.00	1.27	4.31	10.79	1152
45	1/8	0.00	1.07	3.77	7.78	1152
	1/4	0.07	1.11	3.90	8.49	1152
	3/8	0.00	1.12	4.20	9.43	1152
	1/2	0.00	1.14	4.38	9.94	1152
	5/8	0.03	1.22	4.52	9.63	1152
	3/4	0.00	1.34	4.66	9.22	1152
	7/8	0.00	1.40	4.58	8.61	1152
50	1/8	0.00	1.21	4.09	7.69	1152
	1/4	0.04	1.26	4.34	8.33	1152
	3/8	0.05	1.28	4.57	8.71	1152
	1/2	0.00	1.30	4.86	9.29	1152
	5/8	0.07	1.41	4.91	9.59	1152
	3/4	0.06	1.55	4.96	9.87	1152
	7/8	0.04	1.62	5.03	10.04	1152
55	1/8	0.00	1.26	4.13	9.94	1152
	1/4	0.00	1.31	4.26	10.64	1152
	3/8	0.02	1.33	4.56	11.39	1152
	1/2	0.00	1.35	4.76	12.01	1152
	5/8	0.05	1.47	4.93	12.34	1152
	3/4	0.11	1.64	4.89	13.03	1152
	7/8	0.00	1.75	4.94	12.68	1152

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปานนท์ ลาซโรจน์ เกิดวันที่ 27 มกราคม พ.ศ.2530 มีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอ ร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พ่อและแม่มีอาชีพเป็นข้าราชการครู มีพี่น้อง 2 คนโดยเป็น พี่ชายคนโต ประวัติการศึกษามีดังนี้

- ระดับอนุบาลที่โรงเรียนสกุลดีและโรงเรียนดรุณศึกษา อำเภอ ร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
- ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดพระมหาธาตุ อำเภอเมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช
- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ อำเภอเมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช
- ระดับมัธยมศึกษาปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา เขตปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- ระดับปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ระดับปริญญาโทจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย