



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นของสะพานทางหลวง ชนิดแผ่นพื้นบนคาน

Analysis of Bending Moment in Slab of Slab-on-Beam Highway Bridge

นามผู้วิจัย นายชนกร จงวิลาศลักษณ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมโพธิ วิวิธเกียรติวงศ์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิชัย กิจวัตรเวทย์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจานิชย์, Ph.D.)

กรรมการ

(ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนาลัย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นของสะพานทางหลวง ชนิดแผ่นพื้นบนคาน

Analysis of Bending Moment in Slab of Slab-on-Beam Highway Bridge

โดย

นายธนากร จงวิลาสลักษณ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชนากร จงวิลาสลักษณ์ 2554: การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นของสะพานทางหลวง
ชนิดแผ่นพื้นบนคานา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ปรธานกรรมการที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์สมโพธิ วิวิธเกียรติกุล, Ph.D. 158 หน้า

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามข้อกำหนด
ในมาตรฐานของสมาคมทางหลวงและการขนส่งสหรัฐอเมริกา AASHTO (American Association
of State Highway and Transportation Officials) กำหนดให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน
ขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพานเพียงอย่างเดียว และโมเมนต์ดัดดังกล่าว
เท่ากันตลอดทุกๆ ตำแหน่งในสะพาน งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความยาวของช่วงสะพาน (span
length) ระยะห่างระหว่างคานาที่รองรับพื้นสะพาน (beam spacing) จำนวนคานาที่รองรับพื้น
สะพาน (number of beam) ความหนาของพื้นสะพาน (deck thickness) และระยะห่างจากตอม่อ
สะพานที่มีต่อค่าโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นสะพาน และค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพาน
งานวิจัยกระทำได้โดยวิเคราะห์หาตำแหน่งของล้อรถบรรทุก ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดบวกและลบ
สูงสุดในพื้นสะพานพร้อมกับค่าของโมเมนต์ดัดสูงสุดนั้น โดยพิจารณาพื้นสะพานเป็นแบบจำลอง
โครงสร้างสองมิติ จากนั้นสร้างแบบจำลองสะพานเป็นโครงสร้างสามมิติ แล้ววิเคราะห์หาค่า
โมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานจากตำแหน่งล้อรถบรรทุกข้างต้น เพื่อคำนวณหาความกว้างประ
สิทธิผลของพื้นสะพาน ต่อจากนั้นจึงทำการทดสอบสะพานในสนามตามที่ได้ทำแบบจำลองไว้
แล้วข้างต้นเพื่อศึกษาผลของตัวแปรดังกล่าวที่มีต่อค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดกับนำเสนอสมการคำนวณ
หาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน ผลการวิจัยพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดใน
พื้นสะพานและค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานมากที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างคานารอง
รับพื้นสะพาน, ความหนาของพื้นสะพาน และจำนวนคานารองรับพื้นสะพาน ตามลำดับ ค่า
โมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานตามที่ AASHTO เสนอแนะ ให้ค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จาก
งานวิจัยนี้ 28.32 – 50.39 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ 0.62 - 78.91 เปอร์เซ็นต์
สำหรับสะพานที่มีช่วงยาว 10 – 30 เมตร ระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพาน 1.50 – 2.50
เมตร ความหนาของพื้นสะพาน 0.150 – 0.250 เมตร และจำนวนคานารองรับพื้นสะพาน 4 -10
คานา

Tanakorn Jongvilaslux 2011: Analysis of Bending Moment in Slab of Slab-on-Beam Highway Bridge. Doctor of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Sompothi Vivithkeyoonvong, Ph.D. 158 pages.

According to AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) specification, the bending moments in deck slab of slab beam concrete bridge are depended only on spacing between beams and are equal along the span. This study shows the effects of span length of beam bridge, beam spacing, number of beams, deck slab thickness and distance from pier to bending moment and effective width for bending moment in slab. This research conducted to determine the position of truck load which causes the maximum positive and negative bending moments in slab and their values by using the two dimensional structural bridge model. Then the three dimensional bridge structures were modeled and by using the truck load position from above mentioned to determine the maximum positive and negative bending moments to attain the effective width of slab. Then the experiment on actual bridges which were modeled as the three dimensional structure will be use to study the effect of all parameters. Consequently, the equations for the maximum bending moments in slab were proposed. The study shows that parameters which have the most effect to bending moment and effective width for bending moment in slab are beam spacing, deck slab thickness and number of beams respectively. The maximum positive and negative bending moments according to AASHTO are less and more than bending moment in this study 28.32 – 50.39 % and 0.62 – 78.91 % respectively. The results are for bridges which have span length of 10 – 30 meters, beam spacing of 1.50 – 2.50 meters, deck slab thickness of 0.150 – 0.250 meters and number of beam of 4 – 10 beams.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สมโพธิ วิวิธเกยูรวงศ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความเมตตาช่วยเหลือให้คำปรึกษาและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ ท่านรองศาสตราจารย์ มนต์รี คำชู ที่ได้ให้คำแนะนำในการศึกษาต่อในระดับดุษฎีบัณฑิตที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และให้คำปรึกษาจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อฐิติพงศ์ และคุณแม่สุพิน จงวิลาสลักษณ์ ผู้อบรมเลี้ยงดูสนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้เล่าเรียนศึกษาเต็มกำลังความสามารถ และเป็นกำลังใจอันสูงสุดให้ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนทั้งวิชาการ และคุณธรรมแก่ข้าพเจ้า

ขอบพระคุณเจ้าหน้าที่กรมทางหลวง แขวงการทาง จังหวัดจันทบุรี และเจ้าหน้าที่แขวงการทาง จังหวัดตราด และตำรวจทางหลวง 4 กองกำกับการ 3 ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในการทดลองภาคสนามจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ธนากร จงวิลาสลักษณ์

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ	(17)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
วิธีการ	12
ผลและวิจารณ์	44
สรุป	130
ข้อเสนอแนะ	133
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	134
ภาคผนวก	136
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	158

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 คุณสมบัติของคานรองรับพื้นสะพานตามความยาวช่วงสะพานของAASHTO	19
2 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 10 เมตร	45
3 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 15 เมตร	46
4 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 20 เมตร	47
5 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 25 เมตร	48
6 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 30 เมตร	49
7 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี ความยาวช่วงสะพาน 10 เมตร	57
8 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี ความยาวช่วงสะพาน 15 เมตร	57
9 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี ความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร	58
10 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี ความยาวช่วงสะพาน 25 เมตร	58
11 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี ความยาวช่วงสะพาน 30 เมตร	58
12 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี คานรองรับพื้นสะพานห้าคาน	62
13 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี คานรองรับพื้นสะพานหกคาน	63
14 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี คานรองรับพื้นสะพานแปดคาน	63
15 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มี ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 1.50 เมตร	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
16 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 1.75 เมตร	68
17 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.00 เมตร	68
18 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.25 เมตร	69
19 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.50 เมตร	69
20 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา 0.150 เมตร	73
21 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา 0.175 เมตร	73
22 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา 0.200 เมตร	74
23 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา 0.225 เมตร	74
24 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา 0.250 เมตร	75
25 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานในสนามกับค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจากแบบจำลองสะพานด้วยโปรแกรม SAP สำหรับสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี	89
26 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานในสนามกับค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจากแบบจำลองสะพานด้วยโปรแกรม SAP สำหรับสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตรัง	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
27 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 10 เมตร, 2 ช่องจราจร	115
28 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 10 เมตร, 3 ช่องจราจร	116
29 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 10 เมตร, 4 ช่องจราจร	117
30 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 15 เมตร, 2 ช่องจราจร	118
31 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 15 เมตร, 3 ช่องจราจร	119
32 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 15 เมตร, 4 ช่องจราจร	120
33 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 20 เมตร, 2 ช่องจราจร	121
34 การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 20 เมตร, 3 ช่องจราจร	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
35	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 20 เมตร, 4 ช่องจราจร	123
36	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 25 เมตร, 2 ช่องจราจร	124
37	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 25 เมตร, 3 ช่องจราจร	125
38	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 25 เมตร, 4 ช่องจราจร	126
39	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 30 เมตร, 2 ช่องจราจร	127
40	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 30 เมตร, 3 ช่องจราจร	128
41	การเปรียบเทียบโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานและความกว้างประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์คดงอและลบสูงสุดของสะพานยาว 30 เมตร, 4 ช่องจราจร	129

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อหน่วยความกว้างของสะพาน	5
2 ตำแหน่งที่พิจารณาค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบในพื้นที่สะพาน ที่ระยะห่างจากฐานรองรับคานหรือบริเวณตอม่อ	12
3 การหาค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริงที่กึ่งกลางช่วงคาน	13
4 การหาค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริงที่ตำแหน่งใดๆ	15
5 ลักษณะแถบของสะพานที่ตัดออกมาโดยมีความกว้างเท่ากับ ความกว้างประสิทธิภาพ	15
6 ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริง	16
7 การหาตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด	17
8 การหาตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุด	17
9 รูปแบบของคานคอนกรีตอัดแรงรองรับพื้นสะพาน ตามมาตรฐานของ AASHTO (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)	18
10 ลักษณะคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอแบบที่ IV ที่ใช้ใน โปรแกรม SAP	19
11 พื้นสะพานแบบแผ่นพื้นเปลือกบางแบบสี่จุดรูปสี่เหลี่ยม (four-node quadrilateral shell element)	20
12 การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนพื้นสะพานกับคานในโปรแกรม SAP	21
13 การแบ่งหน้าตัดย่อยของคานรองรับพื้นสะพาน	21
14 แบบจำลองของพื้นสะพาน	22
15 รถบรรทุก HS 20-44 ตามมาตรฐานของ AASHTO	22
16 น้ำหนักกระทำเป็นจุดที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วนพื้นสะพาน	23
17 ภาพสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	24
18 สะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด	25
19 อุปกรณ์อุปกรณ์วัดความเครียด PL-90-11 ที่ใช้ในการวัดค่าการ ยึดตัวของคอนกรีต	25
20 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) KYOWA PCD-300A	26
21 วงจรวัดสะพาน (wheatstone bridge)	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
22	ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ได้พื้นสะพานและตำแหน่งรถบรรทุกที่ระยะห่างจากฐานรองรับ 10 (L/2) เมตร สำหรับโมเมนต์บวกได้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	31
23	ภาพของตำแหน่งรถบรรทุกที่ระยะห่างจากฐานรองรับ 10 (L/2) เมตร สำหรับการทดสอบหาค่าโมเมนต์บวกได้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	32
24	การติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับได้พื้นสะพานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์คดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน	32
25	ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) บนพื้นสะพานและตำแหน่งรถบรรทุกที่ระยะห่างจากฐานรองรับ 10 (L/2) เมตร สำหรับโมเมนต์ลบบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	33
26	การติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับบนพื้นสะพานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์คดลบสูงสุดในพื้นสะพาน	34
27	คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ตลอดความยาวคาน	34
28	ภาพตัดขวางของหน้าตัดคานที่ตำแหน่งต่างๆ ของคานสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	35
29	จุดเชื่อมต่อหน้าตัดของพื้นสะพานกับคานสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ในโปรแกรม SAP	36
30	คานรูปตัวไอของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ตลอดความยาวคาน	37
31	ภาพตัดขวางของหน้าตัดคานที่ตำแหน่งต่างๆ ของคานสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	38
32	จุดเชื่อมต่อหน้าตัดของพื้นสะพานกับคานสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด ในโปรแกรม SAP	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
33 ลักษณะและขนาดของชิ้นส่วนแผ่นพื้นสะพานของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	40
34 การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน กับคานรองรับพื้นสะพานของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	40
35 ลักษณะและขนาดของชิ้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน ของสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด	41
36 ภาพขยายการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน กับคานรองรับพื้นสะพานของสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด	41
37 ขนาดและตำแหน่งของล้อรถบรรทุกสลิปล้อที่ใช้ในการทดสอบ	42
38 ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกสลิปล้อสองคันที่กระทำบนพื้นสะพานสำหรับการหาค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด	43
39 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดิ่งที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.50 เมตร	50
40 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดิ่งที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.50 เมตร	51
41 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดิ่งที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.75 เมตร	51
42 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดิ่งที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.75 เมตร	52
43 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดิ่งที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.00 เมตร	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
44 ตำแหน่งรอบบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.00 เมตร	53
45 ตำแหน่งรอบบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.25 เมตร	53
46 ตำแหน่งรอบบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.25 เมตร	54
47 ตำแหน่งรอบบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.50 เมตร	54
48 ตำแหน่งรอบบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.50 เมตร	55
49 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน	59
50 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน	59
51 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน	61
52 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน	61
53 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
54 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพานที่มี จำนวนคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน	64
55 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพาน แตกต่างกัน	65
56 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพาน แตกต่างกัน	66
57 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีระยะห่าง ระหว่างคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน	70
58 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพานที่มีระยะห่าง ระหว่างคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน	70
59 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับ พื้นสะพานแตกต่างกัน	71
60 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับ พื้นสะพานแตกต่างกัน	72
61 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนา พื้นสะพานแตกต่างกัน	75
62 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนา พื้นสะพานแตกต่างกัน	76
63 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนาพื้นสะพานแตกต่างกัน	77
64 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนาพื้นสะพานแตกต่างกัน	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
65 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 14.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับ โมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	81
66 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์คดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 14.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	81
67 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 12.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับ โมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	82
68 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์คดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	82
69 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับ โมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	83
70 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์คดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	83
71 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับ โมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	84
72 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์คดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	84

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
73 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 14.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	85
74 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 14.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	85
75 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 12.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	86
76 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	86
77 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	87
78 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	87
79 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	88
80 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี	88
81 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กับแบบจำลองสะพาน	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
82 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดกลับสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กับแบบจำลองสะพาน	90
83 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 10.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	93
84 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 10.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	93
85 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	94
86 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	94
87 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 5.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	95
88 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	95
89 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุด ใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	96
90 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
91 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 10.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์ล้นสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	97
92 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดล้นสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 10.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	97
93 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์ล้นสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	98
94 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดล้นสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	98
95 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 5.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์ล้นสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	99
96 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดล้นสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	99
97 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์ล้นสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	100
98 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดล้นสูงสุดบนพื้นสะพานที่ ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด	100
99 กราฟเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดล้นได้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว ในสนาม กับแบบจำลองสะพาน	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
100 กราฟเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว ในสนาม กับแบบจำลองสะพาน	102
101 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานจากสมการ โพลีโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม	106
102 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานจากสมการ โพลีโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม	108
103 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใน พื้นสะพานจากสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม	110
104 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดใน พื้นสะพานจากสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม	111
ภาพผนวกที่	
ก1 ตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน	139
ก2 ตำแหน่งเกิดโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน (แสดงด้วยสีน้ำเงิน) ที่ joint 813 แผ่นพื้นที่ 810	141
ก3 ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน (M22) จากโปรแกรม SAP	142
ง4 สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ความยาวช่วงสะพาน 30 เมตร	149
ง5 สภาพภูมิประเทศใต้สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี มีลักษณะเป็นแม่น้ำ ตลอดช่วงสะพาน	149
ง6 การวางไม้พาดทำเป็นทางเดินเพื่อติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge)	150
ง7 การติดตั้งทางเดินใต้สะพานจนถึงกึ่งกลางสะพาน สำหรับการติดตั้ง เกจวัดความเครียด	150
ง8 การติดตั้งเกจวัดความเครียดใต้สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี	151
ง9 สะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด ความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร	151

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ง10 สภาพภูมิประเทศบริเวณใต้สะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด ช่วงสะพานที่ทำการทดสอบสามารถตั้งนั่งร้านได้	152
ง11 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งแถววัดความเครียดใต้สะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	152
ง12 การติดตั้งแถววัดความเครียดใต้สะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	153
ง13 แถววัดความเครียดใต้พื้นสะพานที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ในทิศทางเดียวกับการจราจร และในทิศขวางการจราจร	153
ง14 การกำหนดตำแหน่งล้อรถ และตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ที่ด้านบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด	154
ง15 การเจียรพื้นผิวคอนกรีตบนพื้นสะพานบริเวณที่จะทำการติดตั้ง แถววัดความเครียดให้เรียบสนิท	154
ง16 การติดตั้งแถววัดความเครียดบนพื้นสะพานในทิศตามแนวการจราจร และทิศขวางการจราจร	155
ง17 รถบรรทุกสิบล้อ 2 คัน บรรทุกน้ำหนักคันละ 25 ตัน ที่ใช้ในการทดสอบ	155
ง18 การปิดการจราจร นำรถเข้าตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด ในพื้นที่สะพาน และดับเครื่องยนต์เพื่อให้นิ่งสนิท	156
ง19 การปล่อยให้รถวิ่งเมื่อวัดได้แต่ละจุด เพื่อไม่เป็นการกีดขวาง การจราจรนานเกินไป	156
ง20 ดำรวจทางหลวงจังหวัดตราด ช่วยอำนวยความสะดวกในการปิดการจราจร เพื่อทำการทดสอบสะพาน	157

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

b_c	=	ค่าความกว้างประสิทธิภาพ (เมตร)
K	=	ค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริง (ตัน/เมตร)
K_{eff}	=	ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริง (ตัน/เมตร)
y_1	=	สัมประสิทธิ์โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน
y_2	=	สัมประสิทธิ์โมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน
y_3	=	ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน (เมตร)
y_4	=	ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน (เมตร)
x_1	=	ความยาวช่วงคาน (เมตร)
x_2	=	จำนวนของคานรองรับพื้นสะพาน
x_3	=	ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน (เมตร)
x_4	=	ความหนาของพื้นสะพาน (เมตร)
x_5	=	ระยะห่างจากตอม่อสะพาน (เมตร)
M_{max}^+	=	ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)
M_{max}^-	=	ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)

การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นของสะพานทางหลวง ชนิดแผ่นพื้นบนคาน

Analysis of Bending Moment in Slab of Slab-on-Beam Highway Bridge

คำนำ

ลักษณะสะพานคอนกรีตในประเทศไทย ส่วนใหญ่มักออกแบบในระบบคานช่วงเดียว ธรรมดา (simply supported beam) วางต่อเนื่องบนคานคอนกรีตรองรับด้วยตอม่อ และมีรูปแบบมาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดโดยกรมทางหลวง สะพานแต่ละชนิดนั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความยาวของช่วงสะพาน สำหรับสะพานชนิดแผ่นพื้นและคานคอนกรีต (Slab and Beam Bridge) นอกจากรูปร่างและลักษณะจะขึ้นอยู่กับความยาวของช่วงสะพานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับจำนวนมากน้อยของช่องทางการจราจร ระยะห่างระหว่างคาน และความหนาของพื้นสะพานเป็นต้น ความแตกต่างของรูปแบบเหล่านี้ย่อมส่งผลถึงค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานให้มีค่าแตกต่างกันไป

ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อใช้ในการหาปริมาณเหล็กเสริมในพื้นสะพานของประเทศไทยนั้น อ้างอิงตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งส่วนใหญ่ยึดแนวทางข้อกำหนดตามมาตรฐานของสมาคมทางหลวง และการขนส่งสหรัฐอเมริกา AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) โดย AASHTO เสนอสูตรในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพาน ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างคานเพียงอย่างเดียว อีกทั้งเสนอให้ใช้ค่าโมเมนต์ดัดจากสูตรดังกล่าวคงที่เท่ากันหมดทุกๆ ตำแหน่งไม่ว่าจะอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานหรือบริเวณใกล้ๆ กับตอม่อกลางสะพาน (pier) หรือตอม่อปลายสะพาน (abutment) ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่าค่าโมเมนต์ดัดควรจะแตกต่างกัน

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นสะพานชนิดแผ่นพื้นและคานนั้น มีหลักการพื้นฐานคือ พิจารณาแผ่นพื้นในทิศตามการจราจรที่ความกว้างค่าหนึ่ง เรียกว่าค่าความกว้างประสิทธิภาพ (Effective Width) จากนั้นจึงพิจารณาให้แผ่นพื้นดังกล่าวเป็นเสมือนกับคานต่อเนื่องบนฐานรองรับ ซึ่งก็คือคานรองรับพื้นสะพานนั่นเอง สำหรับ AASHTO ค่าความกว้างประสิทธิภาพนี้มีการเสนอให้ใช้ค่าคงที่เพียงค่าเดียว ไม่ว่าพื้นสะพานจะอยู่ที่ตำแหน่งใดๆ ก็ตาม และขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างคานรองรับเพียงอย่างเดียวอีกเช่นกัน จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาว่าน่าจะมี

ตัวแปรอื่นๆอีกที่ส่งผลต่อค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานและค่าความกว้างประสิทธิผล นอกเหนือไปจากระยะห่างระหว่างคานเพียงอย่างเดียว

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพาน และค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับสะพานชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานคอนกรีตอัดแรง การวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานและค่าความกว้างประสิทธิผลกระทำที่ตำแหน่งต่างๆ ทั่วทั้งสะพาน โดยเริ่มจากตำแหน่งใกล้ตอม่อปลายสะพาน ไปจนถึงบริเวณกึ่งกลางของช่วงสะพาน ด้วยโปรแกรม CONTBEAM ที่พัฒนาขึ้นมา (in-house program) โดยพิจารณาแผ่นพื้นสะพานเป็นคานต่อเนื่องวางบนฐานรองรับยืดหยุ่น (Beam on Elastic Supports) ส่วนฐานรองรับยืดหยุ่นนั้นพิจารณาจากความแข็งแกร่งดัด (flexural stiffness) ของคานรองรับสะพานนั่นเอง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CONTBEAM นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม SAP พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องกับค่าที่วัดได้จากสะพานจริง และนำเสนอสูตรอย่างง่ายสำหรับนำไปใช้คำนวณออกแบบต่อไป

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพาน และค่าความกว้างประสิทธิภาพ ผลของพื้นสะพานสำหรับสะพานชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานคอนกรีตอัดแรง กล่าวคือ ค่าความยาวของช่วงสะพาน (span length) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับพื้นสะพาน (beam spacing) จำนวนคานที่รองรับพื้นสะพาน (number of beam) และความหนาของพื้นสะพาน (deck thickness)
2. เสนอสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัด และค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวของสะพาน

ขอบเขตการวิจัย

ลักษณะสะพานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นสะพานคอนกรีต โดยที่พื้นสะพานเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก หล่อในที่บนคานสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I-section) เพื่อใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุดในแผ่นพื้นสะพานที่ตำแหน่งต่างๆ และสะพานในสนามที่ใช้ในการทดสอบเป็นสะพานของกรมทางหลวง โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. คานที่รองรับพื้นสะพานเป็นคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I-section)
2. สะพานมี 2, 3, 4 ช่องจราจร
3. ความยาวของช่วงคานสะพาน 10, 15, 20, 25, 30 เมตร
4. ระยะห่างระหว่างคานรับพื้นสะพาน 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50 เมตร
5. ความหนาของพื้นสะพาน 15.00, 17.50, 20.00, 22.50, 25.00 เซนติเมตร
6. ทดสอบสะพานสองตัวอย่างได้แก่

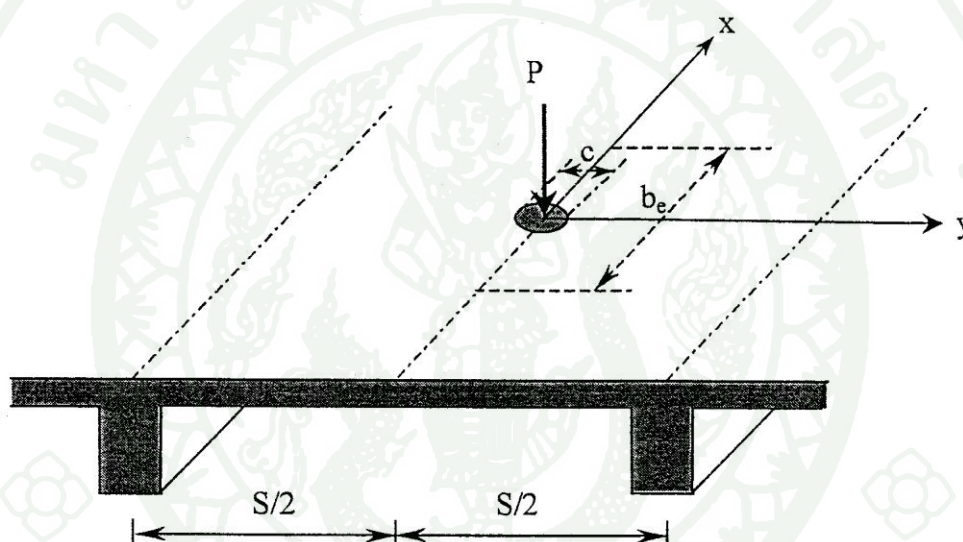
6.1 สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี มีสองช่องจราจร ความยาวช่วงคันสะพาน 30 เมตร จำนวนคันรับพื้นสะพาน 6 คัน ระยะห่างระหว่างคันรับพื้นสะพาน 2.20 เมตร ความหนาของพื้นสะพาน 18 เซนติเมตร

6.2 สะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด มีสองช่องจราจร ความยาวช่วงคันสะพาน 20 เมตร จำนวนคันรับพื้นสะพาน 6 คัน ระยะห่างระหว่างคันรับพื้นสะพาน 2.20 เมตร ความหนาของพื้นสะพาน 18 เซนติเมตร

6.3 รถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบเป็นรถบรรทุกสิบล้อที่ใช้ในประเทศไทยน้ำหนักบรรทุก 25 ตัน

การตรวจเอกสาร

Westergaard (1930) เป็นผู้บุกเบิกในการนำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าความเค้นในพื้นที่สะพานที่มีน้ำหนักกดเนื่องจากล้อรถ ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นมาตรฐานในข้อกำหนดการออกแบบสะพานของหลายๆ ประเทศและเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับวิศวกรรมด้านสะพานในการคำนวณหาค่าความเค้นในพื้นที่สะพาน โดยที่สมมติให้แรงกดของล้อรถมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ล้อกดลงพื้นถนน โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่วงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ “c” และพัฒนาสูตรสำหรับคำนวณหาค่าโมเมนต์สูงสุดต่อหน่วยความกว้างของพื้นสะพานดังแสดงข้างล่าง



ภาพที่ 1 การคำนวณหาค่าโมเมนต์คดสูงสุดต่อหน่วยความกว้างของสะพาน

$$M_{\max} = \frac{PS}{b_e}$$

$M_{\max}$ = ค่าโมเมนต์สูงสุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของพื้น

P = น้ำหนักที่กระทำที่จุดกึ่งกลางของช่วงพื้น

S = ช่วงห่างระหว่างคานที่รองรับพื้นสะพาน

b_e = ค่าความกว้างประสิทธิผล (effective width) ของพื้น

$$= 0.58S + 2c$$

อย่างไรก็ตามสูตรที่เสนอโดย Westergaard นั้นยังไม่ได้คำนึงถึงการโค้งตัวของคานที่รองรับพื้นสะพานซึ่งในความเป็นจริงแล้วการโค้งตัวของคานนั้นจะทำให้พื้นมีการโค้งตัวเพิ่ม ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่เสนอนั้นอาจคลาดเคลื่อนไปได้

Firmage and Chiu (1961) ได้ทำการศึกษาหา เส้นอิทธิพล (influence line) สำหรับคานต่อเนื่องบนฐานรองรับที่ยึดหย่อนโดยวิธี ห้าโมเมนต์ (Five-Moment-Equation) ซึ่งวิธีการนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้กับพื้นสะพานเมื่อพิจารณาตัดพื้นสะพานเป็นแถบ (strip) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับการจราจรให้เป็นคานต่อเนื่องบนฐานรองรับที่ยึดหย่อนซึ่งก็คือคานที่รองรับพื้นสะพาน วิธีการนี้จึงเป็นการรวมผลของการโค้งตัวของคานรองรับพื้นสะพานที่มีต่อพื้นสะพานด้วยนั่นเอง และได้นำเสนอตารางและ กราฟสำหรับคานต่อเนื่องบนฐานรองรับที่ยึดหย่อนซึ่งฐานรองรับมีค่าเลขจำนวนสถิติเฟนส ($W = \frac{6EIK}{L^3}$) อยู่ในช่วง 0 – 500 และจำนวนช่วงคานอยู่ระหว่างสองถึง 12 ช่วง ผลของการศึกษาพบว่า การโค้งตัวของคานรองรับพื้นสะพานส่งผลชัดเจนต่อพื้นสะพานทำให้ค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานแตกต่างจากกรณีที่ไม่พิจารณาการโค้งตัวของคาน

Wilson (1974) ได้ทำการวิจัยโดยวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดของคานที่บริเวณจุด รองรับยึดหย่อนโดยกำหนดรายละเอียดต่างๆ ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น นั่นคือ กำหนดให้ความยาวของคานต่อเนื่องในแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกัน และมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกัน อีกทั้งค่าสถิติเฟนสของสปริงของฐานรองรับยึดหย่อนมีค่าที่ไม่เท่ากัน

ในปี ค.ศ. 1970 Ontario Highway Bridge Design Code ได้กำหนดให้ ปริมาณของเหล็กเสริมเพื่อรับโมเมนต์ทั้งบวกและ ลบ จะต้องไม่น้อยกว่า 0.3 เปอร์เซ็นต์ ของหน้าตัดของพื้น ทั้งในแนวนานกับแนวทางเดินรถ และตั้งฉากกับแนวทางเดินรถ ซึ่งทำให้สามารถประหยัดเหล็กเสริมไปได้มาก ซึ่งวิธีการนี้ AASHTO ก็ได้นำมารวมไว้ในข้อกำหนดสำหรับสะพานทางหลวงใน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications ปี1994 ด้วย อย่างไรก็ตามเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กเสริมในสะพานตามวิธีของ AASHTO ยังให้ค่าโมเมนต์ลบมากเกินไป เป็นผลให้เปลืองเหล็กเสริมบนมากเกินความจำเป็น เพราะจากการศึกษาพบว่า ค่าโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเทียบกับโมเมนต์บวกที่เกิดขึ้นที่ด้านล่างของแผ่นพื้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการโค้งตัวของคานรับพื้นนั่นเอง ด้วยเหตุนี้เอง จึงสามารถที่จะลดปริมาณเหล็กเสริมด้านโมเมนต์ลบลงได้ ทำให้ประหยัดราคาก่อสร้างอีกทั้งยังสามารถลดปัญหาทางด้านการซ่อมบำรุง ในกรณีที่

ผิวทางเกิดการแตกร้าว ทำให้ความชื้นสามารถแทรกตัวลงไปใ้เนื้อคอนกรีตและกัดกร่อนตัวเหล็กเสริม

Ioannides (1985) ทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้นในพื้นที่สะพาน ตามสูตรที่เสนอโดย Westergaard โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ในกรณีที่พื้นสะพานอยู่ที่ตำแหน่งขอบนอก หรือบริเวณหัวมุมสะพานสูตรที่เสนอนั้นให้ค่าที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงได้มีการนำเสนอสูตรในการคำนวณใหม่ โดยเฉพาะที่พื้นสะพานบริเวณขอบมุมสะพาน

Mohamad (1988) ศึกษาเรื่องการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรบน คานคอนกรีต และคานเหล็กโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ได้พบว่า การกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรบนคานคอนกรีต และคานเหล็กที่เสนอโดย AASHTO ให้ค่าที่ไม่ถูกต้องโดยเฉพาะสะพานที่มีช่วงสั้น และช่วงยาวปานกลาง และผลการวิเคราะห์ยังสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลมากต่อความไม่ถูกต้องนี้คือความยาวช่วงคาน (span length) และ ระยะห่างระหว่างคานหลัก (girder spacing)

AASHTO (1996) ได้เสนอสูตรสำหรับหาค่าโมเมนต์ดัดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของพื้นสำหรับคำนวณหาเหล็กเสริมในแนวทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของการจราจรค่าโมเมนต์ดัดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของพื้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M = \frac{(S + 2)}{32} P_{20}$$

เมื่อ

S = ระยะห่างประสิทธิผลระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน (ฟุต)

P_{20} = 12,000 ปอนด์ สำหรับ H15 และ HS15

= 16,000 ปอนด์ สำหรับ H20 และ HS20

สำหรับพื้นที่ต่อเนื่องที่มีช่วงต่อเนื่องตั้งแต่สามช่วงขึ้นไปให้ใช้ค่าตัวคูณเพื่อลดค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 0.8 สำหรับทั้งโมเมนต์บวก และโมเมนต์ลบ

Petrou (1996) ทำการศึกษาพฤติกรรมของพื้นสะพานภายใต้น้ำหนักกระทำเป็นจุดแบบสถิตย์ (statically concentrated load) บนโครงสร้างสะพานแบบข้อส่วนด้วยมาตราส่วน 1/6.6 สะพานที่ทดสอบมีความยาวของช่วงสะพาน 15.24 เมตร มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพานสี่คานวาง

เรียงกันในแนวเดียวกับทิศทางของการจราจรและแบ่งช่องทางจราจรออกเป็น สามช่องทางซึ่งก็คือ ช่องว่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพาน ช่องว่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพานทั้งสามช่องนั้นจะ วางพื้นสะพานคอนกรีตที่มีความหนา 21.6 เซนติเมตร และเสริมเหล็กตามข้อเสนอของ AASHTO รูปแบบของพื้นสะพานในการทดสอบแบ่งออกเป็นสามแบบคือ แบบที่หนึ่งพื้นสะพานคอนกรีตที่ วางเต็มทั้งสามช่องทางจราจร แบบที่สองพื้นสะพานคอนกรีตที่วางอยู่บนช่องจราจรช่องกลางเพียง ช่องเดียว โดยช่องจราจรทางซ้ายและทางขวาไม่มีพื้นสะพาน แบบที่สามแถบพื้นคอนกรีตกว้าง 67.3 เซนติเมตร วางพาดอยู่บนคันรองรับพื้นสะพานในช่องทางจราจรช่องริมเพียงช่องเดียว พื้น สะพานในแบบที่สามนี้พิจารณาพื้นเป็นเหมือนกับคันในทิศทางตามขวางการจราจรตามแนวคิดใน การออกแบบพื้นสะพานตามข้อกำหนดของ AASHTO โดยที่พื้นสะพานทั้งสามแบบมีความหนา เท่ากัน การทดสอบกระทำโดยการเพิ่มน้ำหนักกระทำขึ้นเรื่อยๆ จนพื้นสะพานเกิดการวิบัติ ผลที่ได้ พบว่า พื้นสะพานในแบบที่สาม และพื้นสะพานในแบบที่สองวิบัติในแบบการคด แต่สะพานใน แบบที่หนึ่งวิบัติในแบบเจาะทะลุ พื้นสะพานในแบบที่หนึ่งรับน้ำหนักได้มากกว่าพื้นสะพานใน แบบที่สาม ตั้งแต่ 5-10 เท่า แสดงให้เห็นว่า พื้นสะพานในแบบที่หนึ่งที่วางพื้นเต็มทั้งสามช่อง สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าน้ำหนักที่ออกแบบ และรูปแบบของการวิบัตินั้นไม่ได้วิบัติ ในแบบการคด

CAO (1997) พิจารณาผลของการโค้งตัวที่แตกต่างกันของคันรองรับพื้นสะพาน โดยที่ คันรองรับพื้นสะพานตัวริมย่อมมีการโค้งตัวน้อยกว่า คันรองรับพื้นสะพานที่อยู่บริเวณกลาง สะพาน ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดกลับในพื้นที่สะพานมีค่าน้อยลงกว่าที่เสนอตามข้อกำหนดของ AASHTO และได้เสนอสูตรสำหรับการหาค่าโมเมนต์ดัดกลับในพื้นที่สะพาน ที่รวมผลอันเนื่องมาจากการโค้งตัว ของ คันรองรับพื้นสะพานโดยอาศัยพื้นฐานของทฤษฎีแผ่นบาง (Plate Theory) และใช้ทฤษฎีการ ทับซ้อน (superposition theorem) โดยการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในแผ่นพื้นเนื่องจากน้ำหนัก บรรทุก รวมทั้งเนื่องจากผลการโค้งตัวของคันหลักที่รองรับพื้นสะพาน โดยเป็นสูตรวิเคราะห์ สำเร็จรูป (analytical close form solution) เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้โดยสะดวก และได้ทดสอบ เปรียบเทียบความถูกต้องของสูตรที่เสนอกับสะพานในสนามซึ่งสามารถแสดงสูตรได้ดังนี้

$$M_t = M_1 + K_d \times M_o$$

เมื่อ M_t = ค่าโมเมนต์ดัดกลับมากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

M_1 = ค่าโมเมนต์ดัดกลับสูงสุดที่ไม่ได้พิจารณาการโค้งตัวของคันรองรับพื้นสะพาน

$$M_1 = K_1 P$$

โดยที่ $K_1 = -\frac{S}{L} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} K_m$

$$K_m = \sinh \frac{m\pi S}{2L} \left/ \left\{ \cosh^2 \frac{m\pi S}{2L} \left[\frac{m\pi S}{2L} \left(\tanh^2 \frac{m\pi S}{2L} + \coth^2 \frac{m\pi S}{2L} \right) - \frac{m\pi S}{L} - \tanh \frac{m\pi S}{2L} - \coth \frac{m\pi S}{2L} \right] \right\} \right.$$

S = ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน

L = ความยาวของช่วงสะพาน

P = น้ำหนักกระทำเป็นแบบจุด

$$K_d = 0.2378 K_{d1} K_{d2} \left(\frac{L}{S} \right)^2 \sqrt{\frac{D_s}{D_y}}$$

$$K_{d1} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^3} \sin^2 \frac{m\pi d}{L} e^{-m\pi\alpha S/2L} \left[\left(\frac{1}{\alpha} \cos \frac{m\pi\beta S}{2L} + \frac{1}{\beta} \sin \frac{m\pi\beta S}{2L} \right) - \left(\frac{1}{\alpha} \cos \frac{3m\pi\beta S}{2L} + \frac{1}{\beta} \sin \frac{3m\pi\beta S}{2L} \right) e^{-m\pi\alpha S/L} \right]$$

$$K_{d2} = \left[(1 + \nu) \ln \frac{8S}{\pi c_1} + 1 \right] \left/ \left[(1 + \nu) \ln \frac{4S}{\pi c_1} + 1 \right] \right.$$

$$c_1 = 2(\sqrt{0.4d_1^2 + t^2} - 0.675t)$$

เมื่อ

d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของพื้นที่วงกลมที่กำหนดให้เป็นบริเวณที่ล้อรถกดบนถนน

d = ระยะห่างของน้ำหนัก P ที่ห่างจากฐานรองรับคานรองรับพื้นสะพาน

t = ความหนาของพื้นสะพาน

ν = อัตราส่วนค่าปัวซอง

M_o = ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานกรณีที่ไม่คิดการโก่งตัวของคานรองรับพื้น สะพาน

$$M_o = \left\{ \left[(1 + \nu) \ln \frac{4S}{\pi c_1} + 1 \right] / 4\pi \right\} P$$

อย่างไรก็ดีจากสูตรที่เสนอดังกล่าว การนำไปใช้จะต้องมีความเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่มาใช้ในการวิเคราะห์เป็นอย่างดีเพื่อจะได้เข้าใจในตัวแปรแต่ละตัวที่ใช้ในสูตร จึงทำให้มีความซับซ้อนและยากต่อการนำไปใช้งาน

ศุภวุฒิ และ สมโพธิ์ (1999) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CONTBEAM สำหรับหาเส้นอิทธิพลสำหรับระยะโก่ง (deflection) มุมหมุน (rotation) แรงเฉือน (shearing force) โมเมนต์ดัด (bending moment) และแรงปฏิกิริยา (reaction) ของคานต่อเนื่องตั้งแต่ 2 ถึง 12 ช่วงคานบนฐานรองรับที่ยืดหยุ่นได้ (elastic support) ในแนวนานกับแรงปฏิกิริยา โดยมีค่าคงที่ของสปริงที่ฐานรองรับไม่เท่ากัน และคานมีความยาวช่วงคาน โมดูลัสยืดหยุ่นและโมเมนต์ความเฉื่อยของคานแต่ละช่วงคานไม่เท่ากันโดยวิธี สติฟเนสโดยตรง (direct stiffness) พบว่าการวิเคราะห์พื้นสะพานเป็นคานต่อเนื่องโดยกำหนดให้คานรองรับพื้นสะพานเป็นฐานรองรับที่ทรุดตัว ทำให้ค่าพิกัดสูงสุดของระยะโก่งที่กึ่งกลางช่วงพื้นสะพาน มุมหมุนที่กึ่งกลางช่วงคานและที่ฐานรองรับ โมเมนต์ดัดบวกที่กึ่งกลางช่วงคาน มีค่ามากกว่าการวิเคราะห์โดยพิจารณาคานรองรับพื้นสะพานเป็นฐานรองรับที่ไม่ทรุดตัว ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบที่ฐานรองรับ มีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ฐานรองรับไม่ทรุดตัว และจำนวนช่วงคานมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าพิกัดของเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดสำหรับค่าตัวประกอบความแข็งแกร่ง ($W = \frac{6EIK}{L^3}$) เท่ากับ 0, 1.326, 2.5, และ 25 คือ 7, 8, 10 และ 12 ช่วงคานตามลำดับ

Tangwongchai (2003) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัด (bending moment) ของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่คำนวณได้จากวิธีวิเคราะห์คานที่มีฐานรองรับแบบยืดหยุ่น (Beam on Elastic Supports) กับค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนดของ American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) ผลการศึกษาพบว่า จำนวนช่องทางจราจร (traffic lane) ความยาวของช่วงคาน (span length of supporting beam) และระยะห่างระหว่างคานที่รองรับพื้นสะพาน (spacing of supporting beam) ตลอดจนความหนาของพื้นสะพาน (deck slab thickness) ล้วนมีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดในพื้นที่ทั้งสิ้น ค่าโมเมนต์ดัดบวกสำหรับพื้นสะพานบนคานคอนกรีตอัดแรง (slab on prestressed concrete beam) ที่มีช่วงคานยาว 30 เมตร ระยะห่างระหว่างคาน 2.25 เมตร และจำนวนช่องทางจราจร 2 ช่องทาง มีค่ามากกว่าที่ได้จากข้อกำหนดของ AASHTO 17.28% และ 14.28% สำหรับพื้นหนา 0.175 เมตร และ 0.20 เมตร ตามลำดับ ส่วนค่าโมเมนต์ลบมีค่าน้อยกว่าข้อกำหนดดังกล่าว 54.94% และ 57.00% สำหรับพื้นหนา 0.175 เมตร และ 0.20 เมตร ตามลำดับ

Park and Kang (2003) ใช้วิธีมุมลาดและการโก่งตัวสำหรับแผ่นบาง(slope deflection for plate) และวิเคราะห์แบบฮาร์โมนิก (harmonic analysis) เพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดในพื้น โดยรวมผลของการโก่งตัวของคานรองรับพื้นไว้ด้วยพบว่า ค่าโมเมนต์ดัดลบในพื้นที่มีค่าน้อย ลง ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดบวกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแนวความคิดที่ให้ออกแบบค่าโมเมนต์ดัดบวกและค่าโมเมนต์ดัดลบในพื้นที่สะพานด้วยค่าเดียวกันและมีค่าคงที่ และผลที่ได้จากการทดสอบกับสะพานตัวอย่างในห้องทดลอง พบว่าค่าโมเมนต์ลบที่ได้ในกรณีที่คานรองรับมีการโก่งตัว มีค่าน้อยกว่ากรณีที่คานรองรับไม่มีการโก่งตัวถึง 50 %

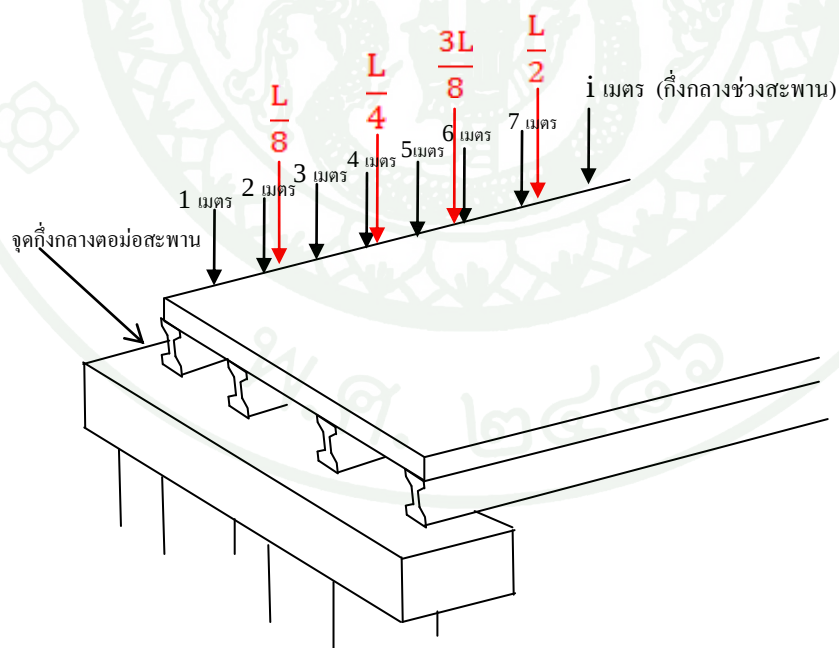
Yousif and Hindi (2006) ศึกษาการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกตามตำแหน่งต่างๆ บนสะพาน เพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในพื้นที่สะพาน เปรียบเทียบกับค่าตัวคูณประกอบการกระจายของโมเมนต์ (moment distribution factor) ที่เสนอแนะโดย AASHTO-LRFD (2004) โดยข้อเสนอแนะดังกล่าวของ AASHTO ได้ใช้กันมาเป็นเวลานานกว่า 50 ปี งานวิจัยพิจารณาคำแนะนำรถที่เป็นน้ำหนักบรรทุกจร โดยเริ่มจากการวางตำแหน่งรถที่ตำแหน่งต่างๆ ในทิศทางตามแนวทางการจราจร เพื่อหาตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด เมื่อได้ตำแหน่งในทิศทางตามแนวทางการจราจร แล้วจึงค่อยขยับรถเลื่อนไปในแนวทางที่ขวางกับการจราจร เพื่อหาตำแหน่งสูงสุดที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดอีกทีเพื่อหาตรวจสอบความเป็นไปได้ในทุกๆ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นที่สะพาน การคำนวณใช้การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP โดยพิจารณาพื้นเป็นชิ้นส่วนเปลือกบางแบบ 4 จุด และให้คานรองรับพื้นสะพานเป็นโครงสร้างสามมิติ ผลที่ได้พบว่า ข้อเสนอแนะของ AASHTO นั้นครอบคลุมสำหรับโครงสร้างทุกๆ แบบ ที่มีค่าช่วงความยาวของสะพาน ความหนาของพื้นสะพาน ระยะห่างระหว่างคาน แตกต่างกัน โดยที่รูปแบบของสะพานนั้นเป็นไปตามที่เสนอแนะของ AASHTO หรืออีกนัยหนึ่งคือ ค่าที่เสนอแนะนั้นให้ค่าในด้านที่ปลอดภัยนั่นเอง

วิธีการ

วิธีการวิจัยครั้งนี้สามารถลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. การกำหนดตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

ใช้วิธีสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) จากโปรแกรม CONTBEAM ที่พัฒนาขึ้นมาโดย ศุภวุฒิ และ สมโพธิ์ (1999) เพื่อกำหนดตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน และค่าความกว้างประสิทธิผลที่เหมาะสมสำหรับตำแหน่งต่างๆ บนสะพาน การคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานที่ตำแหน่งตามความยาวของช่วงสะพาน (Longitudinal Direction) หรือตามทิศทางจราจร โดยกำหนดเป็นค่าระยะทางที่ห่างจากฐานรองรับของคาน หรือบริเวณตอม่อ โดยเริ่มตั้งแต่ว่าตำแหน่งหนึ่งเมตรห่างจากฐานรองรับ แล้วเพิ่มระยะห่างขึ้นทีละหนึ่งเมตร จนกระทั่งถึงจุดกึ่งกลางของคานรองรับพื้นสะพาน และรวมถึงตำแหน่งที่มีระยะห่างจากฐานรองรับเป็นระยะ $L/8$, $L/4$, $3L/8$ และตำแหน่ง $L/2$ หรือที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสะพานโดยที่ L คือความยาวของช่วงสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 2

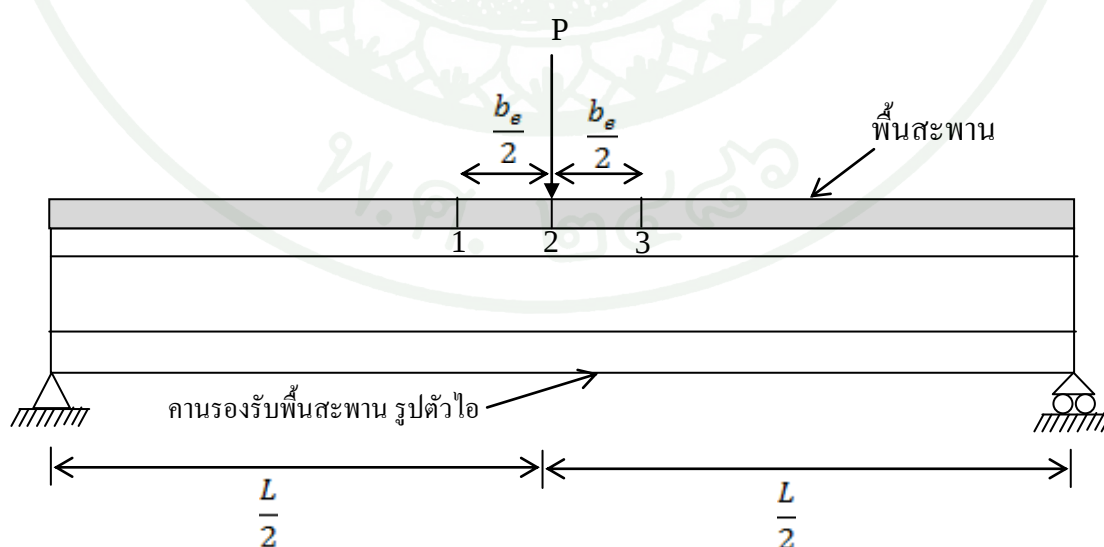


ภาพที่ 2 ตำแหน่งที่พิจารณาค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบในพื้นที่สะพานที่ระยะห่างจากฐานรองรับคานหรือบริเวณตอม่อ

ณ ตำแหน่งที่ห่างจากฐานรองรับของคานาค่าหนึ่ง กำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ i เมตร ที่ตำแหน่งนี้จะตัดพื้นสะพานออกเป็นแถบ (strip) โดยตำแหน่ง i จะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของแถบนี้ออกดี ค่าความกว้างของแถบสะพานที่ตัดออกมานี้ กำหนดให้เรียกชื่อว่า ค่าความกว้างประสิทธิผล (effective width, b_e) แถบของสะพานที่ตัดออกมาจะเป็นแถบที่อยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการจราจรของรถ (transverse direction) ในการคำนวณขั้นแรกนั้น ค่าความกว้างของแถบลักษณะจะเป็นค่าที่คาดการณ (trial) มีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ ตั้งแต่ 1 – 3 เมตร โดยบริเวณที่อยู่ใกล้กับตอม่อจะมีค่าความกว้างประสิทธิผลน้อยกว่าบริเวณกลางสะพาน ซึ่งค่าความกว้างประสิทธิผลนี้ b_e จะนำมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแถบพื้นสะพานที่ตัดออกมาโดยคิดว่าแถบพื้นสะพานที่ตัดออกมานั้นเป็นเสมือนกับคานาตัวหนึ่งที่มีความลึกของคานาเท่ากับความหนาของพื้นสะพาน และมีความกว้างของคานาเท่ากับค่าความกว้างประสิทธิผล b_e

ค่าคงที่ยืดหยุ่นของสปริง (elastic spring constant, K)

ค่าคงที่ยืดหยุ่นของสปริง K คำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับการโก่งตัวของคานารองรับพื้นสะพาน เช่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานา ค่าเฉลี่ยของค่า K พิจารณาจากค่าการโก่งตัวของคานารองรับพื้นสะพานที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และบริเวณริมทั้งสองข้างของความกว้างประสิทธิผลดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การหาค่าคงที่ยืดหยุ่นของสปริงที่กึ่งกลางช่วงคานา

การคำนวณหาค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริง K_2 ที่จุดกึ่งกลาง ทำโดยใช้น้ำหนักหนึ่งหน่วยกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างประสิทธิผล ค่าการโก่งตัวของคานสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

$$d_2 = \frac{L^3}{48EI} \quad (1)$$

เนื่องจากค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริงจะมีค่าเท่ากับส่วนกลับของค่าการโก่งตัวของคาน ดังนั้น

$$K_2 = \frac{1}{d_2} = \frac{48EI}{L^3} \quad (2)$$

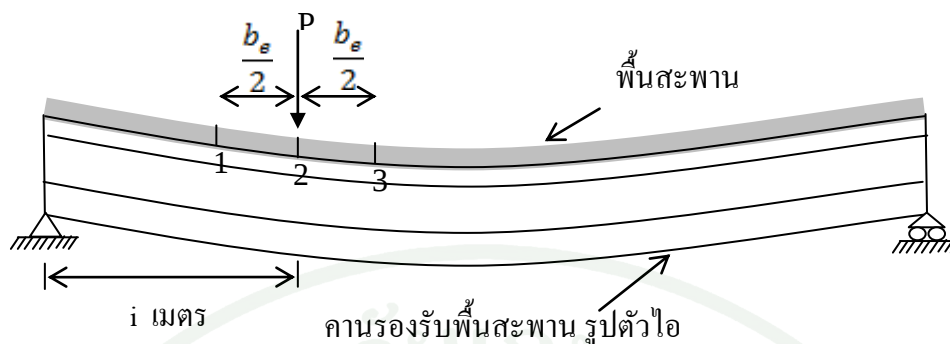
และค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริง K_1 และ K_3 ที่บริเวณริมทั้งสองด้านของความกว้างประสิทธิผลสามารถคำนวณดังนี้

$$K_1 = K_3 = \frac{24EI}{b_e \left[\frac{3L^2}{4} - \frac{b_e^2}{4} \right]} = \frac{96EI}{b_e [3L^2 - b_e^2]} \quad (3)$$

จากค่า K_1 , K_2 และ ค่า K_3 สามารถหาค่าคงที่ยึดหยุ่นของสปริงเฉลี่ย K_{ave} ได้ดังนี้

$$K_{ave} = \frac{(K_1 + K_2 + K_3)}{3} \quad (4)$$

ในกรณีที่ตำแหน่งที่สนใจอยู่ห่างจากฐานรองรับคานเป็นระยะใดๆ หรือเป็นระยะ i เมตรจากฐานรองรับ ค่าการโก่งตัวที่ตำแหน่ง 1 และตำแหน่งที่ 3 จะไม่เท่ากัน ทำให้ค่า K_1 และค่า K_3 มีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในภาพที่ 4

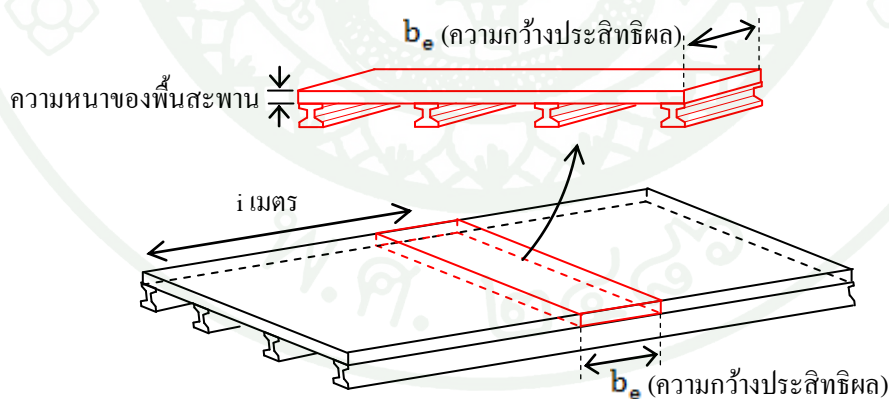


ภาพที่ 4 การหาค่าคงที่ที่ยึดหยุ่นของสปริงที่ตำแหน่งใดๆ

แต่จากการทดลองพบว่า ค่า K_{ave} ของทั้งสามตำแหน่งที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่า K_2 ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างประสิทธิผลมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า K_2 เป็นค่า K_{ave}

พื้นสะพานประสิทธิผล (effective slab)

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นสะพานประสิทธิผล พิจารณาจากแถบพื้นสะพานที่ตัดออกมา โดยมีความกว้างเท่ากับค่าความกว้างประสิทธิผลดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะแถบของสะพานที่ตัดออกมาโดยมีความกว้างเท่ากับความกว้างประสิทธิผล

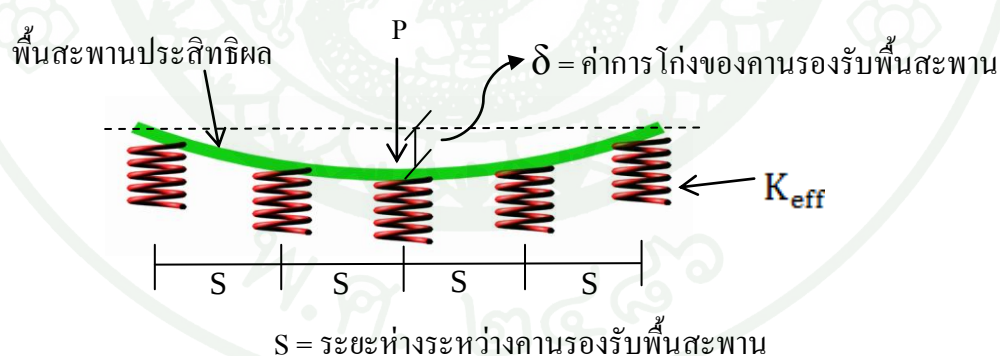
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแถบพื้น

$$I = \frac{1}{12} b_e d^3 \quad (5)$$

ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริง (effective spring constants, K_{eff})

ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริง K_{eff} คำนวณมาจาก ค่าคงที่ยืดหยุ่นของสปริง ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นสะพานประสิทธิภาพ (moment of inertia of effective slab) และระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน โดยการใส่แรงหนึ่งหน่วยกระทำบนพื้นสะพานที่มีฐานรองรับยืดหยุ่นที่มีค่าความแข็งเกร็งเป็นค่าคงที่ยืดหยุ่นของสปริง เพื่อคำนวณการโก่งตัว (δ) ที่ตำแหน่งแรงกระทำดังแสดงในภาพที่ 6 และค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริงมีค่าเท่ากับส่วนกลับของการทรุดตัวของฐานรองรับดังนี้

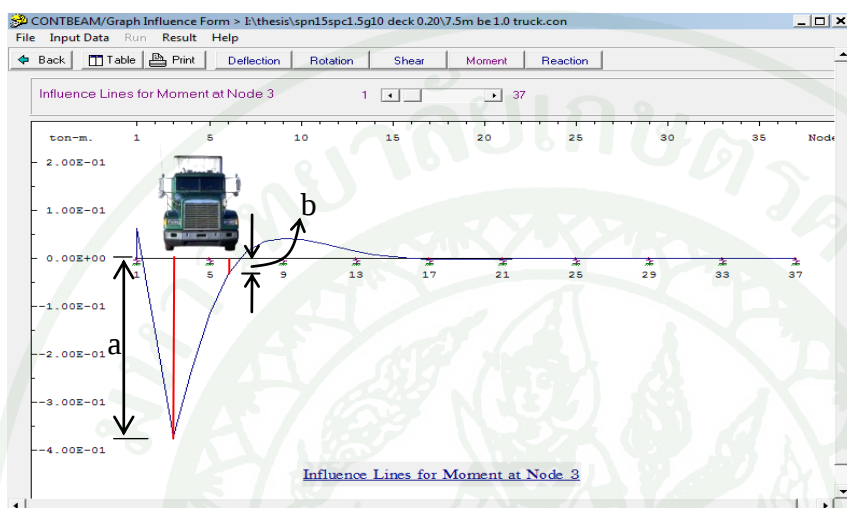
$$K_{eff} = \frac{1}{\delta} \quad (6)$$



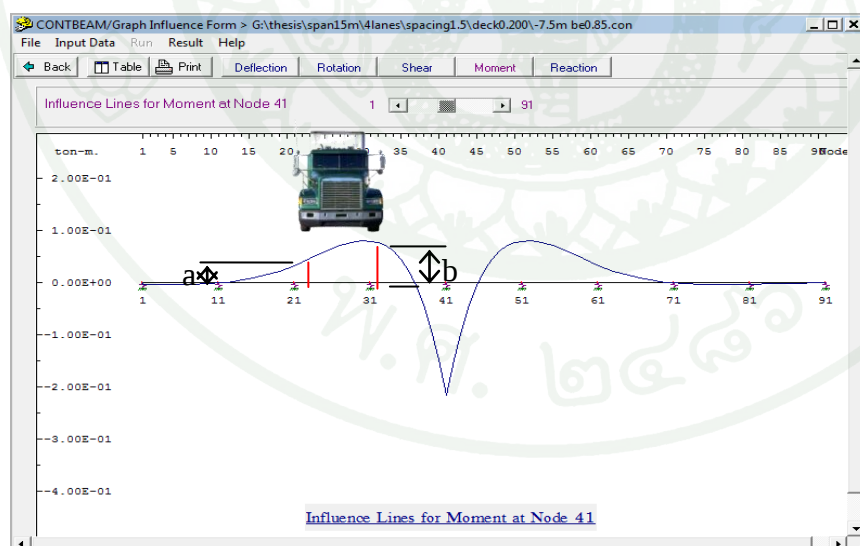
ภาพที่ 6 ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริง

ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริงที่ได้จะนำไปใช้ป็นค่าคงที่ของสปริงสำหรับฐานรองรับยืดหยุ่น (elastic support) รองรับพื้นสะพานประสิทธิภาพที่ตำแหน่งคานรองรับพื้นสะพาน และวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นที่สะพานประสิทธิภาพด้วยเส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดจากโปรแกรม CONTBEAM และจากเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้ สามารถหาตำแหน่งของ

น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด ด้วยการขยับตำแหน่งของรถไปตามช่วงพื้นสะพาน จนได้ผลรวมของผลคูณระหว่างน้ำหนักล้อบรรทุก กับค่าออร์ดิเนตของเส้นอิทธิพลสำหรับโมเมนต์ดัดมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 7 ภาพที่ 8



ภาพที่ 7 การหาตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด



ภาพที่ 8 การหาตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุด

โดยค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ

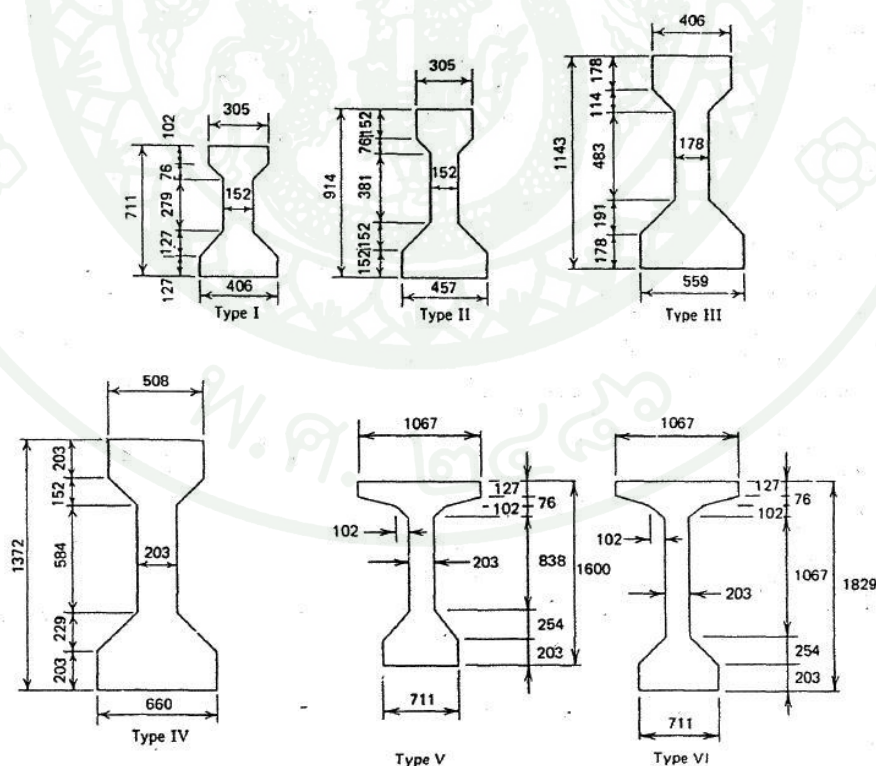
$$M = (a + b)P$$

(7)

2. การหาค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานประสิทธิผล

ใช้โปรแกรม SAP version 12.0 เพื่อวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานตามตำแหน่งน้ำหนักบรรทุก ที่ได้จาก CONTBEAM เพื่อนำมาปรับแก้โมเมนต์ดัดที่วิเคราะห์ได้ในข้อที่หนึ่งซึ่งอาจมีค่าที่ผิดไปจากความเป็นจริง อันเนื่องมาจากค่าความกว้างประสิทธิผลที่ใช้นั้นมาจากการคาดการณ์ การปรับแก้ทำโดยการเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดสูงสุดจากโปรแกรม CONTBEAM กับผลที่ได้จากโปรแกรม SAP ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแบบสามมิติ โดยที่ตำแหน่งของรถบรรทุกเป็นตำแหน่งเดียวกับที่ใช้ในโปรแกรม CONTBEAM ค่าความกว้างประสิทธิผลที่ถูกต้องจะให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ใกล้เคียงกับค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากโปรแกรม SAP โดยมีค่าแตกต่างไม่เกิน 5%

การสร้างรูปแบบของสะพานสำหรับวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP แบ่งออกตามส่วนต่างๆ ดังนี้ คานรองรับพื้นสะพานเป็นคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอตามมาตรฐานของ AASHTO มีลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้

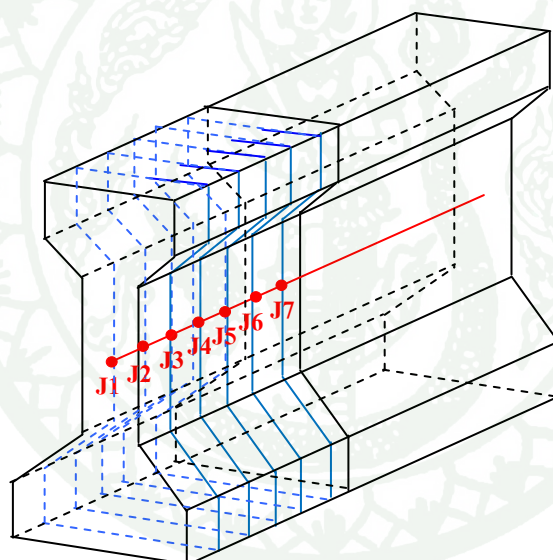


ภาพที่ 9 แสดงรูปแบบของคานคอนกรีตอัดแรงรองรับพื้นสะพานตามมาตรฐานของ AASHTO (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคานรองรับพื้นสะพานตามความยาวช่วงสะพานของ AASHTO

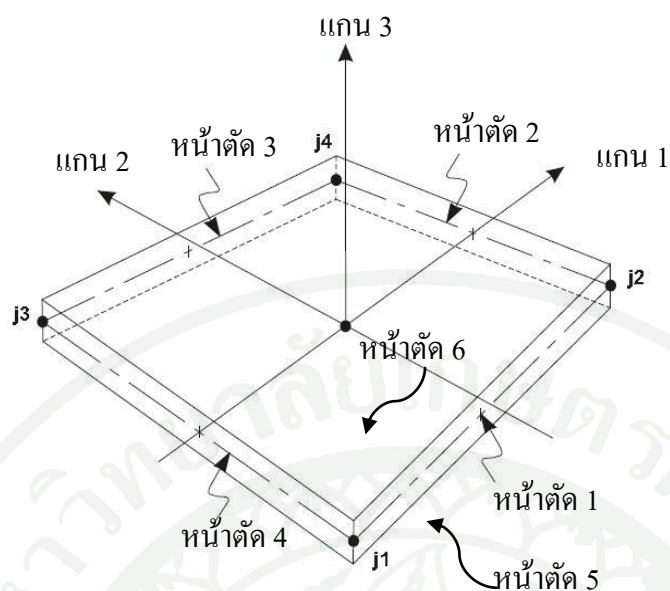
ประเภทของคาน	พื้นที่หน้าตัด(มม ²)	โมเมนต์ความเฉื่อย $\times 10^8$ (มม ⁴)	ความยาวช่วงคาน (ม.)
I	17.81	95	10
II	23.81	212	15
III	36.13	522	20
IV	50.9	1085	25
V	65.35	2169	30

คานที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม SAP นั้น จะแบ่งคานเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (element) โดยมีจุดต่อ (node) ของคานดังแสดงในภาพที่ 10



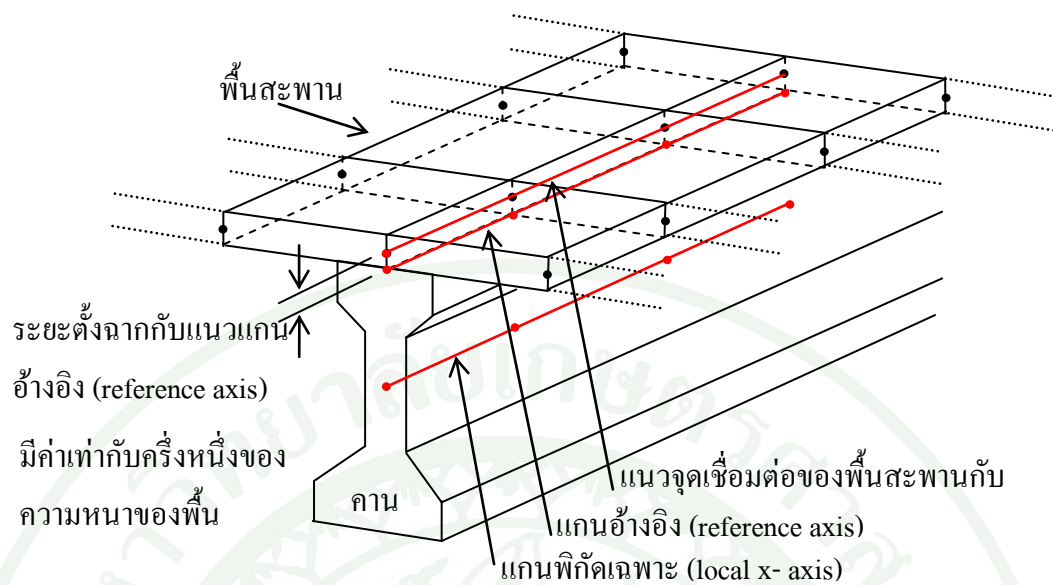
ภาพที่ 10 ลักษณะคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอแบบที่ IV ที่ใช้ในโปรแกรม SAP

พื้นสะพานกำหนดรูปแบบให้เป็น โครงสร้างแบบเปลือกบาง (shell element) โดยแบ่งเป็น ชิ้นส่วนแบบสี่จุด (four nodes) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในภาพที่ 11



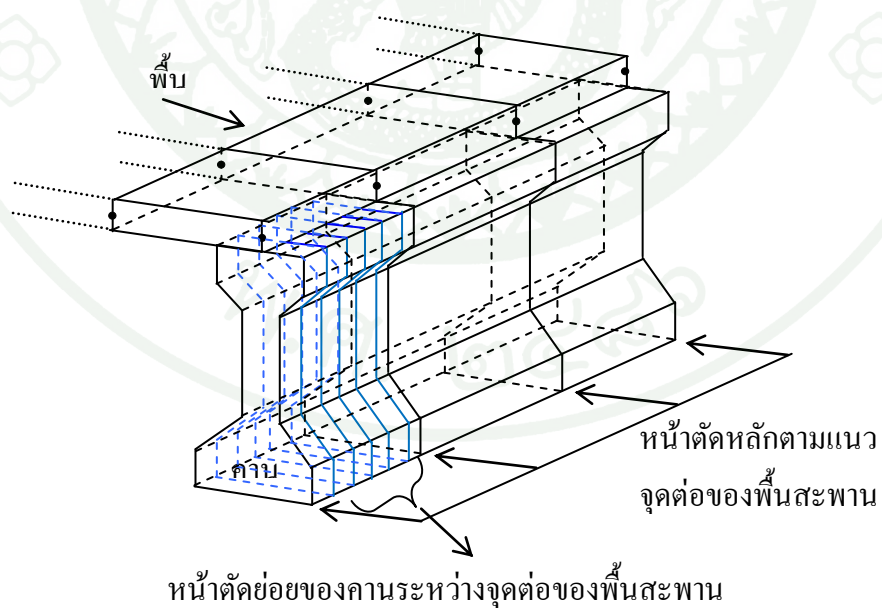
ภาพที่ 11 พื้นสะพานแบบแผ่นพื้นเปลือกบางแบบสี่จุดรูปสี่เหลี่ยม
(four-node quadrilateral shell element)

การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนของคานรองรับพื้นสะพานกับชิ้นส่วนของพื้นสะพาน กระทำโดยการกำหนดแกนอ้างอิง (reference axis) ของคานให้ตรงกันกับแกนพิกัดเฉพาะ x (local x-axis) ของคานรองรับพื้นสะพาน และปีกคานด้านบน ดังแสดงในภาพที่ 12 และกำหนดระยะตั้งฉากจากแกนอ้างอิงเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของพื้นสะพานให้เป็นแนวจุดเชื่อมต่อของพื้นสะพานกับคาน ระยะตั้งฉากนี้จะทำให้ชิ้นส่วนความหนาครึ่งด้านล่างของพื้นสะพานไม่เกยทับกับปีกคานด้านบน การกำหนดระยะเอียงศูนย์นี้จะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามความหนาของพื้นสะพาน

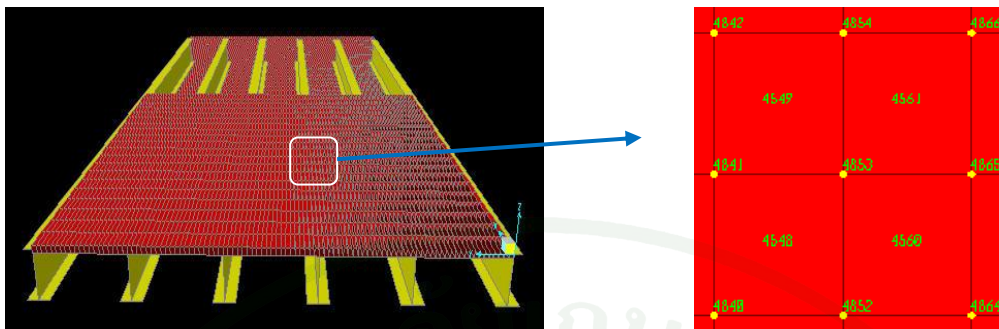


ภาพที่ 12 การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนพื้นสะพานกับคานในโปรแกรม SAP

นอกจากนี้ชิ้นส่วนของคานที่แบ่งหน้าตัดของคานตามตำแหน่งจุดต่อของชิ้นส่วนพื้นสะพานยังถูกแบ่งออกเป็นหน้าตัดย่อยๆ เพิ่มอีกช่วงละหกหน้าตัด ดังแสดงในภาพที่ 13



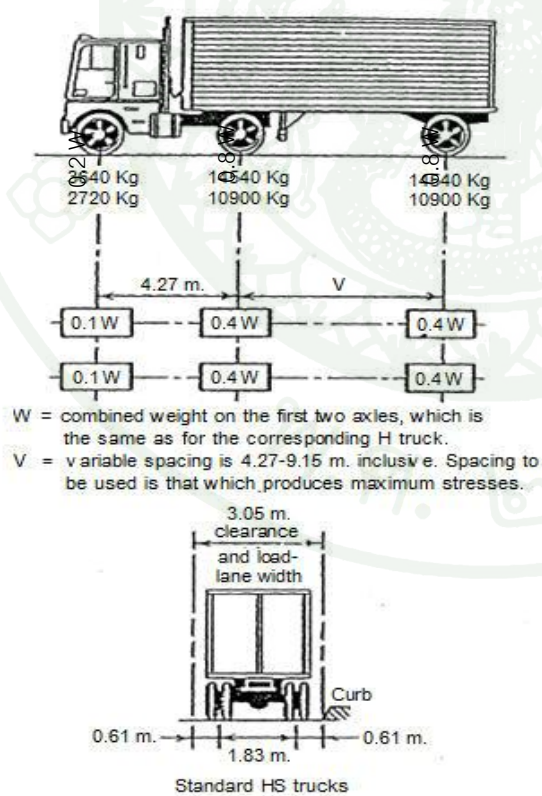
ภาพที่ 13 การแบ่งหน้าตัดย่อยของคานรองรับพื้นสะพาน



ภาพที่ 14 แบบจำลองของพื้นสะพาน

น้ำหนักรถบรรทุก

น้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ คือ HS 20-44 มีระยะห่างระหว่างล้อซ้ายและล้อขวา และระยะห่างระหว่างเพลาดังแสดงในภาพที่ 15

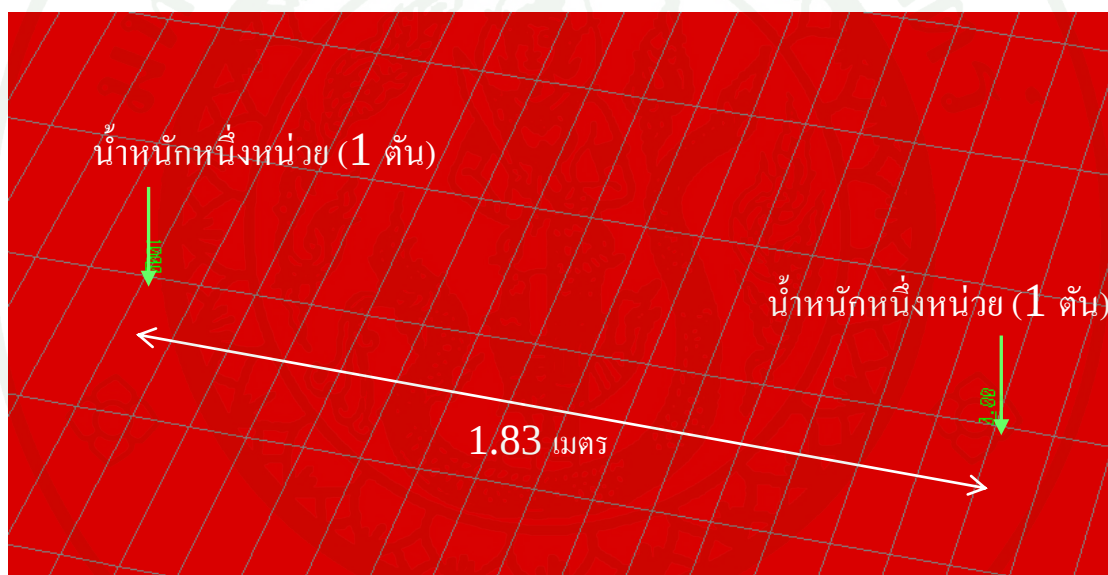


ภาพที่ 15 รถบรรทุก HS 20-44 ตามมาตรฐานของ AASHTO

เมื่อ ระยะห่างระหว่างช่วงล้อหลังมีความยาวอยู่ในช่วง 4.27 – 9.14 เมตร

$$P_{20} = 7.270 \text{ ตัน สำหรับ HS20}$$

แต่ในการออกแบบตามข้อกำหนดของ AASHTO ค่าโมเมนต์ดัดที่เสนอเป็นค่าโมเมนต์ดัดต่อหนึ่งหน่วยความยาวของพื้นสะพาน และน้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้จะเป็นน้ำหนักเทียบเท่าเพียงเพลเดียว ดังนั้นเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดดังกล่าว แรงกระทำที่กระทำต่อพื้นสะพานจึงเป็นน้ำหนักกระทำเพียงสองจุดซึ่งมีระยะห่าง 1.83 เมตรเท่ากับระยะห่างระหว่างล้อ ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 น้ำหนักกระทำเป็นจุดที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วนพื้นสะพาน

3. การทดสอบภาคสนาม

การทดสอบหาโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานของสะพานในสนามเปรียบเทียบกับ ค่าที่คำนวณได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) จากโปรแกรม SAP เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากข้อที่สอง โดยสะพานที่ใช้ในการทดสอบมีสองสะพานคือ สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี มีความยาวช่วงสะพาน 30 เมตร คานรองรับพื้นสะพานเป็นคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอแบบหน้าตัดไม้คองที่จากปลายคานถึงกึ่งกลางช่วงคาน ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคาน 2.20 เมตร และพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 18 เซนติเมตร สะพานอีกแห่งคือสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด มีความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร เป็นคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอแบบหน้าตัดไม้คองที่จากปลายคานถึงกึ่งกลางช่วงคาน ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคาน 2.20 เมตร และพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 18 เซนติเมตร การทดสอบกระทำโดยนำรถบรรทุกสิบล้อหนัก 25 ตันมาจอดที่ตำแหน่งระยะห่างจากตอม่อเป็นระยะ $L/8$, $L/4$, $3L/8$ และ $L/2$ เมตร ตามลำดับ โดย L คือความยาวของช่วงสะพานในแต่ละระยะ ที่ระยะห่างจากตอม่อค่าหนึ่งๆ จะใช้รถบรรทุกสิบล้อหนัก 25 ตันสองคันจอดอยู่บนตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด และเคลื่อนรถไปยังตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุด ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวได้มาจากการคำนวณหาจากโปรแกรม CONTBEAM ในขั้นตอนที่หนึ่ง



ภาพที่ 17 ภาพสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



ภาพที่ 18 สะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด

ในการทดสอบภาคสนามนี้ ต้องการวัดค่าโมเมนต์ดัดบวก และค่าโมเมนต์ดัดลบที่เกิดขึ้นในพื้นที่สะพานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนที่สอง การวัดค่าโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงต้องวัดด้วยการยึดตัวของพื้นสะพานโดยใช้อุปกรณ์วัดความเครียด (strain gauge) อุปกรณ์วัดความเครียดที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้ติดกับพื้นผิวที่เป็นคอนกรีตของ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น PL-90-11 โดยมีความยาวของตัวอุปกรณ์วัดความเครียด 90 มิลลิเมตร มีค่าตัวประกอบ (gauge factor) $2.10 \pm 1\%$ มีความต้านทาน (gauge resistance) $120 \pm 0.3\%$ ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 อุปกรณ์วัดความเครียด PL-90-11 ที่ใช้ในการวัดค่าการยึดตัวของคอนกรีต

อุปกรณ์วัดความเครียดเป็นตัวเซ็นเซอร์ที่รับข้อมูลการยืดหดตัวของคอนกรีต ข้อมูลจะอยู่ในรูปของความต้านทานกระแสไฟฟ้าและส่งเข้าสู่เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) เครื่องบันทึกข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ KYOWA PCD-300A ดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งมีวงจรวิศโตนบริจในตัว ทำให้สามารถต่ออุปกรณ์วัดความเครียดเข้ากับเครื่องได้โดยตรง



ภาพที่ 20 แสดงเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) KYOWA PCD-300A

อุปกรณ์วัดความเครียดอาศัยหลักการดังนี้ เมื่อเส้นลวดถูกยืดออกไปความต้านทานของมันจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่ออุปกรณ์วัดความเครียดถูกยืดออก ความยาวของมันจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานของโลหะตัวนำแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์นี้คือ

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (8)$$

เมื่อ R = ความต้านทานของอุปกรณ์วัดความเครียด
 ρ = ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นลวด)

L = ความยาวของเส้นลวด

A = พื้นที่หน้าตัด

การใช้ อุปกรณ์วัดความเครียดจะพิจารณาปริมาณทางกายภาพสองปริมาณ คือค่าความต้านทานของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงและค่าของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวนี้จะเรียกว่าค่าเกจแฟกเตอร์ (gauge factor) และอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$(9) \quad G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

เมื่อ G = เกจแฟกเตอร์

R = ความต้านทานเดิม

ΔR = ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจากเดิมเมื่ออุปกรณ์วัดความเครียดถูกยืด

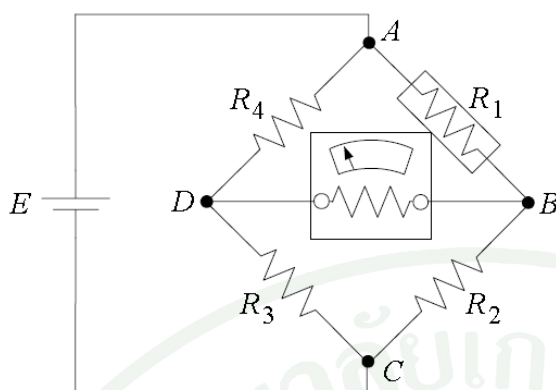
L = ความยาวเดิม

ΔL = ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อถูกยืด

จากสมการที่ (9) จะได้ว่า

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{G} = \varepsilon \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) จะเห็นว่า ค่าของหน่วยความเครียดจะสามารถคำนวณได้เมื่อวัดค่าของ ΔR ออกมา ทั้งนี้เพราะค่าของ R และ G นั้นเป็นค่าที่ทราบได้จากข้อมูลของผู้ผลิตอุปกรณ์วัดความเครียด แต่ค่าของ ΔR ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่มีค่าไม่มากนัก โดยทั่วไป ΔR จะมีค่าประมาณ 0.008 โอห์ม โอห์มมิเตอร์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นไม่สามารถจะนำมาใช้วัดได้ แต่วงจรวีทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge) นั้นสามารถนำมาใช้วัดค่าของ ΔR ได้ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 วงจรวิทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge)

ให้ R_1 เป็นค่าความต้านทานของอุปกรณ์วัดความเครียด ส่วน R_3 และ R_4 เป็นค่าความต้านทานในแขนสัดส่วน (ratio arms) R_2 เป็นค่าความต้านทานคงที่มาตรฐาน ซึ่งถ้าวงจรบริดจ์นี้อยู่ในสภาพที่สมดุลคือไม่มีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในวงจรดังนี้

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (11)$$

หรือ

$$R_1 = \frac{R_4}{R_3} R_2 \quad (12)$$

เมื่อมีแรงมากระทำต่อวัตถุที่อุปกรณ์วัดความเครียดนี้ติดอยู่ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ในที่นี้สมมติให้ค่าความต้านทาน R_1 เปลี่ยนไปเป็น $R_1 + \Delta R_1$ วงจรบริดจ์จะอยู่ในสภาพไม่สมดุลและมีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลอีกครั้งจึงต้องปรับค่า R_3 และ R_4 ใหม่ สมมติให้ R'_3 และ R'_4 เป็นค่าความต้านทานใหม่ในแขนสัดส่วนที่ทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลอีกครั้งหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ทราบ สมการแสดงความสัมพันธ์จะเป็นดังนี้

$$R_1 + \Delta R_1 = \frac{R'_4}{R'_3} R_2 \quad (13)$$

เนื่องจากทราบค่า R_1 อยู่แล้ว ดังนั้นจึงสามารถหาค่า ΔR_1 และนำไปแทนค่าในสมการที่ (10) เพื่อหาค่าความเครียดได้

ค่าเกจแฟลคเตอร์เป็นค่าคงที่อันเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ในการทำตัวเครื่องมือวัดค่าความเครียด โดยใช้โลหะผสมระหว่าง นิกเกิลกับโครเมียม ซึ่งจะให้ค่าเกจแฟลคเตอร์ที่ประมาณ 2.00 อย่างไรก็ตาม ค่าเกจแฟลคเตอร์นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความยาวของสายไฟที่ติดกับตัวเครื่องมือวัดค่าความเครียด มีค่าเปลี่ยนไปโดยค่าเกจแฟลคเตอร์ที่ปรับแก้ใหม่ตามความยาวของสายไฟสามารถแสดงได้ดังนี้

$$G_o = \frac{R}{R+rL} G \quad (14)$$

เมื่อ G_o = ค่าเกจแฟลคเตอร์ปรับแก้เนื่องจากความยาวของสายไฟ

R = ค่าความต้านทานของตัววัดความเครียด (gauge resistance) โอห์ม

r = ค่าความต้านทานต่อเมตร ของสายไฟ (โอห์ม/เมตร)

L = ค่าความยาวของสายไฟ (เมตร)

G = ค่าเกจแฟลคเตอร์

เมื่อปรับแก้ค่าเกจแฟลคเตอร์แล้วนำค่าความเครียดที่ได้จะนำมาคำนวณเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานดังนี้ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\sigma = \epsilon E \quad (15)$$

เมื่อ E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพื้นคอนกรีต

σ = ค่าความเค้นดัด (bending stress)

ϵ = ค่าความเครียดที่ได้จากการวัดสะพาน

ค่าความเค้นดัดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าโมเมนต์ดัดดังนี้

$$\sigma = \frac{M}{s} \quad (16)$$

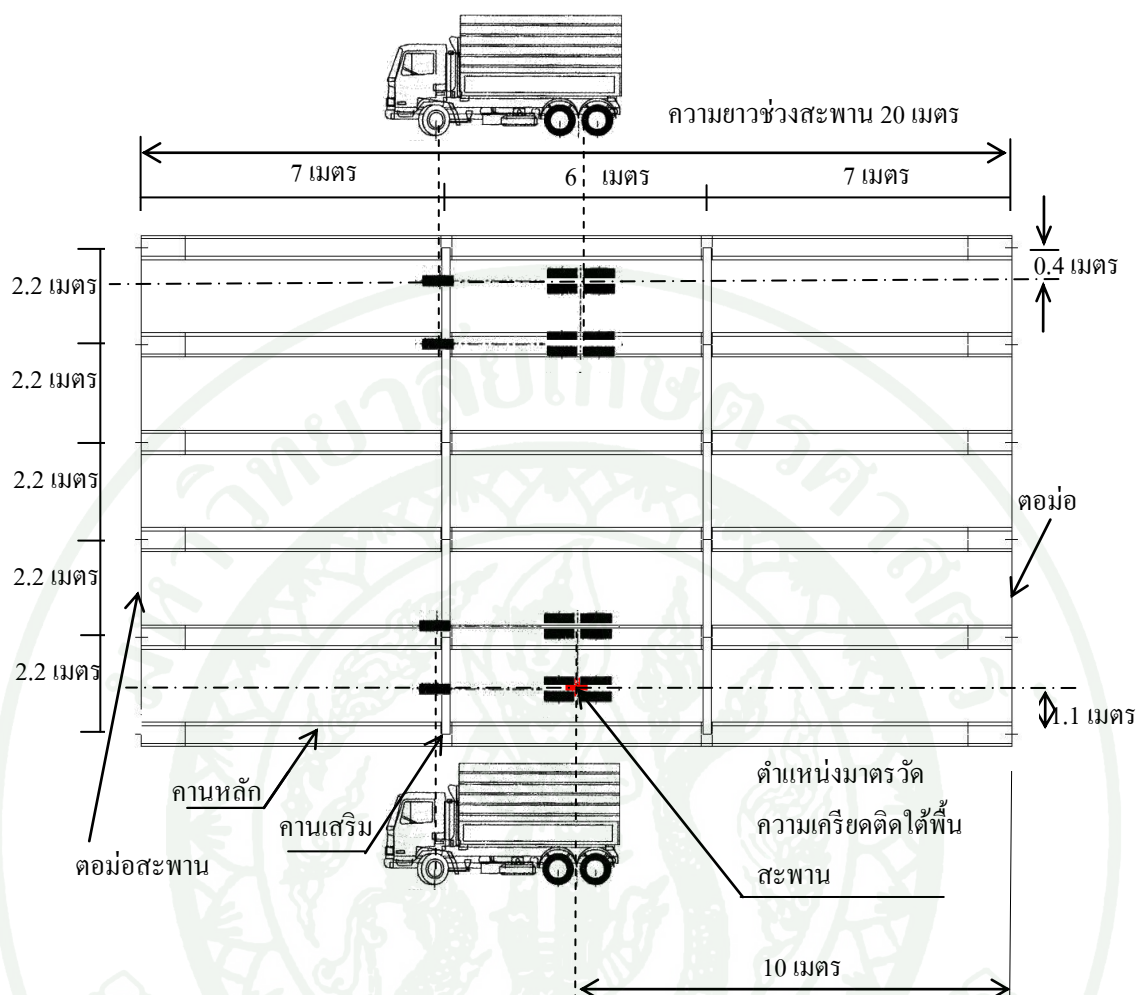
เมื่อ S = ค่าโมดูลัสหน้าตัด (section modulus)

M = ค่าโมเมนต์คดในพื้นสะพาน

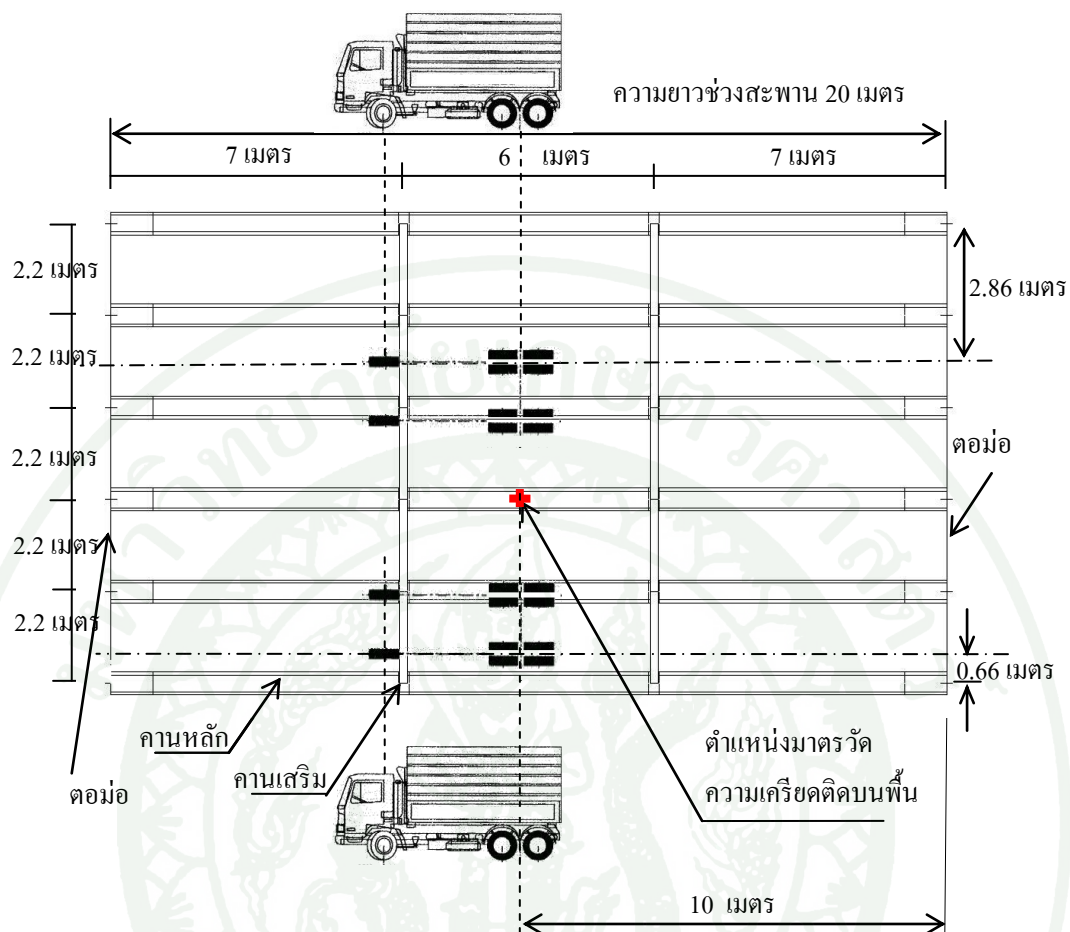
ดังนั้นจากสมการที่ (15) และ (16) ทำให้สามารถเขียนค่าโมเมนต์คดได้ว่า

$$M = \sigma s = (\varepsilon E)s \quad (17)$$

ในการทดสอบเพื่อหาค่าโมเมนต์คดบวกสูงสุดและค่าโมเมนต์คดลบสูงสุดในพื้นสะพาน บริเวณตำแหน่งที่ห่างจากตอม่อเป็นระยะ $L/8$, $L/4$, $3L/8$ และ $L/2$ เมตรตามลำดับนั้น ลักษณะการวางตำแหน่งรถบรรทุกทุกสปีดสองคันเพื่อให้เกิดค่าโมเมนต์คดสูงสุดในพื้นสะพานสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเค้น (strain gauge) ใต้พื้นสะพาน และตำแหน่งรถบรรทุกที่ระยะห่างจากฐานรองรับ 10 (L/2) เมตร สำหรับโมเมนต์บวกใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด

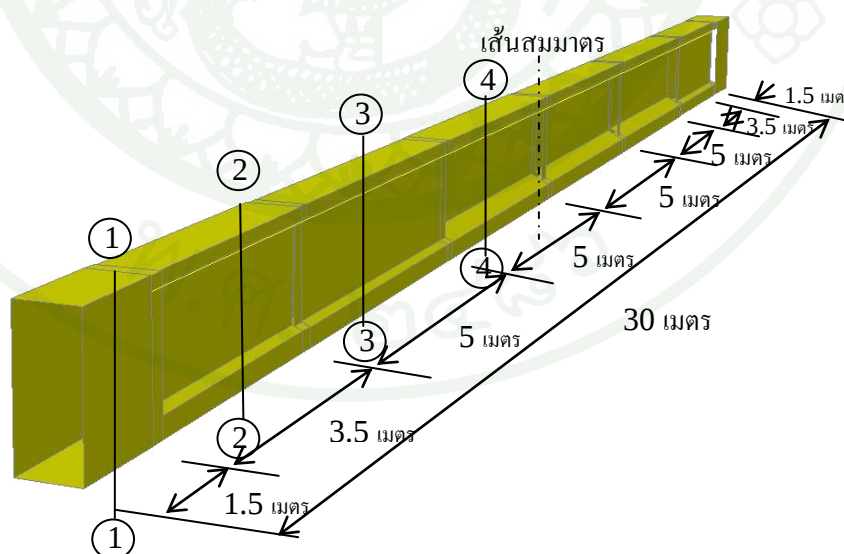


ภาพที่ 25 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) บนพื้นสะพาน และตำแหน่งรถบรรทุกที่ระยะห่างจากฐานรองรับ 10 (L/2) เมตร สำหรับโมเมนต์ลบนบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด

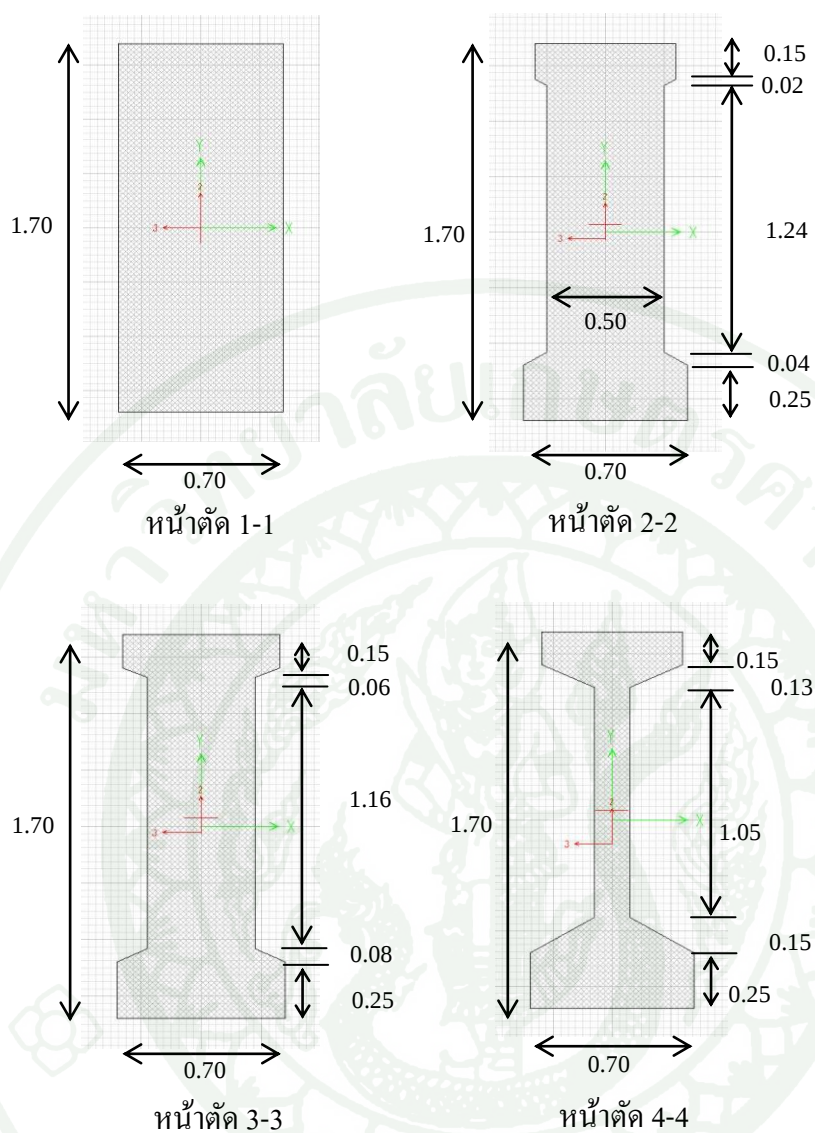


ภาพที่ 26 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับบนพื้นสะพานเพื่อนำไปคำนวณหาค่า
โมเมนต์ดัดกลับสูงสุดในพื้นสะพาน

ค่าโมเมนต์ดัดที่วัดได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SAP โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังนี้ เนื่องจากคานรองรับพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีเป็นคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่มีลักษณะและหน้าตัดไม่คงที่จากปลายคานถึงกึ่งกลางช่วงความยาว ดังแสดงในภาพที่ 27 และภาพที่ 28

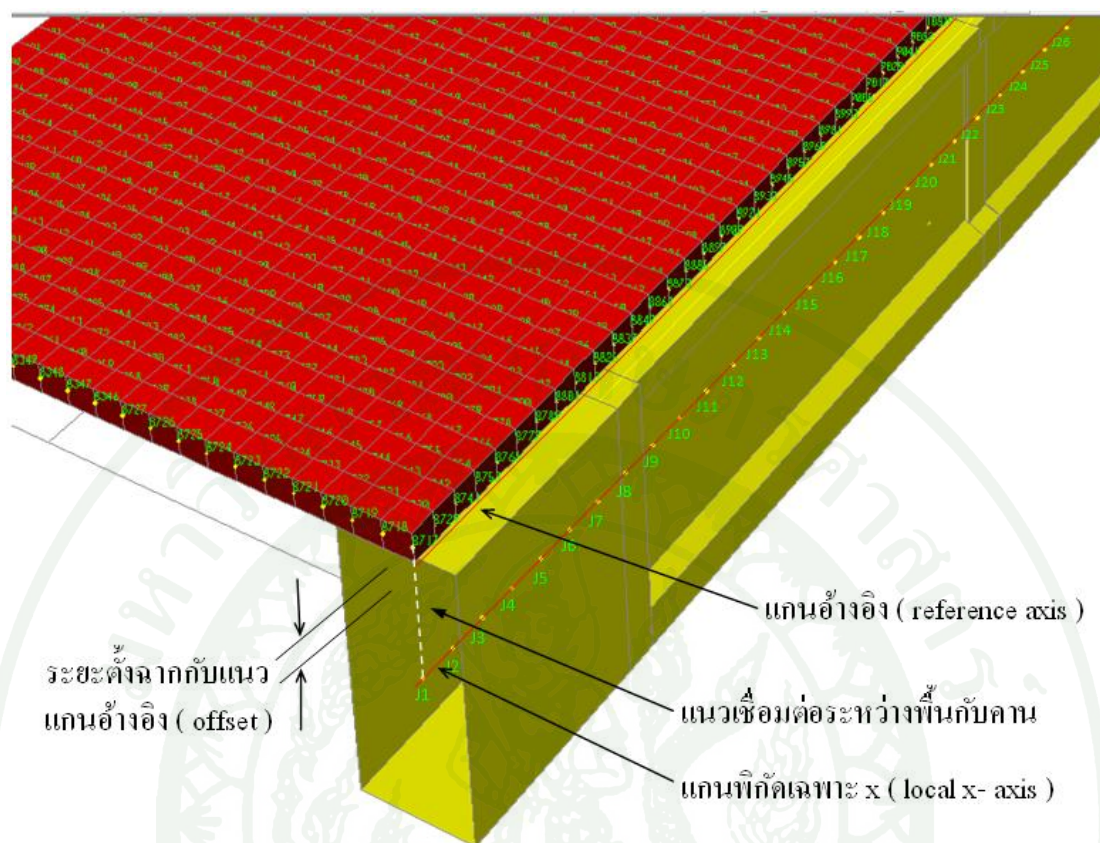


ภาพที่ 27 คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรีที่มีหน้าตัด
ไม่คงที่ตลอดความยาวคาน



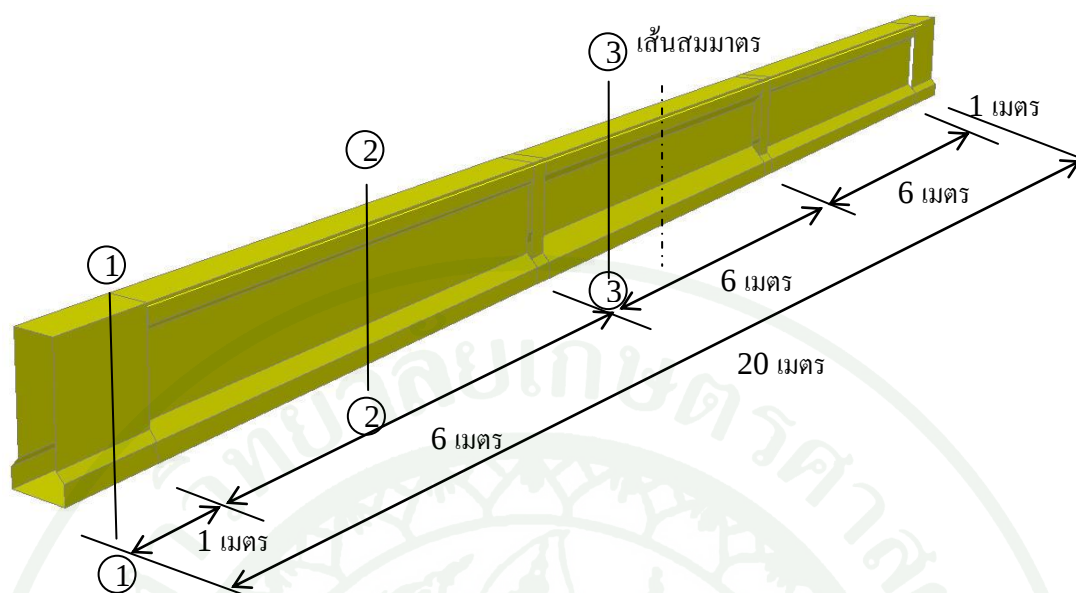
ภาพที่ 28 ภาพตัดขวางของหน้าตัดคานที่ตำแหน่งต่างๆ ของคานสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างพื้นสะพานกับคานรองรับพื้นสะพาน ดังแสดงในภาพข้างล่าง จุดกึ่งกลางของพื้นสะพานจะเชื่อมต่อเข้ากับแกนเฉพาะของคาน (local axis) ซึ่งกำหนดให้อยู่ที่ด้านบนของคาน และกำหนดให้มีระยะตั้งฉาก (offset) จากแกนเฉพาะ เท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของพื้นสะพาน เพื่อให้พื้นสะพานวางอยู่บนคานพอดี

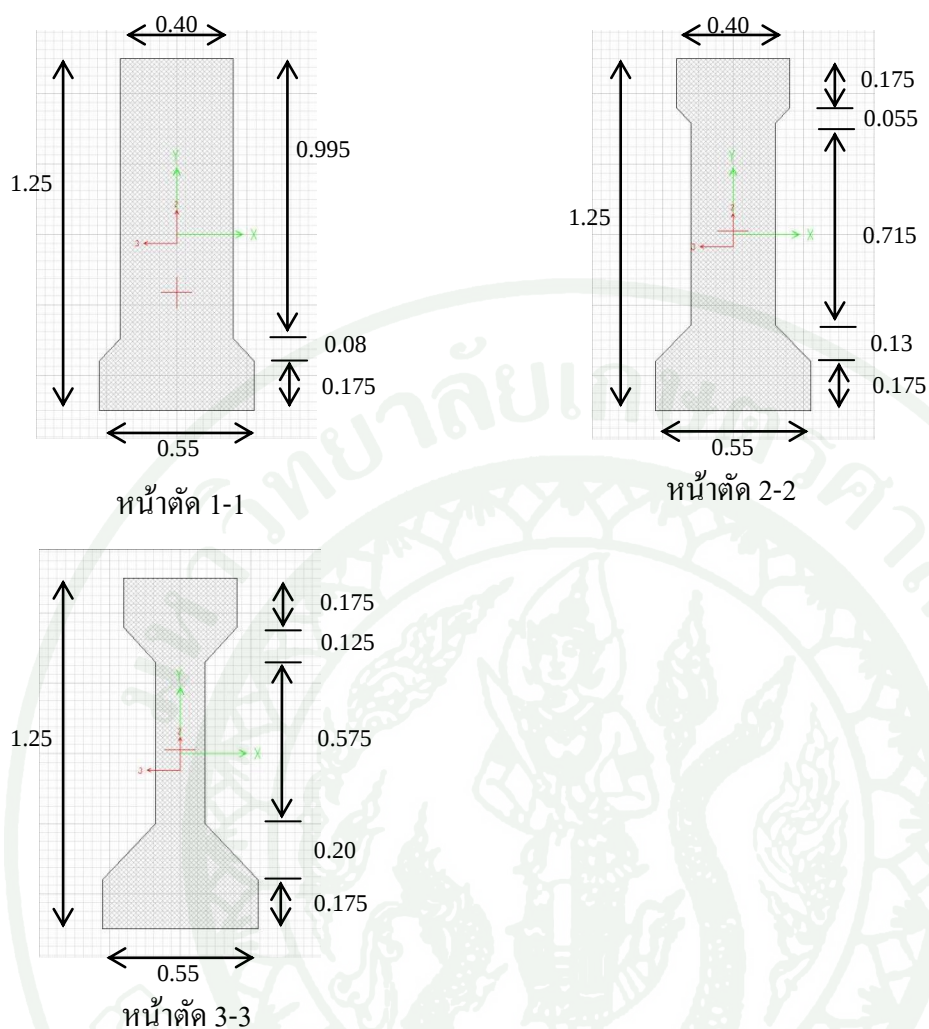


ภาพที่ 29 จุดเชื่อมต่อหน้าตัดของพื้นสะพานกับคานสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ในโปรแกรม SAP

และสำหรับสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ คานรองรับพื้นสะพานเป็นคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ที่มีลักษณะและหน้าตัดไม่คงที่จากปลายคานถึงกึ่งกลางช่วงความยาว ดังแสดงในภาพที่ 30 และภาพที่ 31

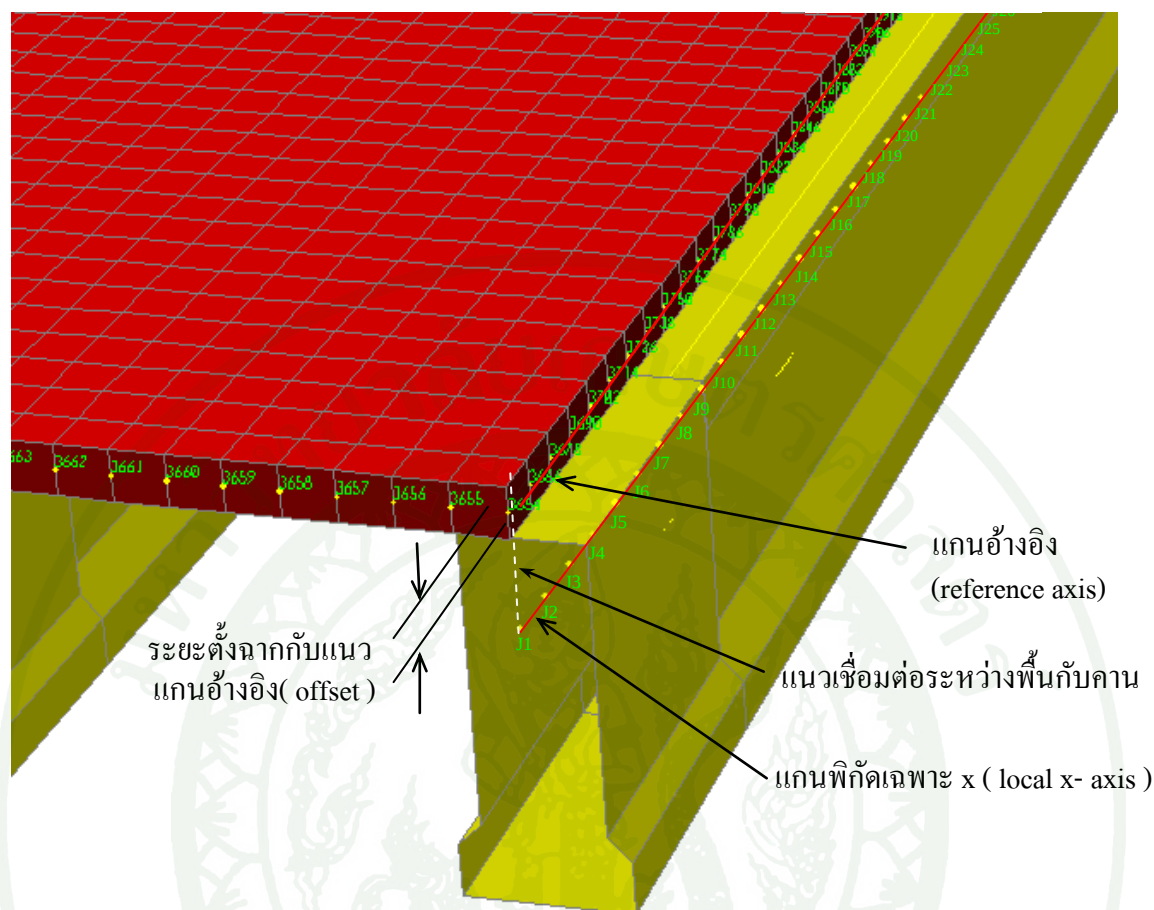


ภาพที่ 30 คำนวณรูปตัวไอของสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดนครราชสีมาที่มีหน้าตัดไม้คองที่ตลอดความยาวคัน



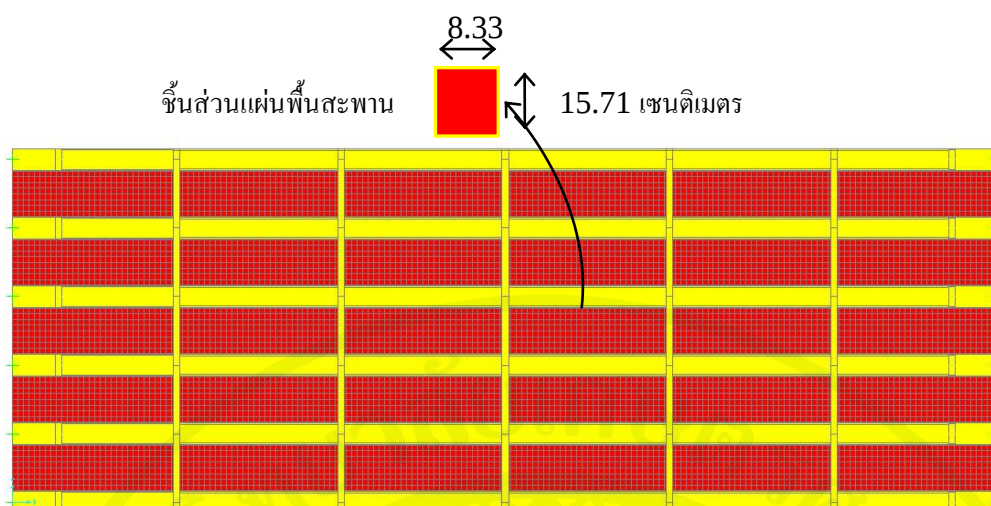
ภาพที่ 31 ภาพตัดขวางของหน้าตัดคานที่ตำแหน่งต่างๆ ของคานสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด

ลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างพื้นสะพานกับคานรองรับพื้นสะพานของสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ มีลักษณะเช่นเดียวกับสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี ดังแสดงในภาพข้างล่าง

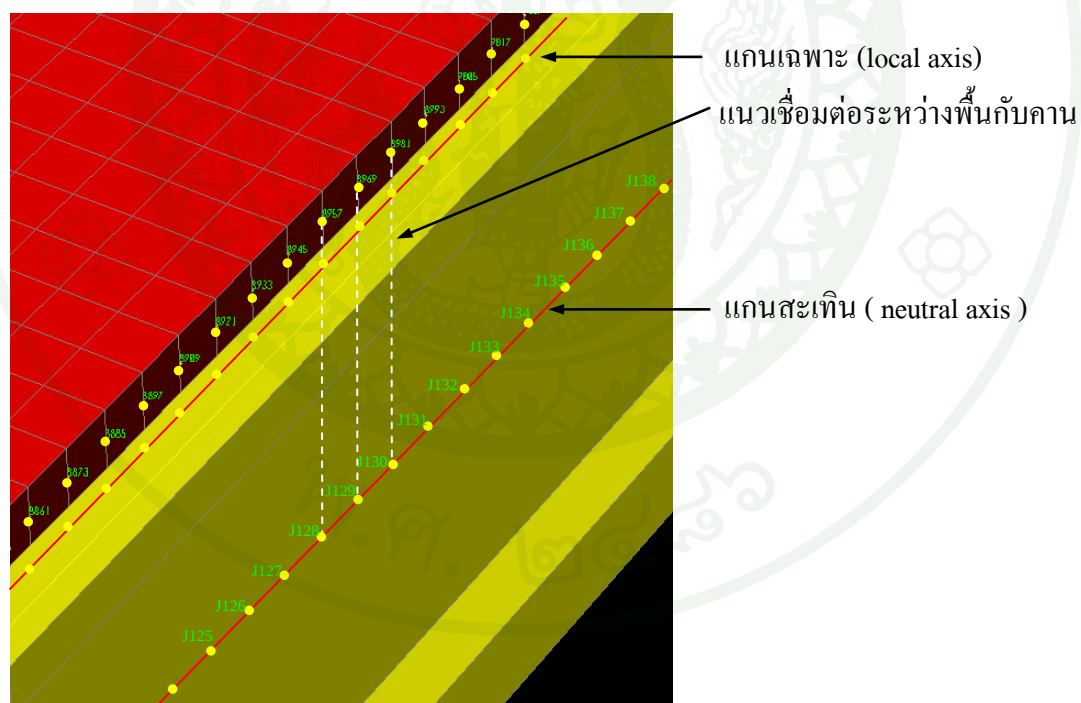


ภาพที่ 32 จุดเชื่อมต่อหน้าตัดของพื้นสะพานกับคานสะพานข้ามแม่น้ำแควพู่ จังหวัดตราด ในโปรแกรม SAP

ลักษณะของพื้นสะพานกำหนดให้เป็นแผ่นพื้นเปลือกบางแบบสี่จุดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (four-node quadrilateral shell element) มีความหนาเท่ากับความหนาของพื้นสะพานดังแสดงในภาพ 33 สำหรับพื้นสะพานของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี แบ่งพื้นสะพานออกเป็นชั้นส่วนทั้งหมด 12,600 ชั้นส่วน โดยแต่ละชั้นส่วนมีขนาดเท่าๆกัน คือมีความหนา 18 เซนติเมตร มีความกว้าง 8.33 เซนติเมตร มีความยาว 15.71 เซนติเมตร

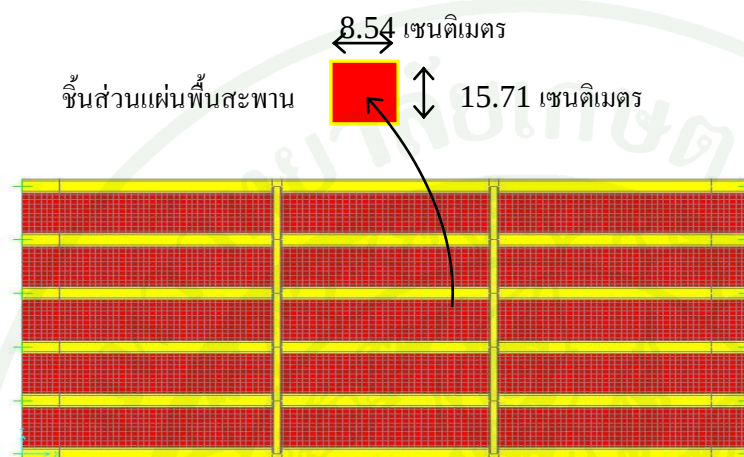


ภาพที่ 33 ลักษณะและขนาดของชั้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

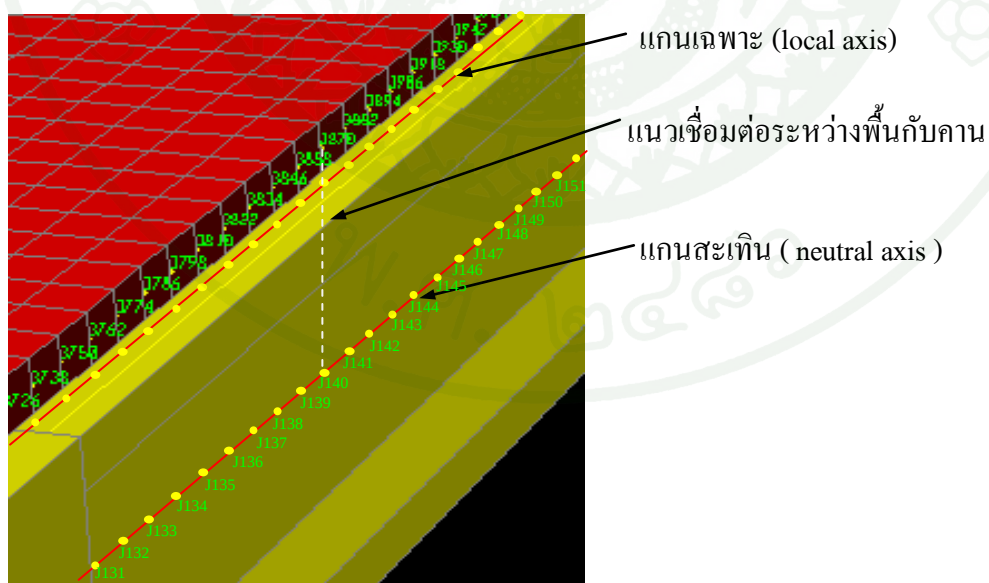


ภาพที่ 34 การเชื่อมต่อของชั้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน กับคานรองรับพื้นสะพาน ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

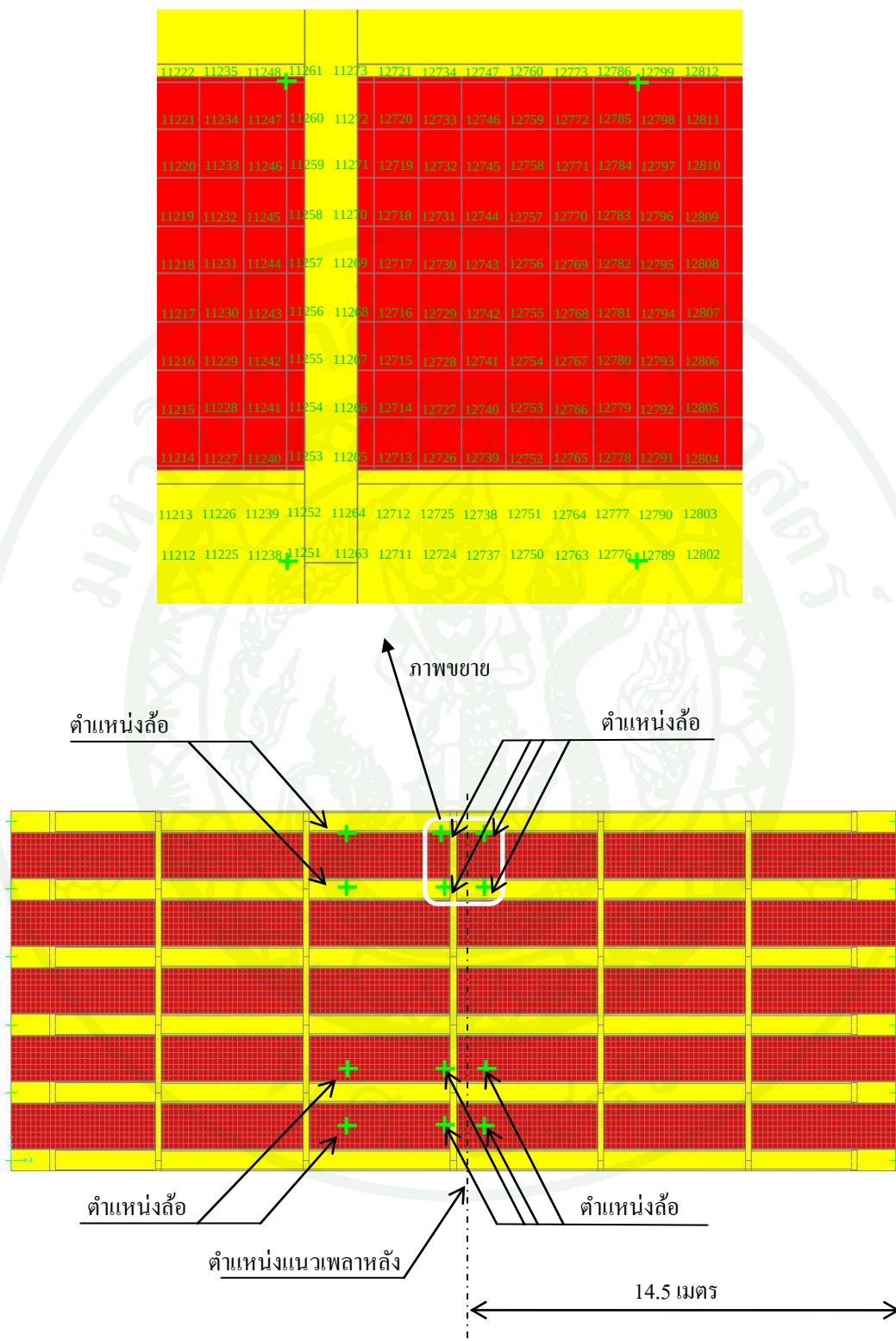
ในขณะที่พื้นสะพานของสะพานข้ามแม่น้ำแควพู่ จังหวัดตราด แบ่งพื้นสะพานออกเป็น
ชั้นส่วนทั้งหมด 7,020 ชั้นส่วน โดยแต่ละชั้นส่วนมีขนาดเท่าๆกัน คือมีความหนา 18 เซนติเมตร มี
ความกว้าง 8.33 เซนติเมตร มีความยาว 15.71 เซนติเมตร



ภาพที่ 35 ลักษณะและขนาดของชั้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน ของสะพานข้ามแม่น้ำแควพู่
จังหวัดตราด



ภาพที่ 36 ภาพขยายการเชื่อมต่อของชั้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน กับคานรองรับพื้นสะพาน ของ
สะพานข้ามแม่น้ำแควพู่ จังหวัดตราด



ภาพที่ 38 ตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกของรถบรรทุกสิบล้อสองคันที่กระทำบนพื้นสะพาน
สำหรับการหาค่าโมเมนต์คดงอสูงสุด

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานและผลการทดสอบสะพานในสนามในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็นสี่ส่วนคือ ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน ผลการวิเคราะห์เพื่อปรับแก้ความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพาน ผลการทดสอบสะพานในสนาม และผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการโมเมนต์ดัดสูงสุดและความกว้างประสิทธิภาพในพื้นที่สะพาน โดยตัวแปรที่นำมาศึกษาถึงผลที่มีต่อค่าโมเมนต์ดัดบวก และค่าโมเมนต์ดัดลบในพื้นที่สะพาน คือความยาวช่วงสะพาน จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน ระยะห่างของคานรองรับพื้นสะพาน ความหนาของพื้นสะพาน และตำแหน่งของพื้นสะพานวัดจากตอม่อ โดยความยาวช่วงสะพานคือ 10, 15, 20, 25 และ 30 เมตร จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 คาน ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานคือ 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 และ 2.50 เมตร ความหนาของพื้นสะพานคือ 0.150, 0.175, 0.200, 0.225 และ 0.250 เมตร ตามลำดับ และตำแหน่งของพื้นสะพานวัดจากตอม่อ กำหนดให้เริ่มต้นที่ หนึ่งเมตร เพิ่มขึ้นทีละหนึ่งเมตรไปจนถึงตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสะพาน จากตัวแปรต่างๆ ดังแสดงทำให้เกิดรูปแบบสะพานทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ แบ่งตามลักษณะมีดังนี้

ตารางที่ 2 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 10 เมตร

	สะพานช่วงยาว 10 เมตร / 2 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 10 เมตร / 3 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 10 เมตร / 4 ช่องจราจร				
จำนวนคันรองรับพื้นที่สะพาน	6	5	5	4	4	8	7	6	6	5	10	9	8	7	7
ระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นที่สะพาน(เมตร)	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
ความหนาพื้นสะพาน(เมตร)	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

ตารางที่ 3 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 15 เมตร

	สะพานช่วงยาว 15 เมตร / 2 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 15 เมตร / 3 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 15 เมตร / 4 ช่องจราจร				
จำนวนคันรองรับพื้นที่สะพาน	6	5	5	4	4	8	7	6	6	5	10	9	8	7	7
ระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นที่สะพาน(เมตร)	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
ความหนาพื้นสะพาน(เมตร)	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

ตารางที่ 4 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 20 เมตร

	สะพานช่วงยาว 20 เมตร / 2 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 20 เมตร / 3 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 20 เมตร / 4 ช่องจราจร				
จำนวนคันรองรับพื้นสะพาน	6	5	5	4	4	8	7	6	6	5	10	9	8	7	7
ระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพาน(เมตร)	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
ความหนาพื้นสะพาน(เมตร)	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

ตารางที่ 5 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 25 เมตร

	สะพานช่วงยาว 25 เมตร / 2 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 25 เมตร / 3 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 25 เมตร / 4 ช่องจราจร				
จำนวนการรองรับพื้นที่สะพาน	6	5	5	4	4	8	7	6	6	5	10	9	8	7	7
ระยะห่างระหว่าง การรองรับพื้นที่ สะพาน(เมตร)	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
ความหนาพื้น สะพาน(เมตร)	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

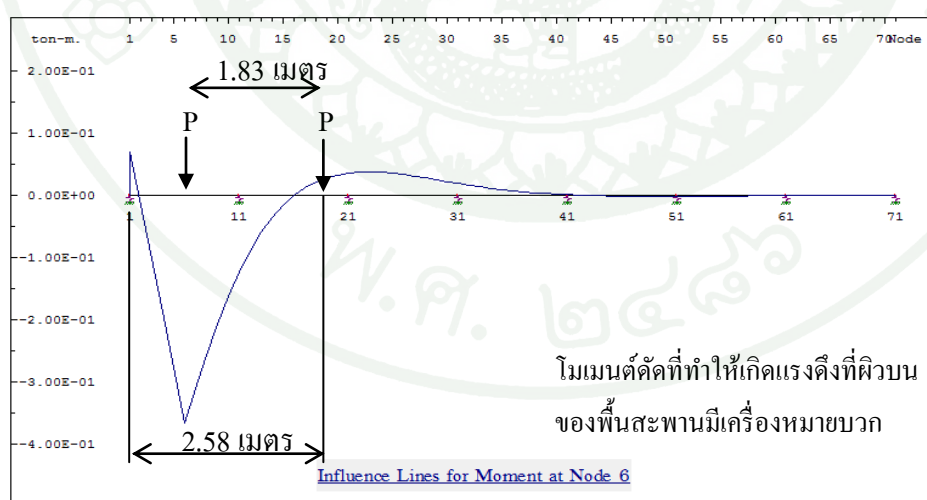
ตารางที่ 6 รูปแบบสะพานที่นำมาวิเคราะห์สำหรับสะพานที่มีช่วงสะพาน 30 เมตร

	สะพานช่วงยาว 30 เมตร / 2 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 30 เมตร / 3 ช่องจราจร					สะพานช่วงยาว 30 เมตร / 4 ช่องจราจร				
จำนวนคันรองรับพื้นที่สะพาน	6	5	5	4	4	8	7	6	6	5	10	9	8	7	7
ระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นที่สะพาน(เมตร)	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
ความหนาพื้นสะพาน(เมตร)	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

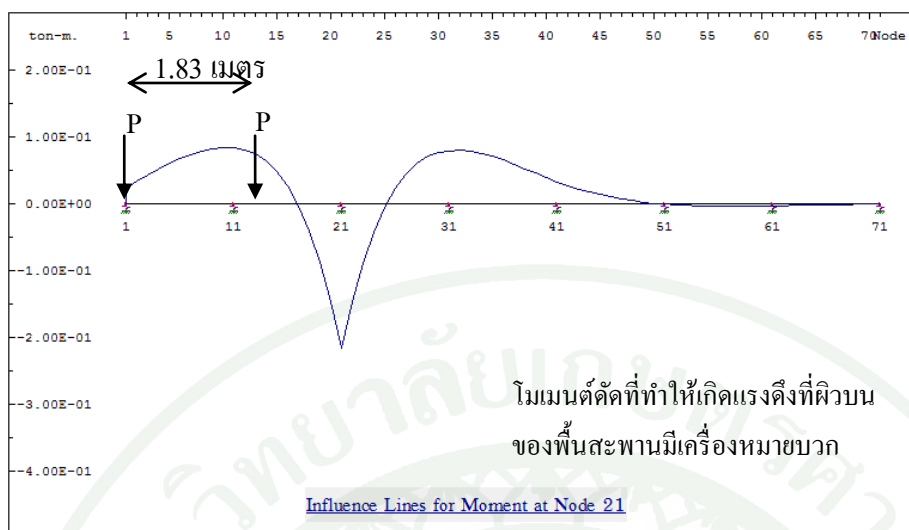
จากตารางแสดงจำนวนสะพานทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ ทำให้มีสะพานในรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งหมด 375 สะพาน มีตำแหน่งในการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดบวกลบทั้งหมด 4725 ตำแหน่ง และตำแหน่งโมเมนต์ดัดลบทั้งหมด 4725 ตำแหน่ง

1. การวิเคราะห์หาตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน

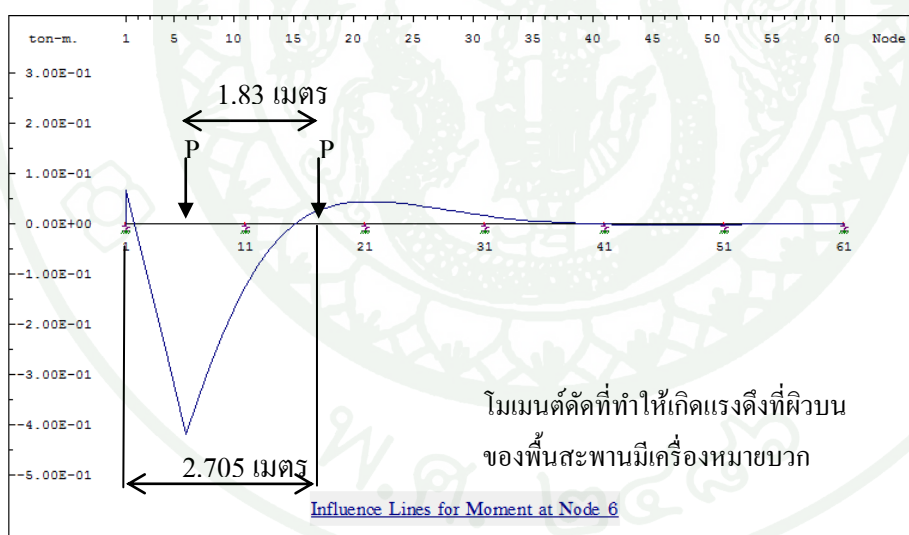
ตำแหน่งของรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกลบ และ โมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CONTBEAM โดยพิจารณาจากเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัดพบว่า ตำแหน่งของรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานเพียงอย่างเดียว สำหรับสะพานรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความยาวช่วงสะพาน จำนวนช่องจราจร จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน หรือความหนาของพื้นสะพานเท่าใดก็ตาม หากมีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานเท่ากันแล้ว ก็จะมีตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับงานวิจัยนี้จึงมีทั้งหมดห้าแบบสำหรับโมเมนต์ดัดบวกลบ และอีกห้าแบบสำหรับโมเมนต์ดัดลบตามระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 และ 2.50 เมตร ดังแสดงในภาพข้างล่าง



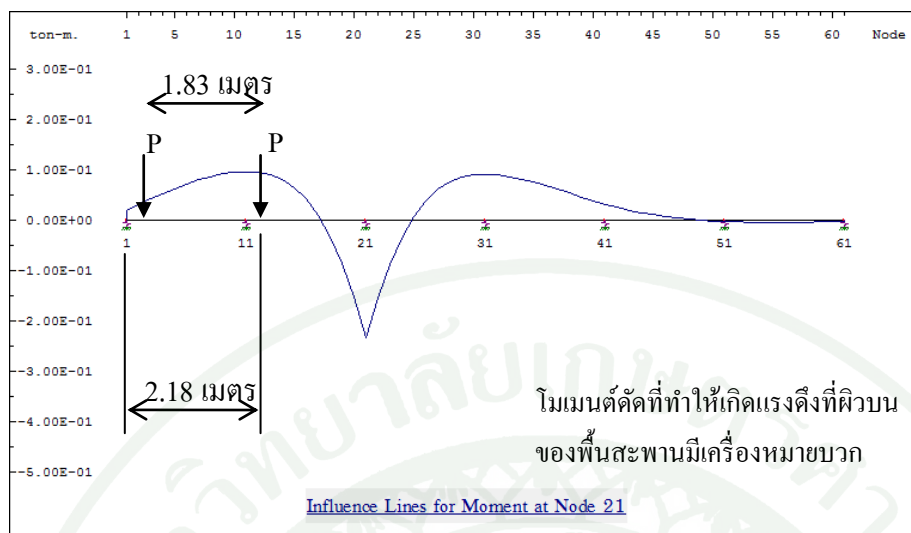
ภาพที่ 39 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.50 เมตร



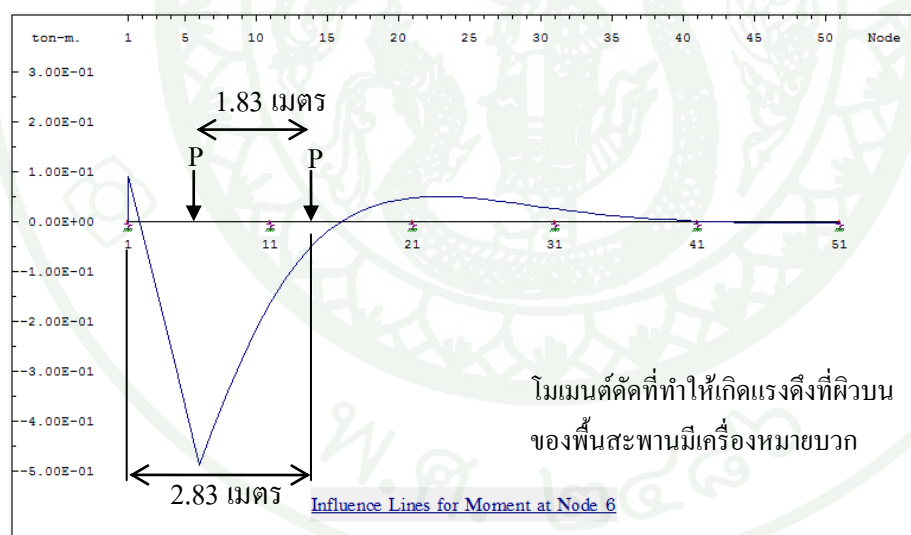
ภาพที่ 40 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.50 เมตร



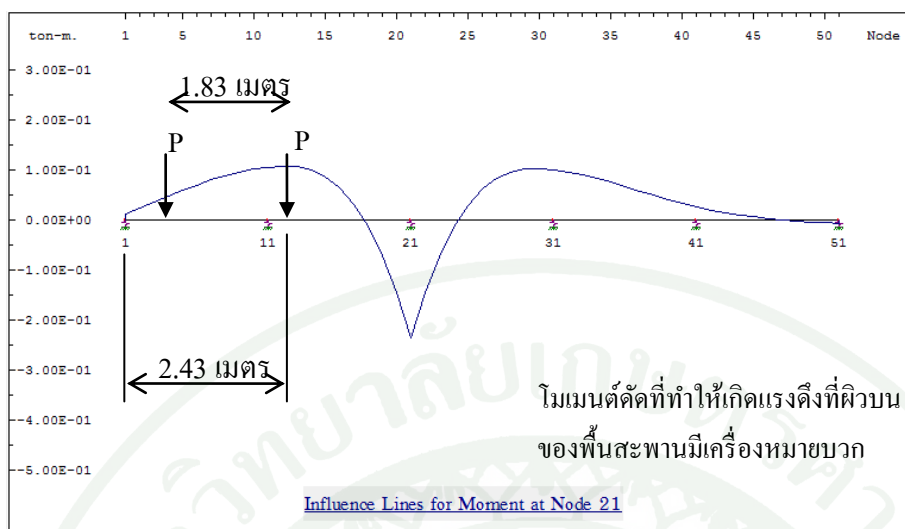
ภาพที่ 41 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 1.75 เมตร



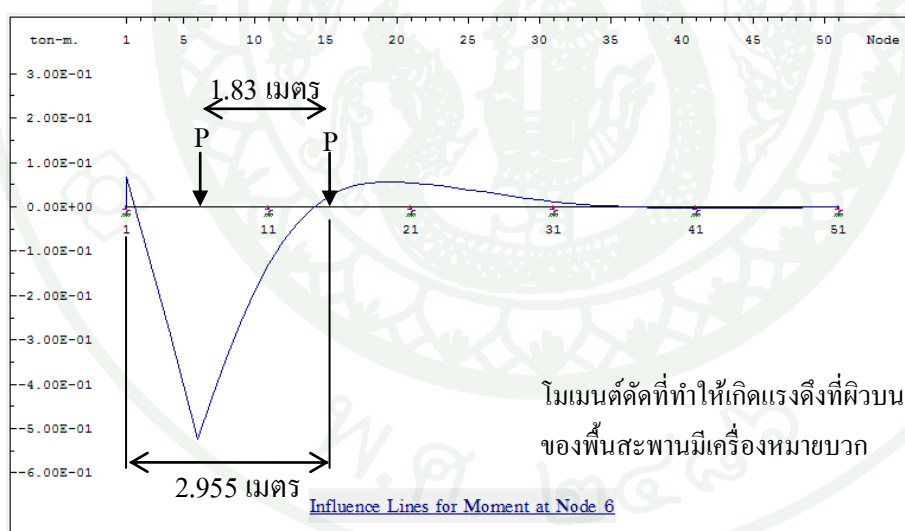
ภาพที่ 42 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบน
ของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน
1.75 เมตร



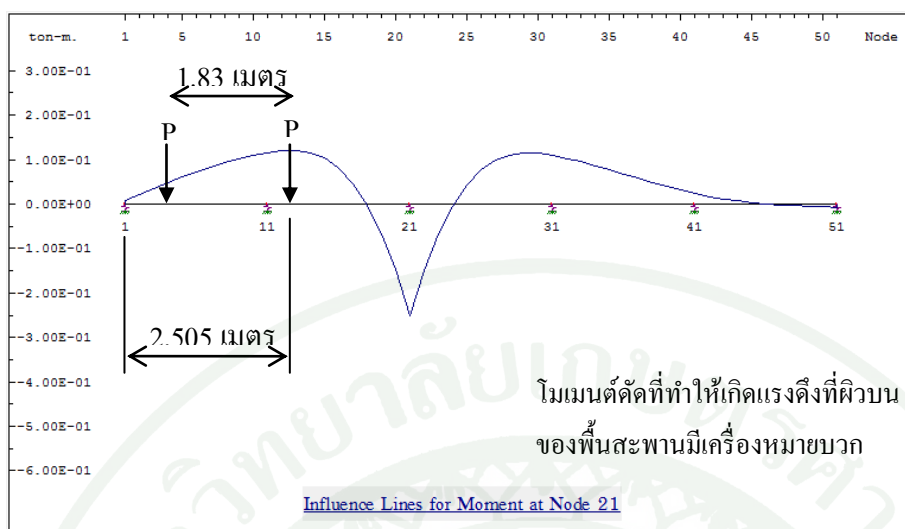
ภาพที่ 43 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่าง
ของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน
2.00 เมตร



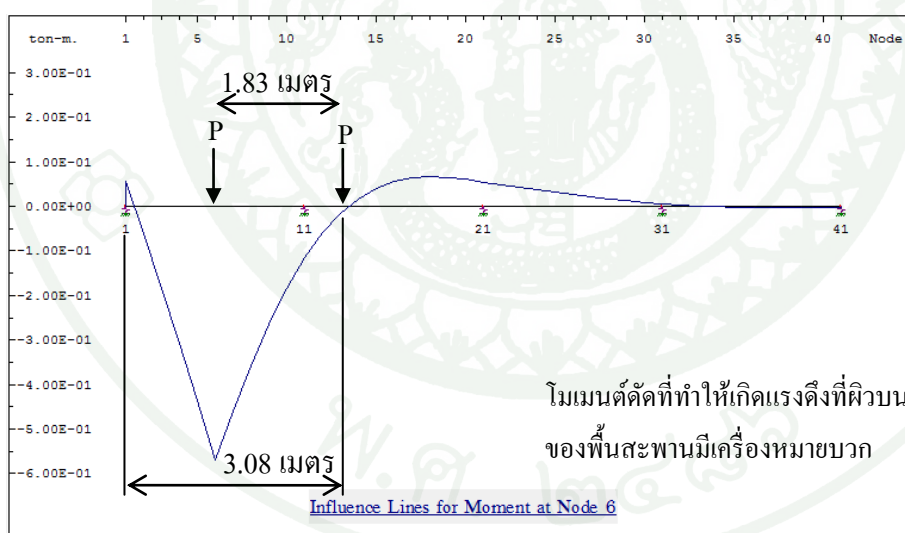
ภาพที่ 44 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.00 เมตร



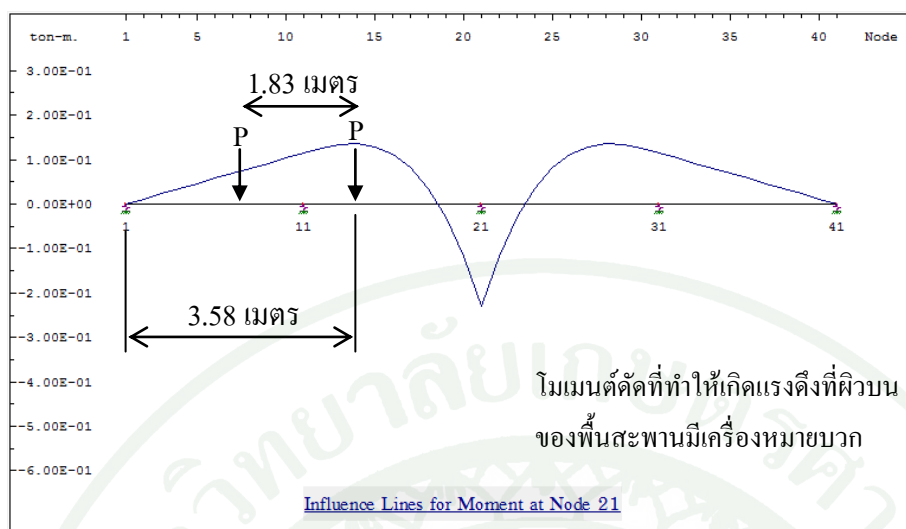
ภาพที่ 45 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.25 เมตร



ภาพที่ 46 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.25 เมตร



ภาพที่ 47 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตบวกสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวล่างของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.50 เมตร



ภาพที่ 48 ตำแหน่งรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนของพื้นสะพานในพื้นสะพาน สำหรับคานรองรับพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคาน 2.50 เมตร

ตำแหน่งรถบรรทุกที่ได้ดังกล่าวจะนำไปใช้เป็นตัวน้ำหนักกระทำบนโครงสร้างสะพานในโปรแกรม SAP ต่อไป

2. การวิเคราะห์เพื่อปรับแก้ความกว้างประสิทธิผล (b_e) ของพื้นสะพาน

ในการปรับแก้ความกว้างประสิทธิผล (b_e) ของพื้นสะพานเพื่อให้ค่าโมเมนต์คัตบวก และค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ได้จากโปรแกรม CONTBEAM มีค่าใกล้เคียงกับค่าโมเมนต์คัตบวก และค่าโมเมนต์คัตลบสูงสุดที่ได้จากโปรแกรม SAP ได้จากตำแหน่งโมเมนต์คัตบวก 4725 ตำแหน่ง และตำแหน่งโมเมนต์คัตลบ 4725 ตำแหน่ง และกำหนดให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมเมนต์คัตบวกและโมเมนต์คัตลบ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม SAP ไม่เกินห้าเปอร์เซ็นต์ จากวิธีการดังกล่าว นอกจากจะได้ค่าความกว้างประสิทธิผลที่ตำแหน่งต่างๆ แล้ว ยังสามารถวิเคราะห์หาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือ ความยาวช่วงสะพาน จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน ความหนาของพื้นสะพาน และตำแหน่งที่ห่างจากตอม่อสะพานที่ระยะต่างๆ จนถึงกึ่งกลางช่วงสะพาน ที่มีต่อค่าโมเมนต์คัตบวกและโมเมนต์คัตลบสูงสุด

ในพื้นที่สะพาน ผลการศึกษาจากจำนวนสะพานทั้งหมด 375 รูปแบบ ได้เลือกตัวอย่างเพื่อแสดงผลของอิทธิพลดังกล่าวเพียงสี่กลุ่มเท่านั้นคือ

กลุ่มที่1 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวช่วงสะพานตั้งแต่ 10, 15, 20, 25 และ 30 เมตร โดยสะพานที่นำมาเปรียบเทียบนั้นกำหนดให้ตัวแปรคงที่คือ จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน หกคาน ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.00 เมตร และ ความหนาของพื้นสะพาน 0.200 เมตร

กลุ่มที่2 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพานตั้งแต่ 5, 6 และ 8 คาน โดยมีจำนวนช่องจราจร 2, 3 และ 4 ช่องตามลำดับ โดยสะพานที่นำมาเปรียบเทียบนั้นกำหนดให้ตัวแปรที่คงที่คือ ความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.00 เมตร และ ความหนาของพื้นสะพาน 0.200 เมตร

กลุ่มที่3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานตั้งแต่ 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50 เมตร โดยสะพานที่นำมาเปรียบเทียบนั้นกำหนดให้ตัวแปรคงที่คือ ความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร จำนวนคานรองรับพื้นสะพานจำนวนหกคาน และ ความหนาของพื้นสะพาน 0.200 เมตร

กลุ่มที่4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาของพื้นสะพานตั้งแต่ 0.150, 0.175, 0.200, 0.225, 0.250 เมตร โดยสะพานที่นำมาเปรียบเทียบนั้นกำหนดให้ตัวแปรคงที่คือ ความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร จำนวนคานรองรับพื้นสะพานจำนวนหกคาน และ ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.00 เมตร

ผลของความยาวช่วงสะพาน

ในการศึกษาผลของความยาวช่วงสะพานซึ่งมีทั้งหมดห้าช่วง ในกลุ่มที่ 1 นั้นได้พิจารณาเฉพาะตำแหน่งของพื้นสะพานที่ห่างจากตอม่อเป็นระยะ $L/8$, $L/4$, $3L/8$ และ $L/2$ เมตร ดังแสดงในตารางที่ 7 - 11 และกราฟที่ 49 - 50

ตารางที่ 7 ค่าโมเมนต์คดโค้งและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีความยาวช่วง
สะพาน 10 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์คดโค้ง(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์คดกลับ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.25 ($L/8$)	1.11	0.3520	0.3500	-0.59%	0.59	-0.1666	-0.1654	-0.82%
2.50 ($L/4$)	1.18	0.3562	0.3504	-1.62%	1.03	-0.1283	-0.1232	-4.06%
3.75 ($3L/8$)	1.20	0.3643	0.3598	-1.23%	1.31	-0.1116	-0.1099	-1.43%
5.00 ($L/2$)	1.20	0.3675	0.3656	-0.51%	1.40	-0.1064	-0.1065	0.09%

ตารางที่ 8 ค่าโมเมนต์คดโค้งและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีความยาวช่วง
สะพาน 15 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์คดโค้ง(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์คดกลับ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.875 ($L/8$)	1.14	0.3454	0.3434	-0.59%	0.63	-0.1620	-0.1618	-0.14%
3.750 ($L/4$)	1.20	0.3550	0.3587	1.04%	1.05	-0.1319	-0.1303	-1.21%
5.625 ($3L/8$)	1.25	0.3623	0.3641	0.50%	1.28	-0.1209	-0.1199	-0.83%
7.500 ($L/2$)	1.25	0.3646	0.3703	1.57%	1.30	-0.1183	-0.1211	2.35%

ตารางที่ 9 ค่าโมเมนต์คดโค้งและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีความยาวช่วง
สะพาน 20 เมตร

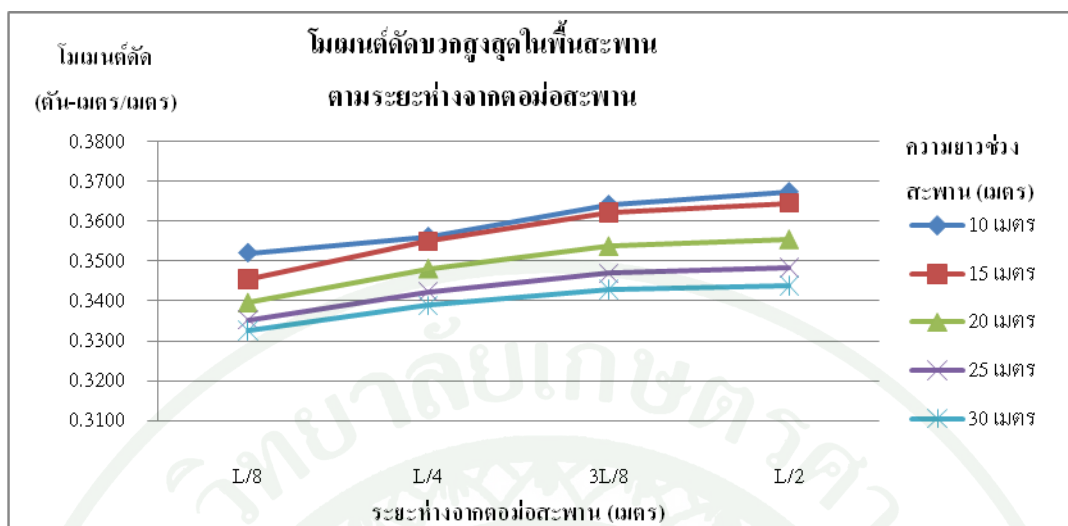
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์คดโค้ง(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์คดกลับ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)
2.50 (L/8)	1.13	0.3396	0.3458	1.83%	0.60	-0.1678	-0.1655	-1.26%
5.00 (L/4)	1.25	0.3481	0.3451	-0.87%	0.95	-0.1433	-0.1404	-2.05%
7.50 (3L/8)	1.30	0.3537	0.3511	-0.74%	1.13	-0.1356	-0.1331	-1.83%
10.00 (L/2)	1.30	0.3555	0.3570	0.45%	1.15	-0.1339	-0.1338	-0.07%

ตารางที่ 10 ค่าโมเมนต์คดโค้งและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีความยาวช่วง
สะพาน 25 เมตร

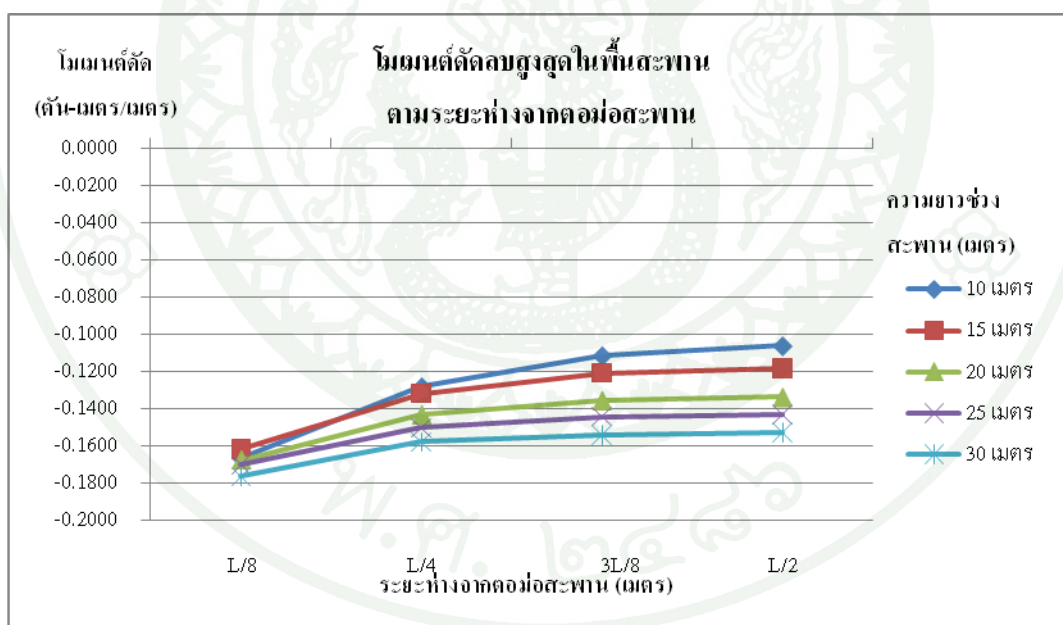
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์คดโค้ง(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์คดกลับ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)
3.125 (L/8)	1.16	0.3353	0.3359	0.20%	0.56	-0.1702	-0.1732	1.75%
6.250 (L/4)	1.25	0.3424	0.3429	0.16%	0.86	-0.1504	-0.1500	-0.28%
9.375 (3L/8)	1.30	0.3470	0.3489	0.55%	1.02	-0.1444	-0.1432	-0.81%
12.500 (L/2)	1.35	0.3483	0.3429	-1.54%	1.05	-0.1432	-0.1429	-0.20%

ตารางที่ 11 ค่าโมเมนต์คดโค้งและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีความยาวช่วง
สะพาน 30 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์คดโค้ง(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์คดกลับ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONTBEAM	ความ แตกต่าง (%)
3.75 (L/8)	1.19	0.3326	0.3258	-2.04%	0.54	-0.1766	-0.1776	0.56%
7.50 (L/4)	1.28	0.3389	0.3338	-1.48%	0.80	-0.1580	-0.1564	-1.06%
11.25 (3L/8)	1.30	0.3428	0.3450	0.63%	0.91	-0.1543	-0.1538	-0.37%
15.00 (L/2)	1.30	0.3439	0.3505	1.90%	0.95	-0.1530	-0.1524	-0.42%



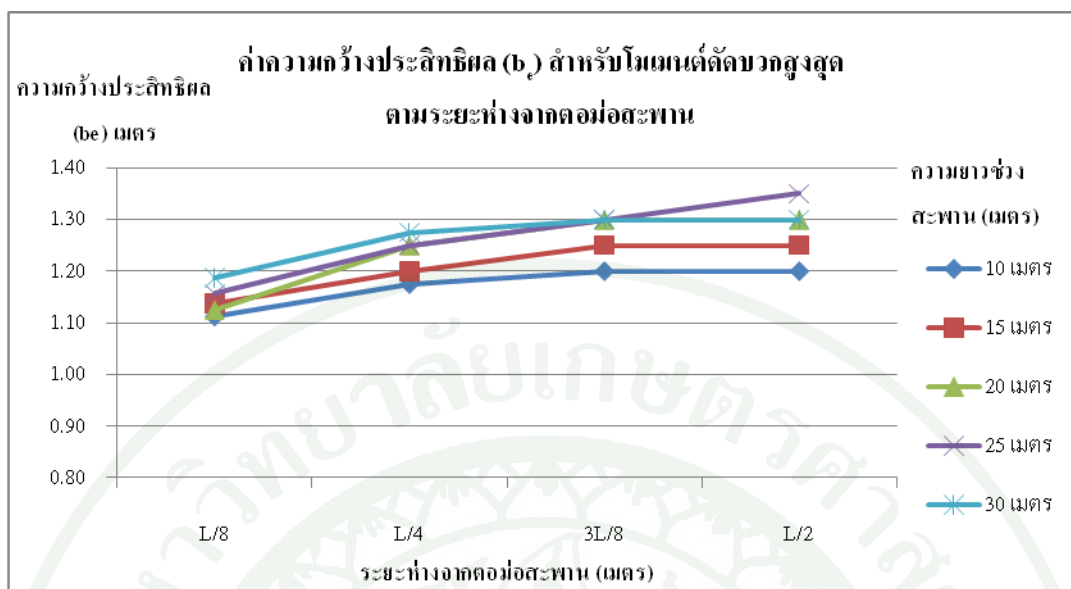
ภาพที่ 49 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน



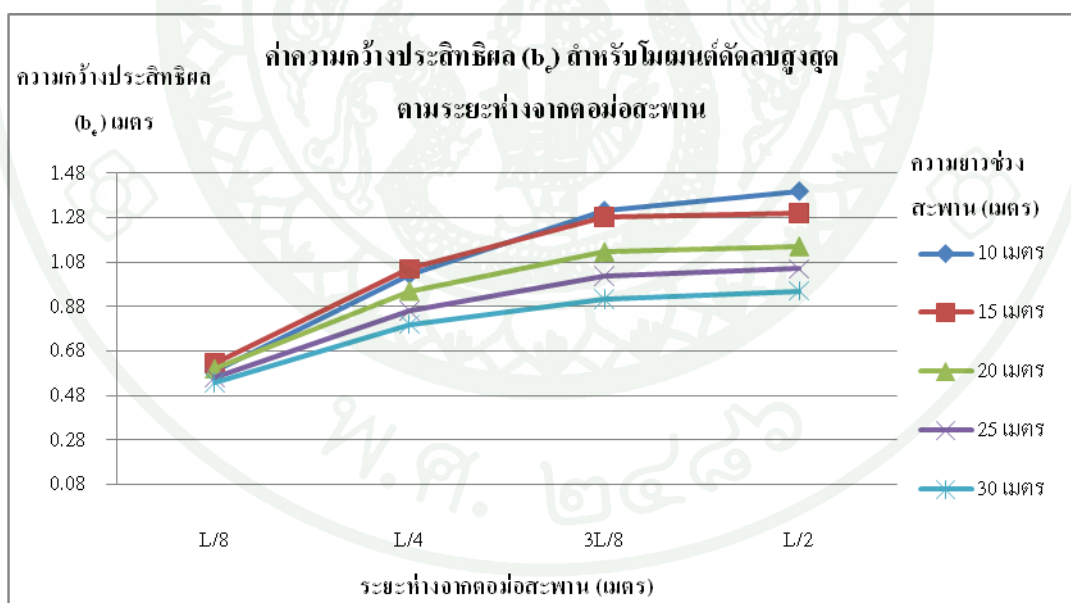
ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าในตำแหน่งที่ห่างจากตอม่อระยะเดียวกัน เมื่อความยาวช่วงสะพานเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ดัดบวกในพื้นที่สะพานมีค่าลดลงและค่าโมเมนต์ดัดลบในพื้นที่สะพานมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เป็นเพราะคานรองรับพื้นสะพานที่ใช้ในสะพานช่วงยาวกว่ามีค่าความแข็งแกร่งสัมพัทธ์ สูงกว่าคานรองรับพื้นสะพานช่วงที่สั้นกว่า ทำให้คานรองรับพื้นสะพานมีความแข็งแรงมากกว่า จึงมีการโก่งตัวน้อยกว่าเป็นผลให้พื้นสะพานมีการโก่งตัวน้อยกว่าไปด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่า เมื่อความยาวช่วงสะพานเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกในพื้นที่สะพานมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบในพื้นที่สะพานมีค่าน้อยลง ทั้งนี้เพราะโมเมนต์ดัดดังกล่าวข้างต้นเป็นโมเมนต์ดัดต่อความกว้างหนึ่งเมตรซึ่งแปรผกผันกับความกว้างประสิทธิผล

เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานกับระยะห่างจากตอม่อสะพาน พบว่า ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้นค่าของโมเมนต์ดัดบวกในพื้นที่สะพานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบในพื้นที่สะพานกลับมีค่าลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากตำแหน่งที่ห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้นคานรองรับพื้นสะพานจะมีการโก่งตัวมากขึ้น ทำให้พื้นสะพานแอ่นตัวมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างประสิทธิผล กับระยะห่างจากตอม่อสะพาน พบว่า ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวก และลบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้น และค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกค่อนข้างคงที่ มีความเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบ ทั้งนี้เพราะโมเมนต์ดัดบวกพิจารณาที่บริเวณกึ่งกลางช่วงพื้นสะพานแต่โมเมนต์ดัดลบพิจารณาที่บริเวณคานรองรับพื้นสะพานซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการโก่งตัวของคานรองรับพื้นสะพาน



ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน



ภาพที่ 52 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานแตกต่างกัน

ผลของจำนวนของคานรองรับพื้นสะพาน

ในการศึกษาถึงผลของจำนวนคานรองรับพื้นสะพานต่อโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานในกลุ่มที่สอง ได้พิจารณาเฉพาะตำแหน่งของพื้นสะพานที่ห่างจากตอม่อทุกระยะหนึ่งเมตร และที่ระยะ L/8, L/4, 3L/8 และ L/2 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 12 - 14 และกราฟที่ 53 - 56

ตารางที่ 12 แสดงค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีคานรองรับพื้นสะพานห้าคาน

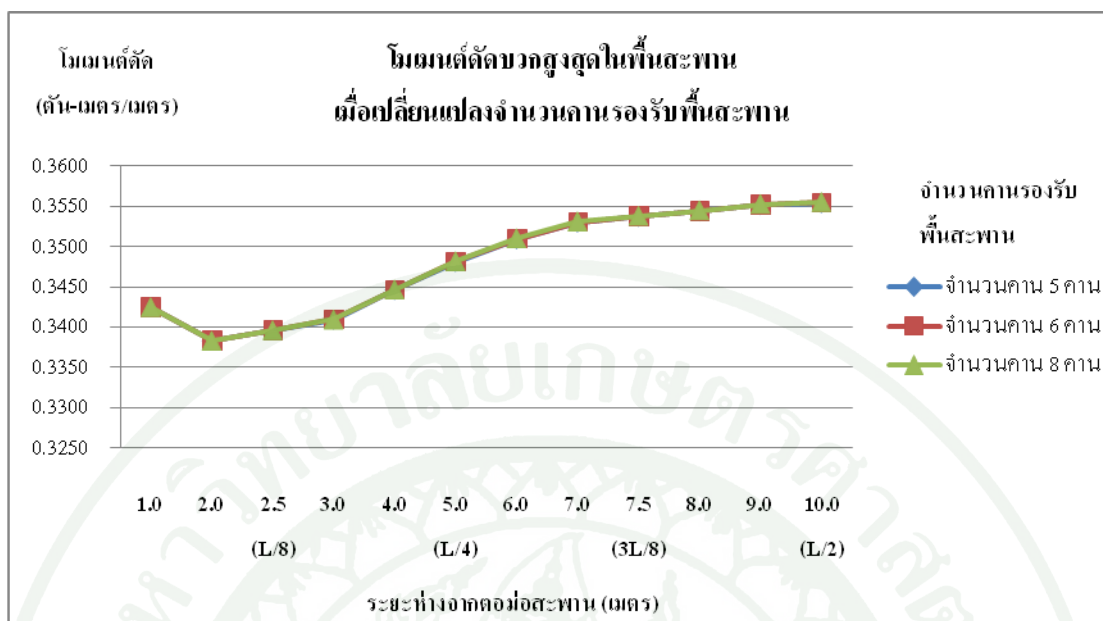
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.0	1.00	0.3425	0.3341	-2.44%	0.60	-0.1981	-0.2043	3.16%
2.0	1.05	0.3383	0.3404	0.61%	0.70	-0.1750	-0.1743	-0.44%
2.5 (L/8)	1.08	0.3396	0.3433	1.10%	0.75	-0.1677	-0.1650	-1.60%
3.0	1.10	0.3409	0.3463	1.58%	0.80	-0.1604	-0.1558	-2.87%
4.0	1.15	0.3446	0.3503	1.66%	0.90	-0.1502	-0.1488	-0.92%
5.0 (L/4)	1.20	0.3481	0.3508	0.76%	0.95	-0.1434	-0.1439	0.37%
6.0	1.25	0.3509	0.3486	-0.66%	1.00	-0.1390	-0.1359	-2.28%
7.0	1.25	0.3530	0.3563	0.93%	1.05	-0.1364	-0.1358	-0.43%
7.5 (3L/8)	1.28	0.3537	0.3532	-0.14%	1.08	-0.1357	-0.1349	-0.57%
8.0	1.30	0.3544	0.3501	-1.21%	1.15	-0.1349	-0.1335	-1.03%
9.0	1.30	0.3552	0.3531	-0.57%	1.15	-0.1341	-0.1335	-0.47%
10.0 (L/2)	1.30	0.3554	0.3542	-0.36%	1.15	-0.1339	-0.1342	0.23%

ตารางที่ 13 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีคานรองรับพื้น
สะพานหกคาน

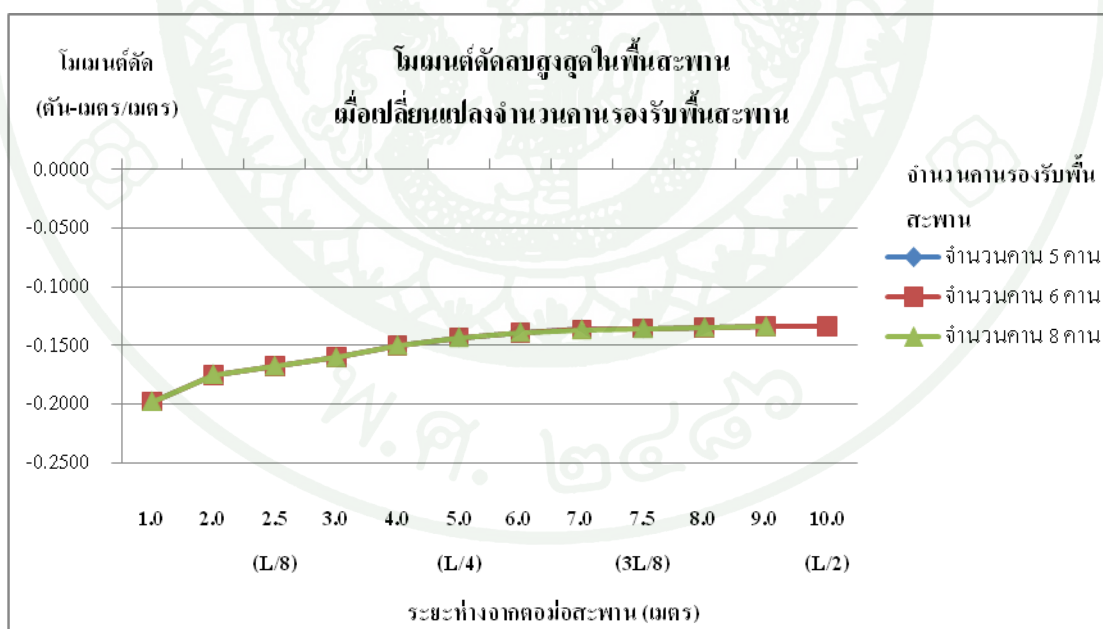
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3425	0.3465	1.17%	0.60	-0.1981	-0.2075	4.78%
2.00	1.10	0.3383	0.3453	2.05%	0.70	-0.1753	-0.1687	-3.80%
2.50 (L/8)	1.13	0.3396	0.3458	1.83%	0.75	-0.1678	-0.1655	-1.37%
3.00	1.15	0.3409	0.3464	1.60%	0.80	-0.1604	-0.1624	1.28%
4.00	1.20	0.3446	0.3467	0.59%	0.90	-0.1501	-0.1506	0.33%
5.00 (L/4)	1.25	0.3481	0.3451	-0.87%	0.95	-0.1433	-0.1404	-2.05%
6.00	1.25	0.3510	0.3540	0.86%	1.05	-0.1390	-0.1356	-2.46%
7.00	1.30	0.3531	0.3488	-1.20%	1.10	-0.1364	-0.1343	-1.54%
7.50 (3L/8)	1.30	0.3537	0.3511	-0.74%	1.13	-0.1356	-0.1331	-1.83%
8.00	1.30	0.3544	0.3534	-0.28%	1.15	-0.1349	-0.1320	-2.12%
9.00	1.30	0.3552	0.3561	0.26%	1.15	-0.1341	-0.1333	-0.57%
10.00 (L/2)	1.30	0.3555	0.3570	0.45%	1.15	-0.1339	-0.1338	-0.07%

ตารางที่ 14 ค่าโมเมนต์ดัดบวกลบและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีคานรองรับพื้น
สะพานแปดคาน

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3425	0.3465	1.16%	0.60	-0.1981	-0.2075	4.77%
2.00	1.10	0.3383	0.3453	2.05%	0.70	-0.1750	-0.1686	-3.64%
2.50 (L/8)	1.13	0.3396	0.3458	1.82%	0.75	-0.1677	-0.1655	-1.28%
3.00	1.15	0.3410	0.3464	1.59%	0.80	-0.1603	-0.1624	1.29%
4.00	1.20	0.3447	0.3467	0.58%	0.90	-0.1501	-0.1506	0.32%
5.00 (L/4)	1.25	0.3482	0.3451	-0.87%	0.95	-0.1433	-0.1404	-2.02%
6.00	1.25	0.3510	0.3540	0.84%	1.05	-0.1389	-0.1356	-2.41%
7.00	1.30	0.3531	0.3488	-1.23%	1.10	-0.1368	-0.1343	-1.84%
7.50 (3L/8)	1.30	0.3538	0.3510	-0.78%	1.13	-0.1358	-0.1331	-1.95%
8.00	1.30	0.3545	0.3533	-0.33%	1.15	-0.1348	-0.1320	-2.07%
9.00	1.30	0.3552	0.3560	0.20%	1.15	-0.1340	-0.1333	-0.52%
10.00 (L/2)	1.30	0.3555	0.3568	0.38%	1.15	-0.1338	-0.1337	-0.03%

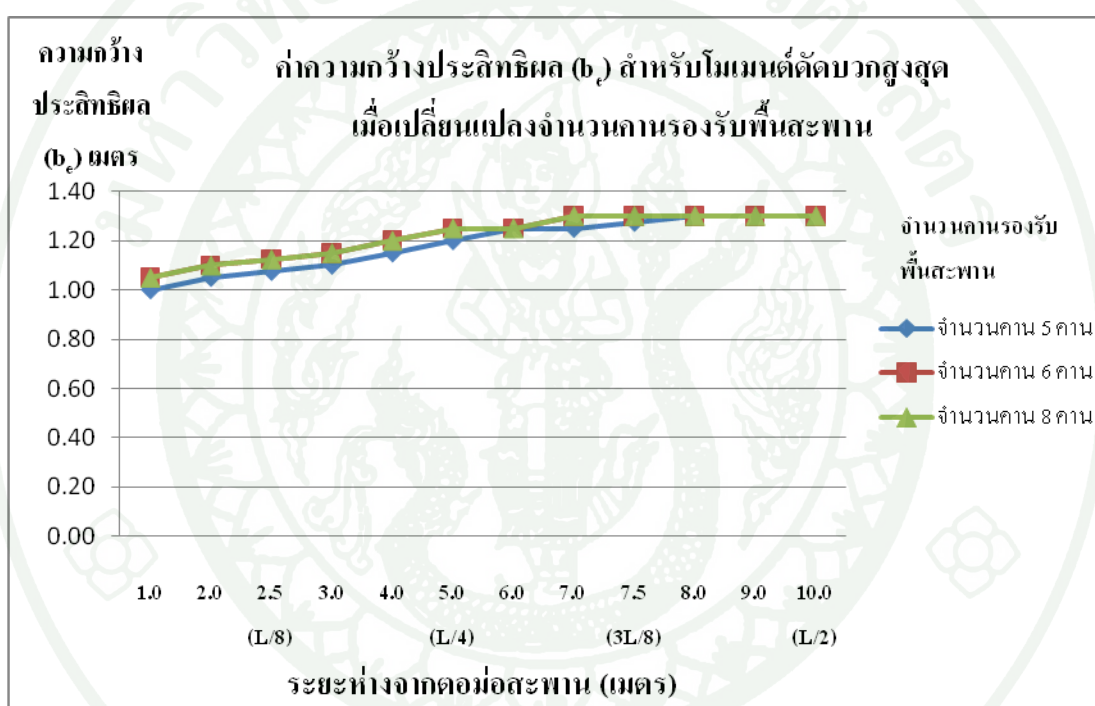


ภาพที่ 53 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน

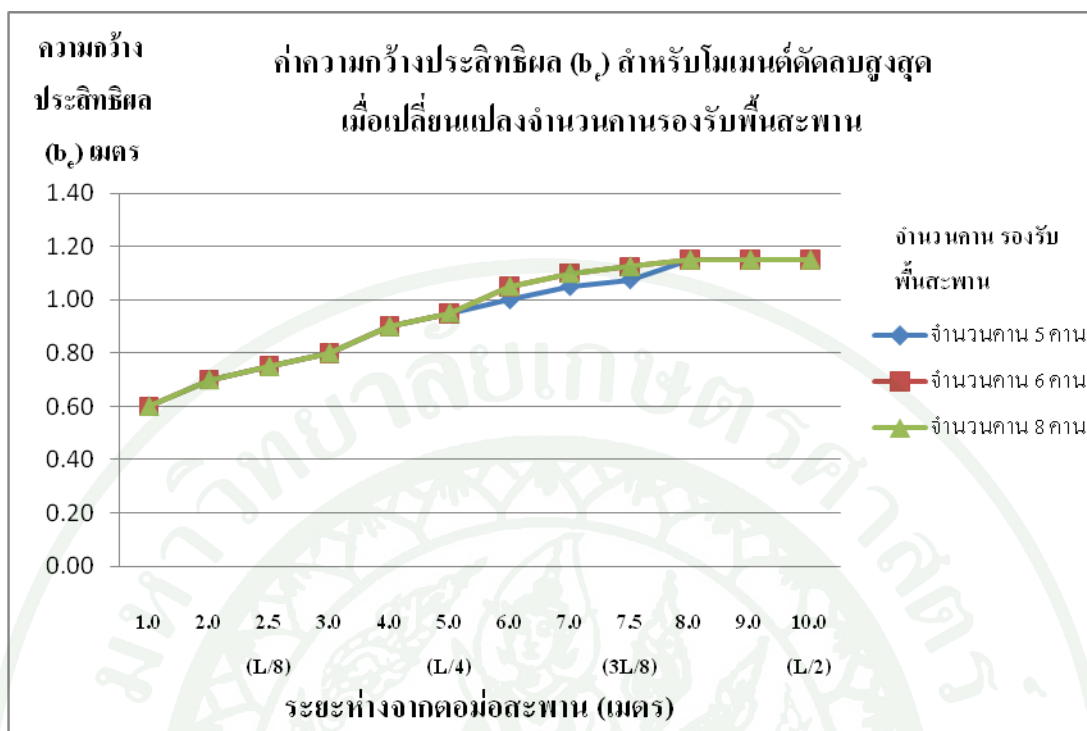


ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน

จากกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพานและจำนวนช่องจราจร โดยมีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานและความหนาของพื้นสะพานคงที่ โมเมนต์คัตแบก และลบสูงสุดในพื้นที่สะพานมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเมื่อจำนวนคานเพิ่มจาก 5 คานเป็น 6 คานและ 8 คาน ค่าโมเมนต์คัตแบกมีค่าเพิ่มขึ้น 0.0090 % และ 0.0082% ตามลำดับ และสำหรับโมเมนต์คัตกลับ เมื่อจำนวนคานเพิ่มจาก 5 คานเป็น 6 คานและ 8 คาน ค่าโมเมนต์คัตกลับมีค่าลดลง 0.0319 % และ 0.074% ตามลำดับ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพานมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อค่าโมเมนต์คัตแบกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน



ภาพที่ 55 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์คัตแบกสูงสุดในพื้นที่สะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน



ภาพที่ 56 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดลบ
สูงสุดในพื้นสะพานที่มีจำนวนคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของจำนวนคานรองรับพื้นสะพานต่อค่าความกว้างประสิทธิภาพพบว่า ความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานที่มีคานรองรับพื้นสะพานจำนวนห้าคาน สำหรับสะพานที่มีสองช่องจราจรแตกต่างจากพื้นสะพานที่มีคานรองรับพื้นสะพานจำนวนหกคาน สามช่องจราจร และแปดคาน สี่ช่องจราจร ดังนี้ โดยเมื่อจำนวนคานรองรับพื้นสะพานเพิ่มขึ้นจาก 5 คานไปเป็น 6 คาน และ 8 คาน ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดเพิ่มขึ้น 5 % และ 0% ตามลำดับ และค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดลบมีค่าเพิ่มขึ้น 5 % และ 0% ตามลำดับ กรณีที่จำนวนคานเพิ่มขึ้นจาก 6 คาน ไปเป็น 8 คาน ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบไม่มีการเปลี่ยนแปลง กรณีที่จำนวนคานเพิ่มขึ้นจาก 5 คานไปเป็น 6 คาน ค่าความกว้างประสิทธิภาพของโมเมนต์ดัดบวกและลบมีความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานคือที่กึ่งกลางช่วงสะพาน และบริเวณที่เกิดโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานคือที่บริเวณใกล้ตอม่อสะพาน พบว่าค่าความกว้างประสิทธิภาพมีค่าเท่ากัน แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพานมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน

ผลของระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพาน

ในการศึกษาถึงผลของระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพาน ต่อโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานนั้น ในกลุ่มที่ 3 ได้พิจารณาเฉพาะตำแหน่งของพื้นสะพานที่ห่างจากตอม่อทุกระยะหนึ่งเมตรและที่ระยะ L/8, L/4, 3L/8 และ L/2 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 15 - 19 และกราฟที่ 57-58

ตารางที่ 15 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพาน 1.50 เมตร

ระยะห่างจากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้างประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT-BEAM	ความแตกต่าง (%)	ความกว้างประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT-BEAM	ความแตกต่าง (%)
1.00	0.90	0.3178	0.3133	-1.43%	0.50	-0.1347	-0.1356	0.67%
2.00	0.95	0.3137	0.3077	-1.89%	0.55	-0.1297	-0.1312	1.20%
2.50 (L/8)	0.95	0.3145	0.3134	-0.36%	0.58	-0.1281	-0.1298	1.31%
3.00	0.95	0.3153	0.3190	1.18%	0.60	-0.1265	-0.1283	1.42%
4.00	1.00	0.3180	0.3144	-1.15%	0.65	-0.1247	-0.1254	0.59%
5.00 (L/4)	1.00	0.3207	0.3228	0.66%	0.70	-0.1238	-0.1225	-1.10%
6.00	1.00	0.3227	0.3295	2.10%	0.70	-0.1236	-0.1262	2.14%
7.00	1.05	0.3241	0.3200	-1.27%	0.75	-0.1236	-0.1215	-1.67%
7.50 (3L/8)	1.05	0.3246	0.3217	-0.89%	0.75	-0.1236	-0.1225	-0.95%
8.00	1.05	0.3251	0.3234	-0.50%	0.75	-0.1237	-0.1234	-0.23%
9.00	1.05	0.3256	0.3254	-0.03%	0.75	-0.1238	-0.1245	0.59%
10.00 (L/2)	1.05	0.3257	0.3261	0.13%	0.75	-0.1238	-0.1249	0.85%

ตารางที่ 16 ค่าโมเมนต์ดัดคดและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่าง
ระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 1.75 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดคด(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	0.90	0.3307	0.3333	0.80%	0.60	-0.1682	-0.1741	3.51%
2.00	1.00	0.3268	0.3200	-2.08%	0.65	-0.1520	-0.1559	2.55%
2.50 (L/8)	1.03	0.3279	0.3216	-1.92%	0.68	-0.1469	-0.1506	2.55%
3.00	1.05	0.3290	0.3232	-1.76%	0.70	-0.1418	-0.1454	2.55%
4.00	1.05	0.3322	0.3380	1.76%	0.75	-0.1352	-0.1358	0.39%
5.00 (L/4)	1.10	0.3352	0.3356	0.11%	0.90	-0.1312	-0.1311	-0.06%
6.00	1.15	0.3377	0.3317	-1.76%	0.90	-0.1289	-0.1243	-3.57%
7.00	1.15	0.3394	0.3381	-0.37%	0.90	-0.1276	-0.1274	-0.13%
7.50 (3L/8)	1.15	0.3405	0.3404	-0.03%	0.93	-0.1272	-0.1284	0.93%
8.00	1.15	0.3415	0.3426	0.31%	0.95	-0.1269	-0.1294	1.99%
9.00	1.20	0.3412	0.3325	-2.56%	0.95	-0.1266	-0.1306	3.11%
10.00 (L/2)	1.20	0.3414	0.3333	-2.37%	0.95	-0.1265	-0.1309	3.47%

ตารางที่ 17 ค่าโมเมนต์ดัดคดและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่าง
ระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.00 เมตร

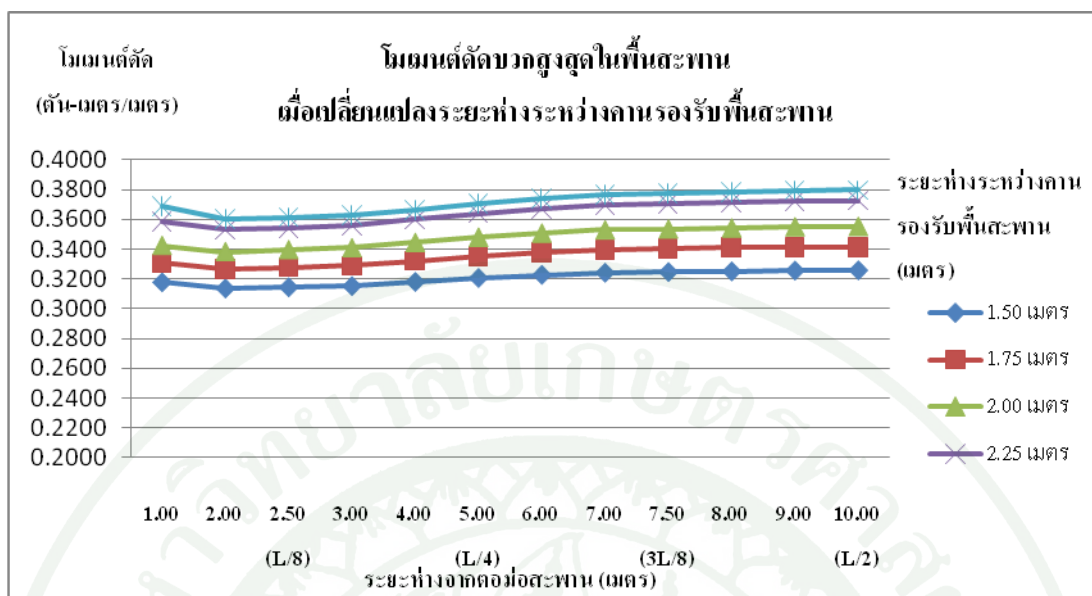
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดคด(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3425	0.3465	1.17%	0.60	-0.1981	-0.1986	0.27%
2.00	1.10	0.3383	0.3453	2.05%	0.70	-0.1753	-0.1687	-3.80%
2.50 (L/8)	1.13	0.3396	0.3458	1.83%	0.75	-0.1678	-0.1655	-1.37%
3.00	1.15	0.3409	0.3464	1.60%	0.80	-0.1604	-0.1624	1.28%
4.00	1.20	0.3446	0.3467	0.59%	0.90	-0.1501	-0.1506	0.33%
5.00 (L/4)	1.25	0.3481	0.3451	-0.87%	0.95	-0.1433	-0.1404	-2.05%
6.00	1.25	0.3510	0.3540	0.86%	1.05	-0.1390	-0.1356	-2.46%
7.00	1.30	0.3531	0.3488	-1.20%	1.10	-0.1364	-0.1343	-1.54%
7.50 (3L/8)	1.30	0.3537	0.3511	-0.74%	1.13	-0.1356	-0.1331	-1.83%
8.00	1.30	0.3544	0.3534	-0.28%	1.15	-0.1349	-0.1320	-2.12%
9.00	1.30	0.3552	0.3561	0.26%	1.15	-0.1341	-0.1333	-0.57%
10.00 (L/2)	1.30	0.3555	0.3570	0.45%	1.15	-0.1339	-0.1338	-0.07%

ตารางที่ 18 ค่าโมเมนต์ดัดคดและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่าง
ระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.25 เมตร

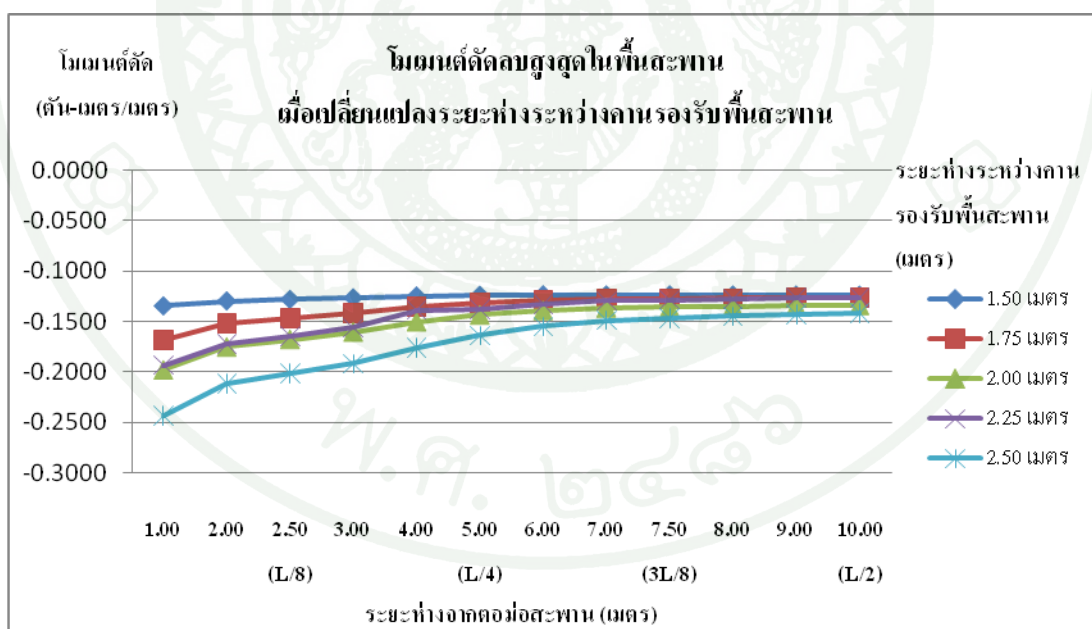
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดคด(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.15	0.3588	0.3634	1.28%	0.75	-0.1934	-0.2030	4.95%
2.00	1.25	0.3531	0.3484	-1.32%	0.75	-0.1723	-0.1647	-4.41%
2.50 (L/8)	1.28	0.3545	0.3496	-1.39%	0.78	-0.1642	-0.1625	-1.05%
3.00	1.30	0.3559	0.3508	-1.45%	0.80	-0.1562	-0.1603	2.66%
4.00	1.30	0.3600	0.3647	1.30%	0.85	-0.1387	-0.1382	-0.35%
5.00 (L/4)	1.35	0.3640	0.3639	-0.03%	0.95	-0.1378	-0.1352	-1.86%
6.00	1.40	0.3673	0.3612	-1.66%	1.10	-0.1326	-0.1306	-1.49%
7.00	1.40	0.3697	0.3681	-0.46%	1.20	-0.1294	-0.1286	-0.63%
7.50 (3L/8)	1.40	0.3706	0.3705	-0.03%	1.25	-0.1284	-0.1267	-1.34%
8.00	1.40	0.3714	0.3729	0.40%	1.30	-0.1275	-0.1249	-2.06%
9.00	1.40	0.3723	0.3757	0.91%	1.30	-0.1266	-0.1269	0.24%
10.00 (L/2)	1.40	0.3726	0.3767	1.08%	1.30	-0.1263	-0.1275	0.98%

ตารางที่ 19 ค่าโมเมนต์ดัดคดและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีระยะห่าง
ระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน 2.50 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดคด(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิผล (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.15	0.3688	0.3724	0.96%	0.75	-0.2436	-0.2390	-1.89%
2.00	1.25	0.3604	0.3643	1.09%	0.80	-0.2118	-0.2100	-0.87%
2.50 (L/8)	1.30	0.3615	0.3623	0.22%	0.85	-0.2018	-0.2019	0.03%
3.00	1.35	0.3626	0.3603	-0.65%	0.90	-0.1918	-0.1938	1.03%
4.00	1.40	0.3665	0.3667	0.03%	1.00	-0.1759	-0.1744	-0.85%
5.00 (L/4)	1.45	0.3705	0.3703	-0.08%	1.15	-0.1637	-0.1632	-0.32%
6.00	1.50	0.3740	0.3704	-0.95%	1.30	-0.1549	-0.1515	-2.22%
7.00	1.50	0.3766	0.3787	0.55%	1.35	-0.1488	-0.1491	0.19%
7.50 (3L/8)	1.53	0.3775	0.3762	-0.36%	1.38	-0.1468	-0.1474	0.39%
8.00	1.55	0.3785	0.3737	-1.26%	1.40	-0.1448	-0.1457	0.59%
9.00	1.55	0.3795	0.3770	-0.66%	1.45	-0.1426	-0.1418	-0.56%
10.00 (L/2)	1.55	0.3799	0.3781	-0.47%	1.45	-0.1419	-0.1420	0.08%



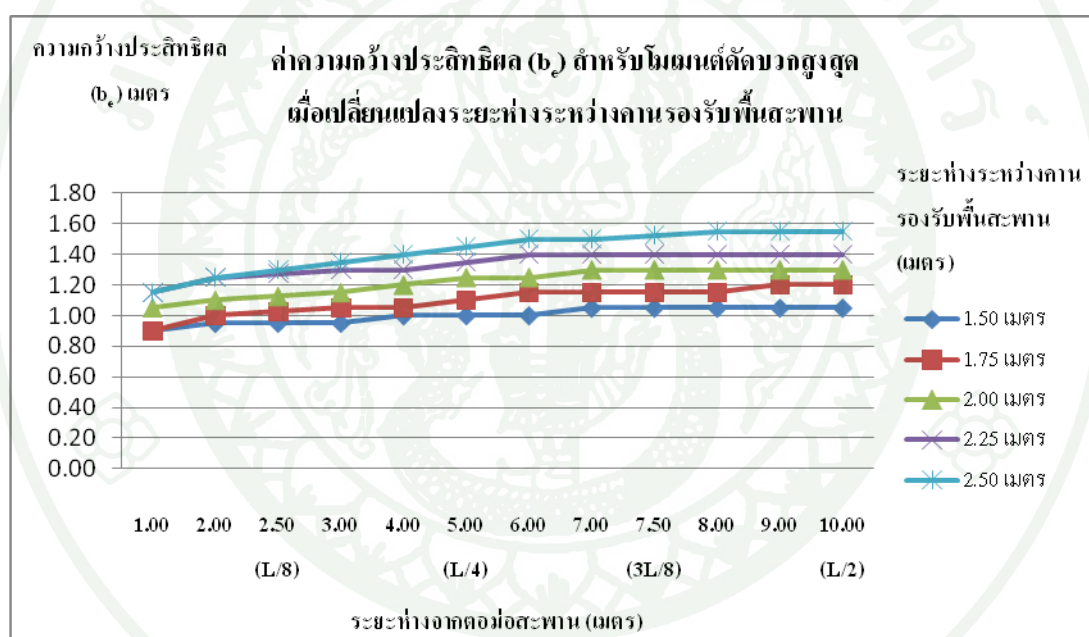
ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน



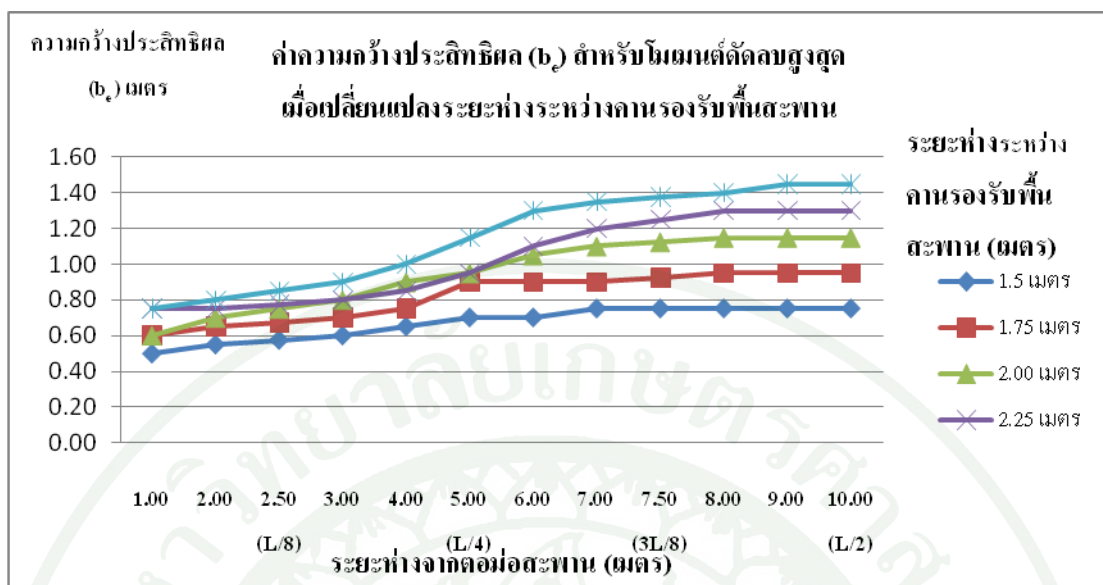
ภาพที่ 58 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพาน ส่งผลชัดเจนต่อค่าโมเมนต์ดัดบวม และลบสูงสุดในพื้นที่สะพาน ค่าโมเมนต์ดัดบวมและลบสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพานเพิ่มขึ้น โดยเมื่อระยะห่างระหว่างคานาเพิ่มจาก 1.50 เมตร เป็น 1.75, 2.00, 2.25 และ 2.50 เมตร โมเมนต์ดัดบวมสูงสุดเพิ่มขึ้น 5.07%, 9.13%, 14.41%, และ 16.63% ตามลำดับ ในขณะที่โมเมนต์ดัดลบมีค่าเพิ่มขึ้น 24.9%, 47.06%, 43.61%, 80.85% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนต์ดัดบวมและลบสูงสุดในพื้นที่สะพานที่ตำแหน่งต่างๆ บนสะพานตามระยะที่ห่างจากตอม่อ พบว่า โมเมนต์ดัดบวมสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากตอม่อเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่โมเมนต์ดัดลบสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากตอม่อเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวมสูงสุดในพื้นที่สะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน



ภาพที่ 60 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นที่สะพานที่มีระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพานแตกต่างกัน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพาน สำหรับโมเมนต์ดัดบวก และลบสูงสุด กับค่าระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพานพบว่า ความกว้างประสิทธิภาพของโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นที่สะพาน มีค่ามากขึ้นตามระยะห่างระหว่างคานารองรับพื้นสะพาน โดยมีระยะห่างระหว่างคานามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.50 เมตร เป็น 1.75, 2.00, 2.25 และ 2.50 เมตร ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดเพิ่มขึ้น 15.00%, 25.00%, 40.00% และ 50.00% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดเพิ่มขึ้น 28.57%, 53.33%, 73.33% และ 93.33% ตามลำดับ

ผลของความหนาของพื้นสะพาน

ในการศึกษาถึงผลของความหนาของพื้นสะพานต่อโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานในกลุ่มที่ 4 ได้พิจารณาเฉพาะตำแหน่งของพื้นสะพานที่ห่างจากตอม่อทุกระยะหนึ่งเมตรและที่ระยะ $L/8$, $L/4$, $3L/8$ และ $L/2$ เมตร ดังแสดงในตารางที่ 20 - 24 และกราฟที่ 61 - 62

ตารางที่ 20 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา
0.150 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3372	0.3424	1.53%	0.60	-0.2045	-0.2132	4.26%
2.00	1.10	0.3329	0.3338	0.27%	0.65	-0.1882	-0.1874	-0.42%
2.50 (L/8)	1.13	0.3332	0.3307	-0.77%	0.68	-0.1827	-0.1832	0.26%
3.00	1.15	0.3336	0.3276	-1.81%	0.70	-0.1772	-0.1790	0.99%
4.00	1.15	0.3354	0.3357	0.10%	0.75	-0.1685	-0.1734	2.88%
5.00 (L/4)	1.20	0.3374	0.3303	-2.13%	0.80	-0.1620	-0.1589	-1.91%
6.00	1.20	0.3394	0.3363	-0.90%	0.85	-0.1573	-0.1570	-0.17%
7.00	1.20	0.3410	0.3411	0.02%	0.85	-0.1541	-0.1528	-0.84%
7.50 (3L/8)	1.20	0.3416	0.3428	0.35%	0.85	-0.1531	-0.1503	-1.79%
8.00	1.20	0.3422	0.3445	0.67%	0.85	-0.1520	-0.1479	-2.75%
9.00	1.20	0.3429	0.3466	1.05%	0.85	-0.1509	-0.1498	-0.75%
10.00 (L/2)	1.20	0.3432	0.3472	1.18%	0.90	-0.1505	-0.1522	1.12%

ตารางที่ 21 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา
0.175 เมตร

ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3400	0.3442	1.22%	0.65	-0.2021	-0.1978	-2.12%
2.00	1.10	0.3356	0.3389	0.99%	0.70	-0.1824	-0.1754	-3.84%
2.50 (L/8)	1.13	0.3364	0.3376	0.34%	0.73	-0.1758	-0.1752	-0.35%
3.00	1.15	0.3372	0.3362	-0.30%	0.75	-0.1693	-0.1751	3.41%
4.00	1.15	0.3399	0.3473	2.16%	0.80	-0.1597	-0.1640	2.66%
5.00 (L/4)	1.20	0.3428	0.3438	0.31%	0.85	-0.1529	-0.1552	1.50%
6.00	1.20	0.3453	0.3515	1.81%	0.90	-0.1483	-0.1478	-0.30%
7.00	1.25	0.3472	0.3445	-0.78%	0.95	-0.1453	-0.1459	0.39%
7.50 (3L/8)	1.25	0.3479	0.3466	-0.39%	0.95	-0.1444	-0.1443	-0.09%
8.00	1.25	0.3486	0.3486	0.00%	0.95	-0.1435	-0.1427	-0.58%
9.00	1.25	0.3494	0.3510	0.47%	0.95	-0.1425	-0.1444	1.31%
10.00 (L/2)	1.25	0.3497	0.3518	0.62%	0.95	-0.1422	-0.1450	1.93%

ตารางที่ 22 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา
0.200 เมตร

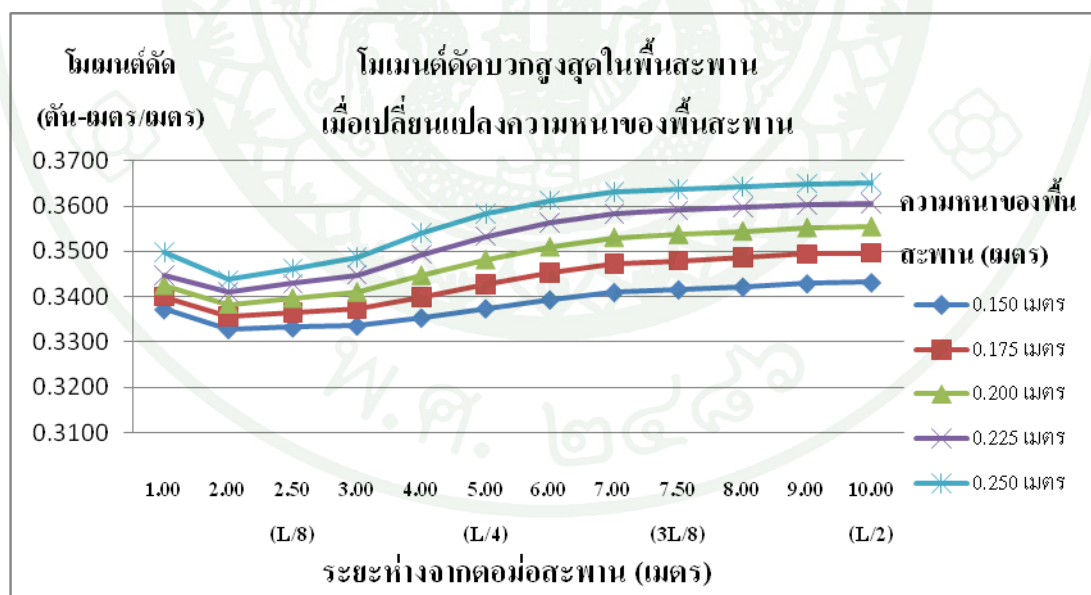
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3425	0.3465	1.17%	0.60	-0.1981	-0.1986	0.27%
2.00	1.10	0.3383	0.3453	2.05%	0.70	-0.1753	-0.1687	-3.80%
2.50 (L/8)	1.13	0.3396	0.3458	1.83%	0.75	-0.1678	-0.1655	-1.37%
3.00	1.15	0.3409	0.3464	1.60%	0.80	-0.1604	-0.1624	1.28%
4.00	1.20	0.3446	0.3467	0.59%	0.90	-0.1501	-0.1506	0.33%
5.00 (L/4)	1.25	0.3481	0.3451	-0.87%	0.95	-0.1433	-0.1404	-2.05%
6.00	1.25	0.3510	0.3540	0.86%	1.05	-0.1390	-0.1356	-2.46%
7.00	1.30	0.3531	0.3488	-1.20%	1.10	-0.1364	-0.1343	-1.54%
7.50 (3L/8)	1.30	0.3537	0.3511	-0.74%	1.13	-0.1356	-0.1331	-1.83%
8.00	1.30	0.3544	0.3534	-0.28%	1.15	-0.1349	-0.1320	-2.12%
9.00	1.30	0.3552	0.3561	0.26%	1.15	-0.1341	-0.1333	-0.57%
10.00 (L/2)	1.30	0.3555	0.3570	0.45%	1.15	-0.1339	-0.1338	-0.07%

ตารางที่ 23 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา
0.225 เมตร

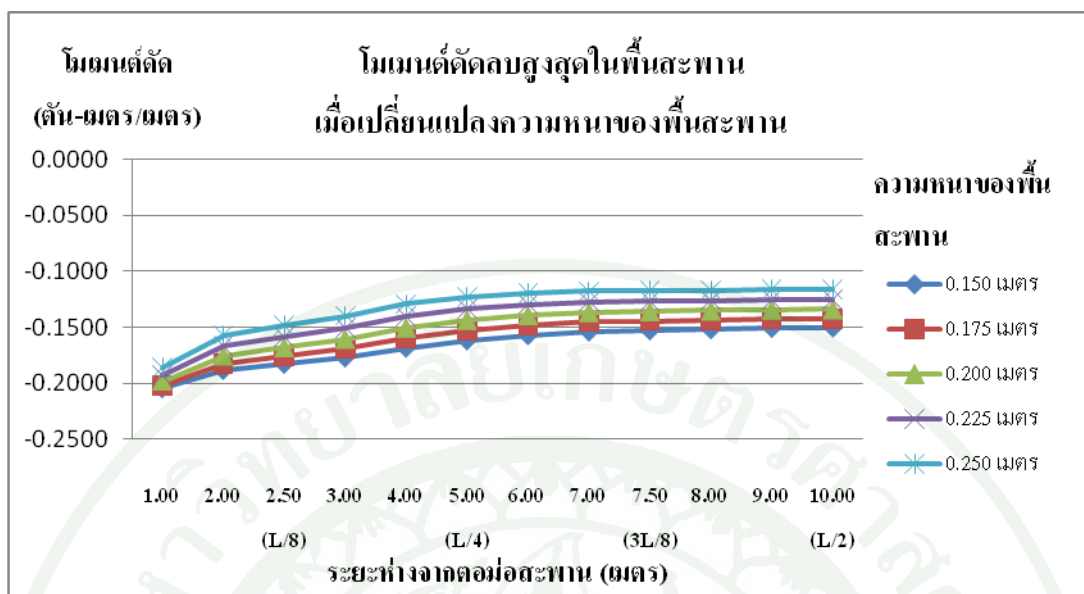
ระยะห่าง จากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT- BEAM	ความ แตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3447	0.3494	1.36%	0.65	-0.1927	-0.2002	3.91%
2.00	1.15	0.3410	0.3384	-0.77%	0.70	-0.1664	-0.1646	-1.13%
2.50 (L/8)	1.18	0.3429	0.3410	-0.55%	0.75	-0.1585	-0.1563	-1.38%
3.00	1.20	0.3448	0.3437	-0.33%	0.80	-0.1505	-0.1480	-1.65%
4.00	1.25	0.3494	0.3471	-0.65%	0.95	-0.1400	-0.1418	1.29%
5.00 (L/4)	1.25	0.3533	0.3599	1.87%	1.10	-0.1334	-0.1337	0.23%
6.00	1.30	0.3563	0.3573	0.27%	1.20	-0.1294	-0.1292	-0.18%
7.00	1.35	0.3584	0.3529	-1.52%	1.25	-0.1272	-0.1277	0.42%
7.50 (3L/8)	1.35	0.3590	0.3554	-1.01%	1.28	-0.1266	-0.1264	-0.15%
8.00	1.35	0.3597	0.3579	-0.49%	1.30	-0.1260	-0.1251	-0.72%
9.00	1.35	0.3604	0.3608	0.12%	1.30	-0.1254	-0.1260	0.48%
10.00 (L/2)	1.35	0.3606	0.3618	0.32%	1.30	-0.1253	-0.1263	0.86%

ตารางที่ 24 ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานสำหรับสะพานที่มีพื้นสะพานหนา 0.250 เมตร

ระยะห่างจากตอม่อ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก(ตัน-เมตร/เมตร)				โมเมนต์ดัดลบ(ตัน-เมตร/เมตร)			
	ความกว้างประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT-BEAM	ความแตกต่าง (%)	ความกว้างประสิทธิภาพ (เมตร)	SAP	CONT-BEAM	ความแตกต่าง (%)
1.00	1.05	0.3498	0.3529	0.88%	0.70	-0.1861	-0.1877	0.90%
2.00	1.15	0.3437	0.3465	0.80%	0.75	-0.1569	-0.1533	-2.28%
2.50 (L/8)	1.20	0.3462	0.3443	-0.54%	0.85	-0.1484	-0.1478	-0.38%
3.00	1.25	0.3487	0.3422	-1.86%	0.95	-0.1399	-0.1424	1.74%
4.00	1.25	0.3540	0.3602	1.74%	1.20	-0.1293	-0.1247	-3.61%
5.00 (L/4)	1.30	0.3582	0.3617	0.97%	1.30	-0.1231	-0.1224	-0.59%
6.00	1.35	0.3612	0.3606	-0.16%	1.40	-0.1196	-0.1180	-1.35%
7.00	1.35	0.3632	0.3684	1.43%	1.45	-0.1178	-0.1163	-1.28%
7.50 (3L/8)	1.38	0.3638	0.3652	0.40%	1.45	-0.1173	-0.1168	-0.43%
8.00	1.40	0.3643	0.3620	-0.64%	1.45	-0.1169	-0.1174	0.42%
9.00	1.40	0.3649	0.3650	0.03%	1.45	-0.1165	-0.1179	1.27%
10.00 (L/2)	1.40	0.3651	0.3660	0.25%	1.45	-0.1164	-0.1181	1.52%



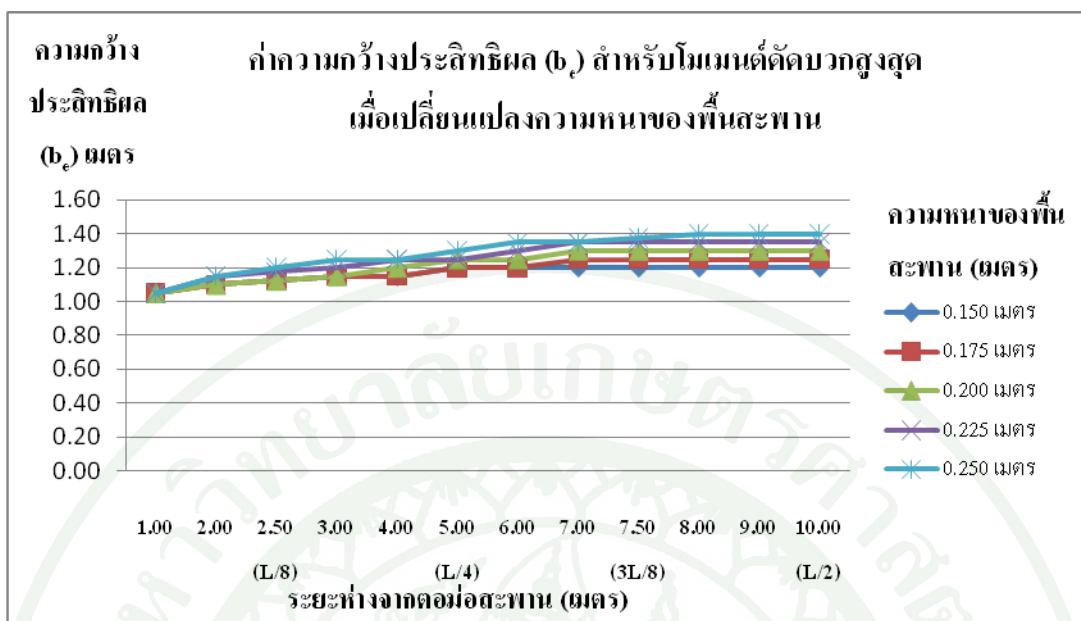
ภาพที่ 61 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนาพื้นสะพานแตกต่างกัน



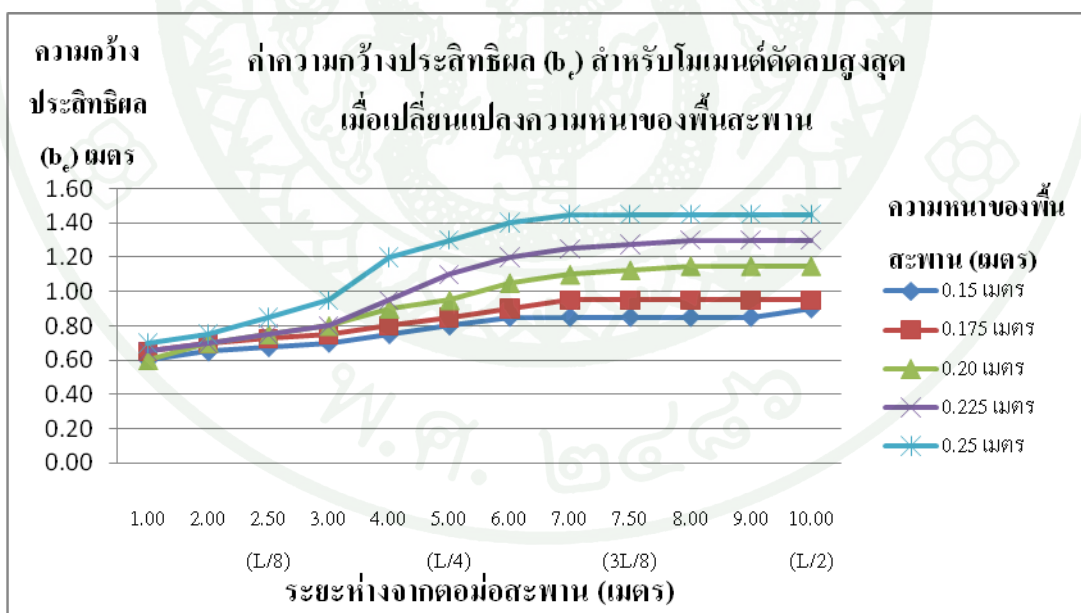
ภาพที่ 62 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนาพื้นสะพานแตกต่างกัน

ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของพื้นสะพานที่มีต่อค่าโมเมนต์ดัดบวก และลบสูงสุดในพื้นสะพาน ดังนี้คือ เมื่อความหนาของพื้นสะพานเพิ่มขึ้นจาก 0.150 เมตรเป็น 0.175, 0.200, 0.225 และ 0.250 เมตร ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดเพิ่มขึ้น 1.89%, 3.58%, 5.10% และ 6.49% เทียบกับความหนาพื้นสะพาน 0.150 เมตรตามลำดับ ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดจะมีค่าน้อยลง 5.74%, 11.64%, 17.71% และ 24.02% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากตอม่อสะพานพบว่า ที่ระยะห่างจากตอม่อเพิ่มขึ้นจาก L/8 เป็น L/4, 3L/8, และ L/2 ตามลำดับ ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดเพิ่มขึ้น 2.50%, 4.16% และ 4.66% ตามลำดับ และมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางช่วงสะพาน ส่วนค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดจะมีค่าสูงที่สุดใกล้ๆ กับตอม่อ และจะมีค่าลดลงเมื่อห่างจากตอม่อออกมาจนถึงกึ่งกลางช่วงสะพาน โดยที่ระยะห่างจากตอม่อเพิ่มขึ้นจาก L/8 เป็น L/4, 3L/8, และ L/2 ค่าโมเมนต์ดัดลบมีค่าลดลง 14.59%, 19.20%, 20.25%ตามลำดับ



ภาพที่ 63 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวก
สูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนาพื้นสะพานแตกต่างกัน



ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดลบ
สูงสุดในพื้นสะพานที่มีความหนาพื้นสะพานแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดบวก และโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานอย่างชัดเจนที่สุดคือ ค่าระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน รองลงมาคือ ความหนาของพื้นสะพาน สำหรับตัวแปรความยาวช่วงสะพานนั้น เนื่องจากการใช้คานรองรับพื้นสะพานขนาดต่างๆ กันไป จึงทำให้มีความแข็งแกร่งแรงดัดของคานรองรับพื้นสะพานเข้ามาเกี่ยวข้อง พื้นสะพานที่รองรับด้วยคานที่มีความแข็งแกร่งแรงดัดสูงจะโก่งตัวน้อยทำให้โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดมีค่าน้อยกว่า และโมเมนต์ดัดลบสูงสุดมีค่ามากกว่าพื้นสะพานที่รองรับด้วยคานที่มีความแข็งแกร่งแรงดัดต่ำกว่าสำหรับความยาวช่วงสะพานเดียวกันทำให้การวิเคราะห์ผลของตัวแปรดังกล่าวไม่ชัดเจน ส่วนจำนวนของคานรองรับพื้นสะพานนั้น มีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดบวกและค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญแต่มีผลต่อค่าความกว้างประสิทธิผลอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นตัวแปรจำนวนคานรองรับพื้นสะพานจึงไม่นำไปใช้ในการสร้างสมการเพื่อคำนวณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน แต่จะนำไปใช้คำนวณค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุดต่อไป

จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ โดยพิจารณาให้ตัวแปรหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ตัวแปรที่เหลือคงที่ พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างจากตอม่อเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากตอม่อเพิ่มมากขึ้น ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าตัวแปรที่ศึกษาแต่ละตัวมีค่าสูงสุด นั่นคือ เมื่อระยะห่างระหว่างคานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.50 เมตร ความหนาของพื้นสะพานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.250 เมตร ยกเว้นจำนวนคานรองรับพื้นสะพานที่ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานไม่แตกต่างกันมากนัก และค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดจะมีค่าต่ำสุดเมื่อค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างคานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.50 เมตร เมื่อความหนาของพื้นสะพานมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 0.15 เมตร สำหรับค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดนั้นพบว่าค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างคานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.50 เมตร และมีค่าต่ำสุดเมื่อระยะห่างระหว่างคานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.50 เมตร ในขณะที่ความหนาของพื้นสะพานให้ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดมีค่าน้อยสุดเมื่อความหนาของพื้นสะพานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.25 เมตร และค่าโมเมนต์ดัดลบมีค่ามากที่สุดเมื่อความหนาของพื้นสะพานมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 0.15 เมตร

ในส่วน of ค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพาน สำหรับทุกๆ ตัวแปรที่ทำการศึกษพบว่า ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและโมเมนต์ดัดลบสูงสุดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้น ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและโมเมนต์

ดัดลบจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าตัวแปรที่ศึกษาแต่ละตัวมีค่าสูงสุด กล่าวคือ เมื่อจำนวนคานรองรับพื้นสะพานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 8 คาน ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.50 เมตร ความหนาของพื้นสะพานมีค่ามากที่สุด 0.250 เมตร และค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและโมเมนต์ดัดลบสูงสุดมีค่าต่ำสุด เมื่อจำนวนคานรองรับพื้นสะพานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 5 คาน ระยะห่างระหว่างคานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.50 เมตร ความหนาของพื้นสะพานมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.150 เมตร

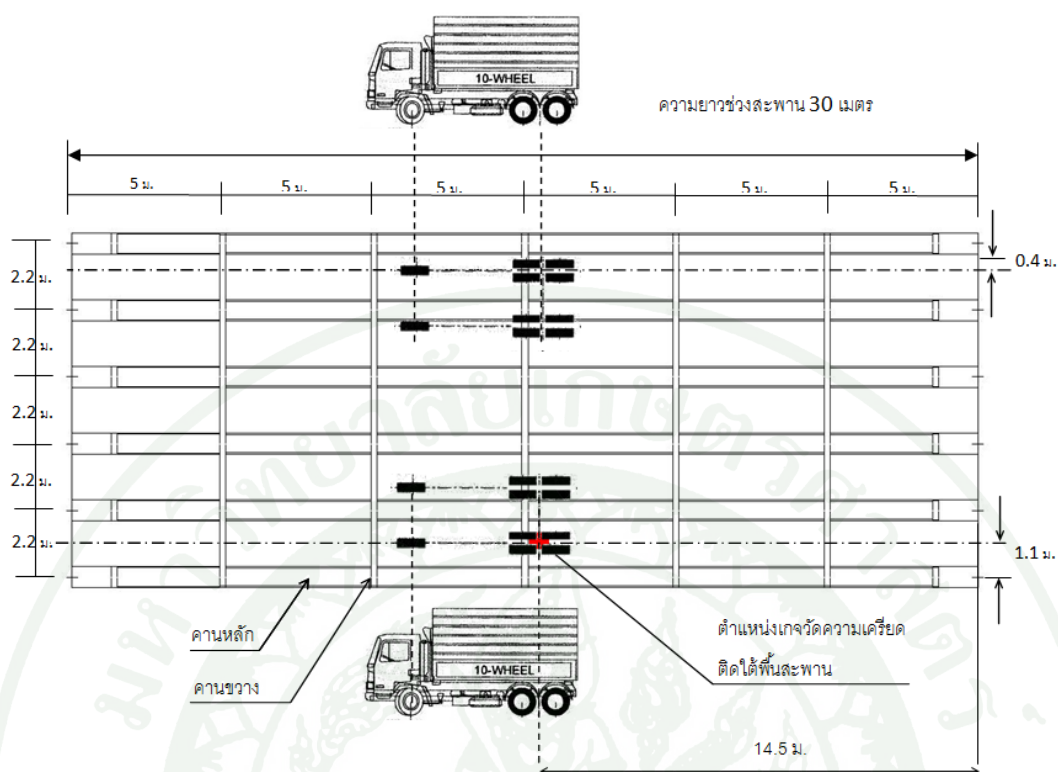
จากตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการศึกษา สามารถนำไปวิเคราะห์ในเชิงสถิติเพื่อหาสูตรในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดบวกและค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน ค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวก และโมเมนต์ดัดลบสูงสุด ต่อไป

3. การทดสอบสะพานในสนาม

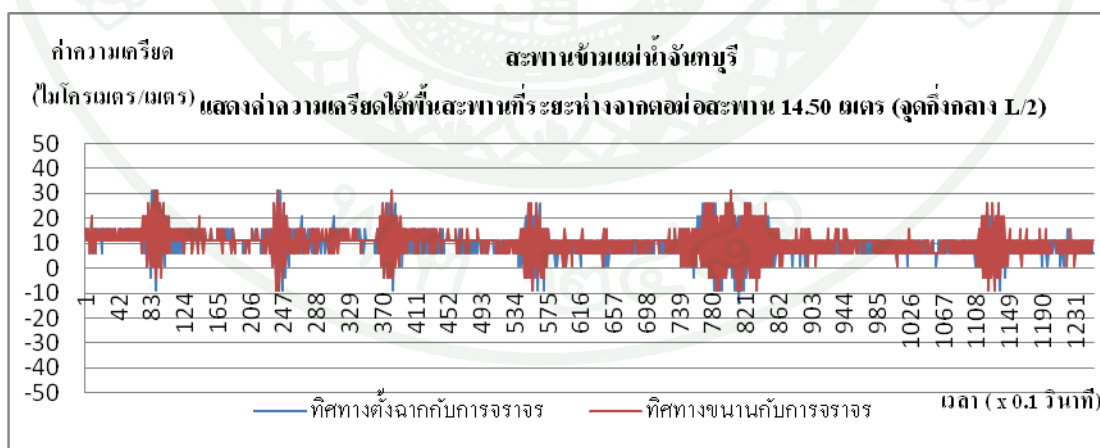
ผลจากการวัดค่าการเปลี่ยนรูป(deformation)ของพื้นสะพานตามตำแหน่งรอบรถทุกที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานที่ได้มาจากโปรแกรม CONTBEAM โดยติดตั้งเกจวัดความเครียดทั้งบนและใต้พื้นสะพาน และมีรถบรรทุกสปีดหนัก 25 ตัน กระทำบนสะพานในแบบสถิตยได้ผลดังนี้

3.1 สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี

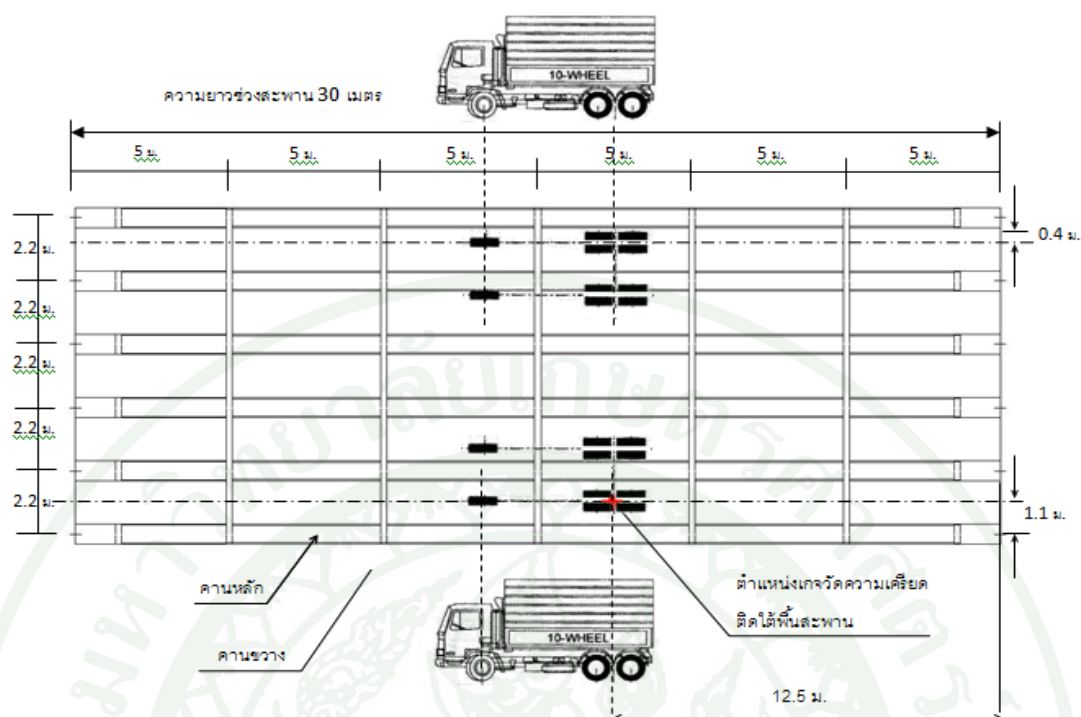
สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีมีความยาวช่วงสะพาน 30 เมตร ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียดทั้งบนและใต้พื้นสะพานมีสี่ตำแหน่งคือ $L/2$, $3L/8$, $L/4$ และ $L/8$ เมื่อ L มีค่าเท่ากับ 30 เมตร ทำให้ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 15, 11.25, 7.5 และ 3.75 เมตรตามลำดับ แต่เนื่องจากสะพานมีคานขวาง (diaphragm) ที่ทุกระยะ 5 เมตร ทำให้ตำแหน่งที่ $L/2 = 15$ เมตร และ $3L/8 = 11.25$ เมตร มีตำแหน่งตรงกับคานขวางและใกล้กับคานขวางตามลำดับ ทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปของพื้นสะพานมีค่าน้อย จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียดไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างคานเสริมคือที่ระยะ 12.50, 7.50 และ 2.50 เมตร เพื่อให้วัดค่าความเครียดได้ชัดเจน ยกเว้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสะพาน ($L/2$) เนื่องจากต้องการระยะที่ใกล้กับจุดกึ่งกลางช่วงสะพานที่สุดจึงเลื่อนมาที่ตำแหน่ง 14.50 เมตร เพื่อให้ตรงกับตำแหน่งคานขวางดังแสดง



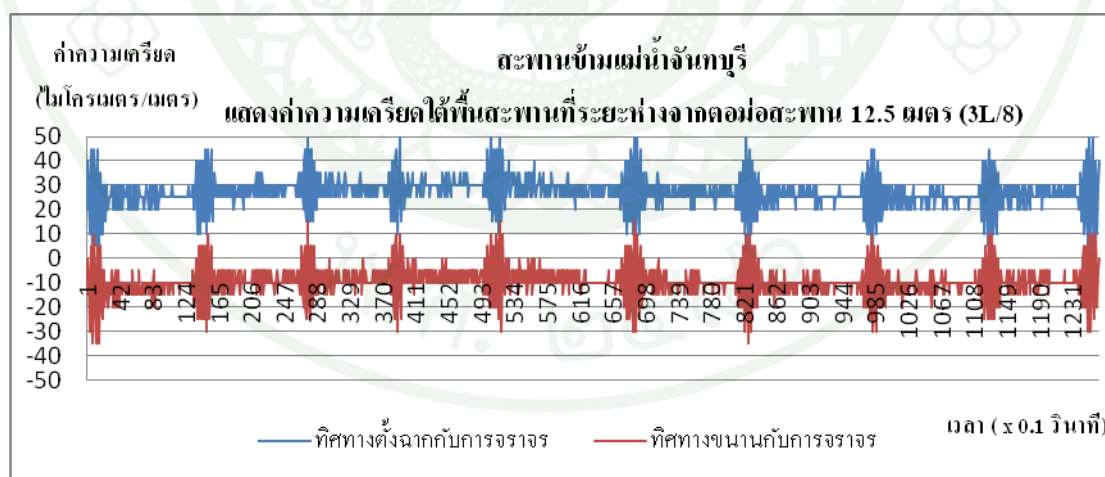
ภาพที่ 65 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 14.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดได้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



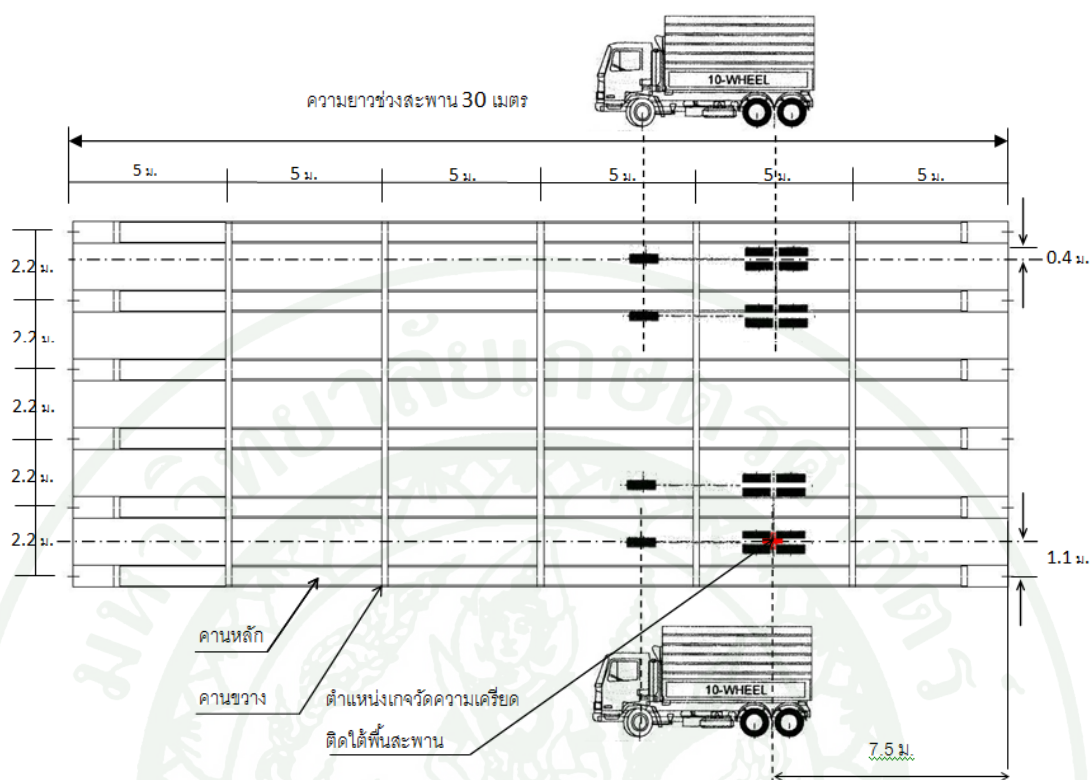
ภาพที่ 66 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 14.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



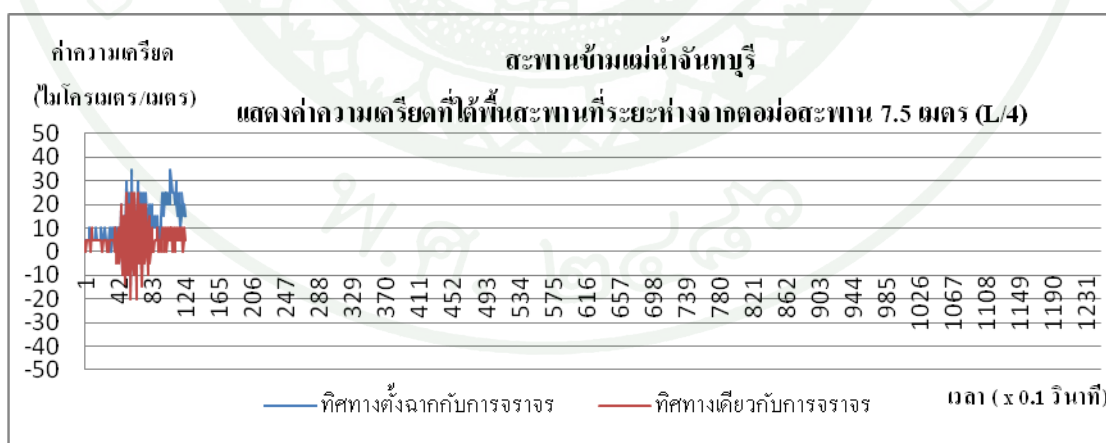
ภาพที่ 67 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกทุกสลิปสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



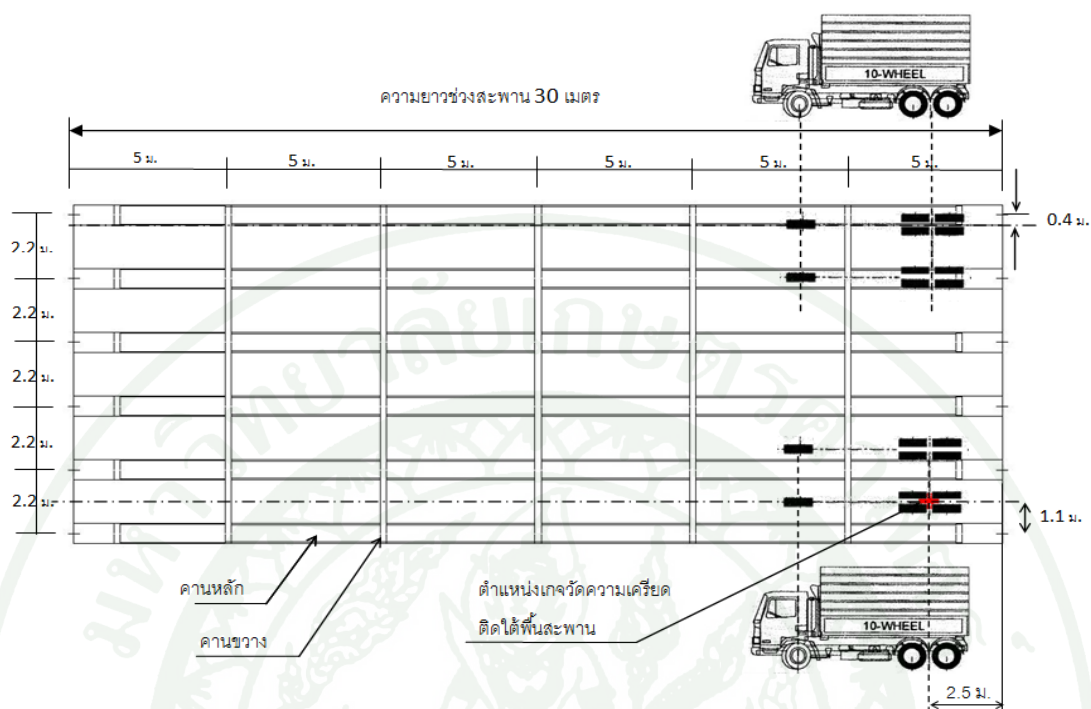
ภาพที่ 68 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



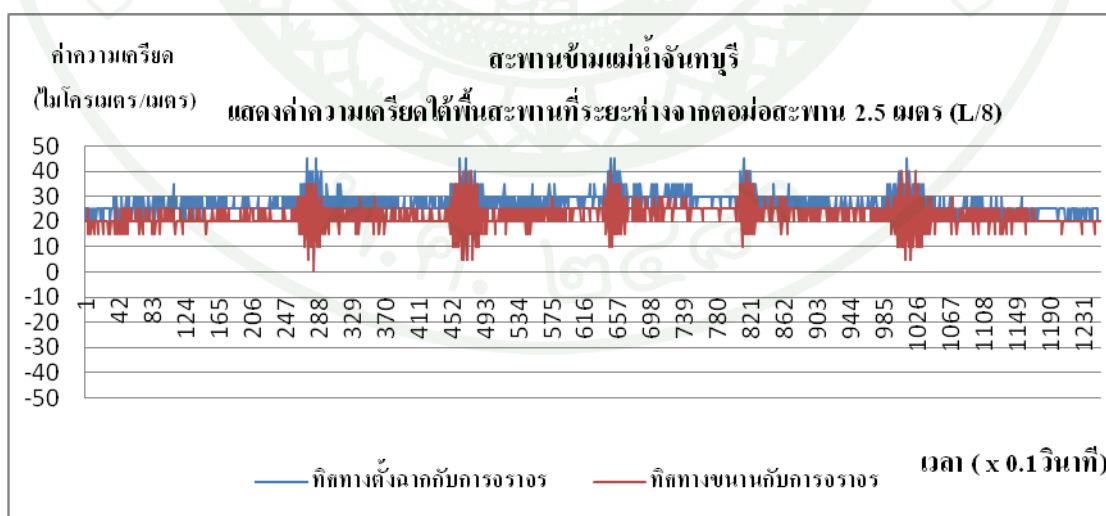
ภาพที่ 69 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



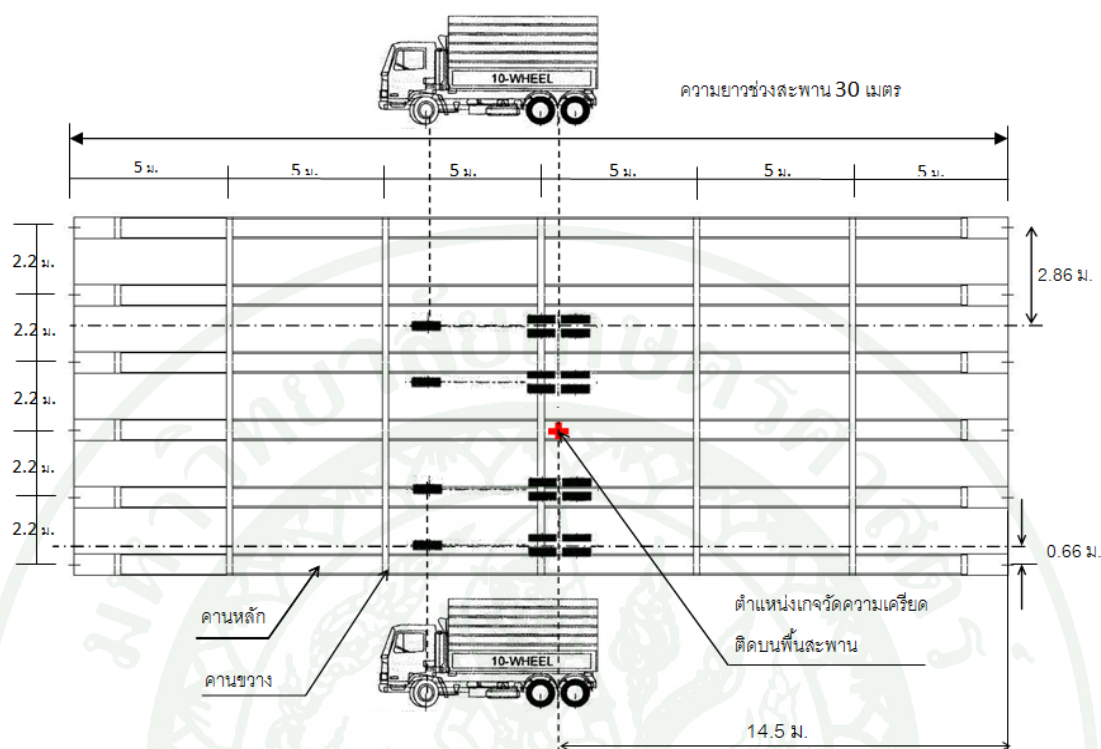
ภาพที่ 70 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



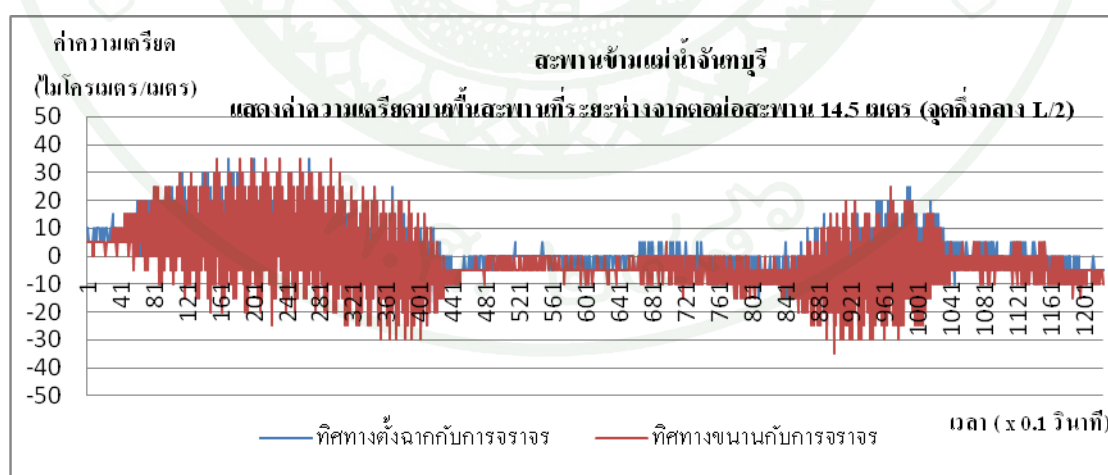
ภาพที่ 71 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



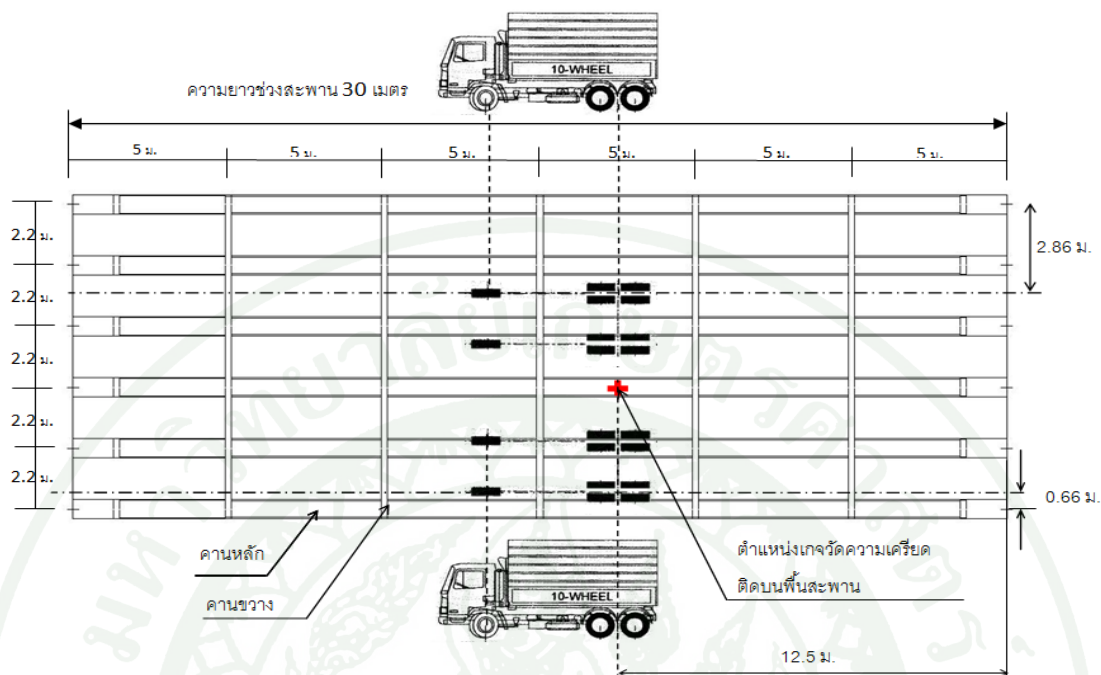
ภาพที่ 72 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



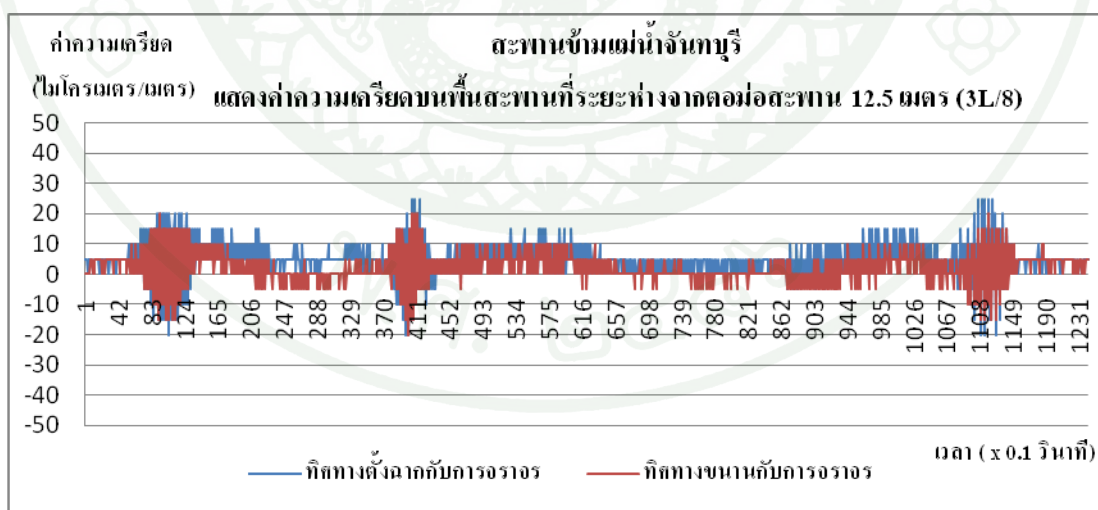
ภาพที่ 73 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 14.5 เมตร และตำแหน่งรบบรทุกลิปล้อสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



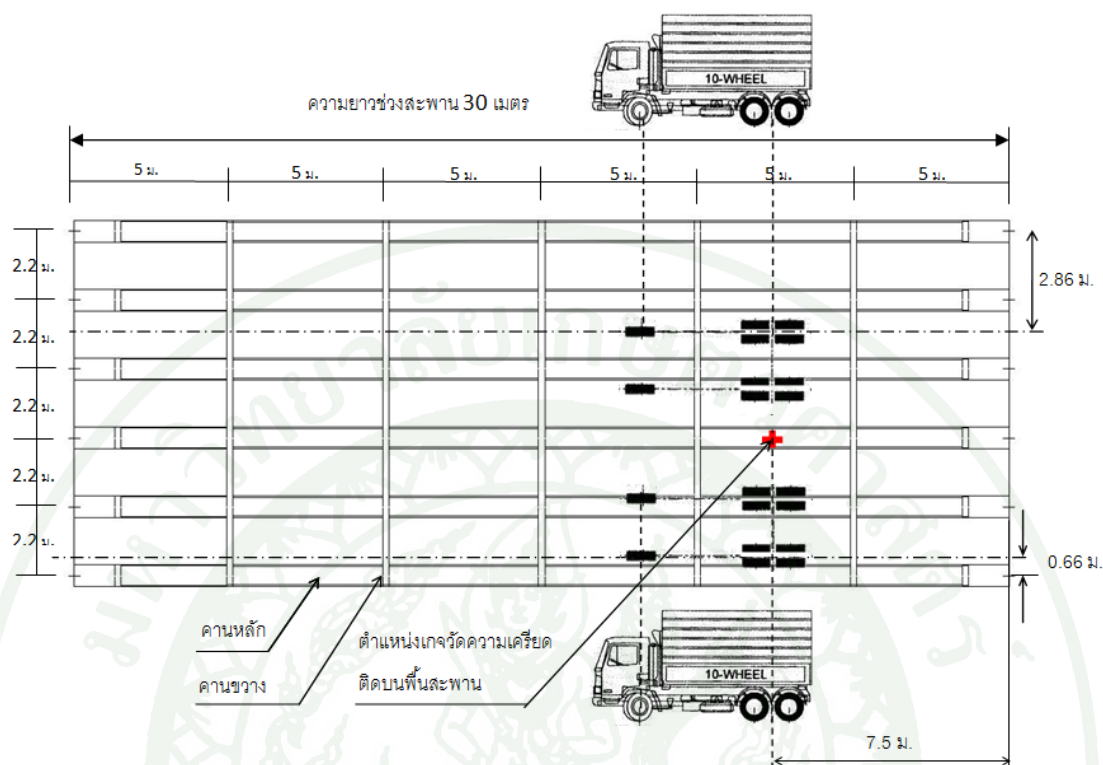
ภาพที่ 74 แสดงค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดกลับสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 14.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



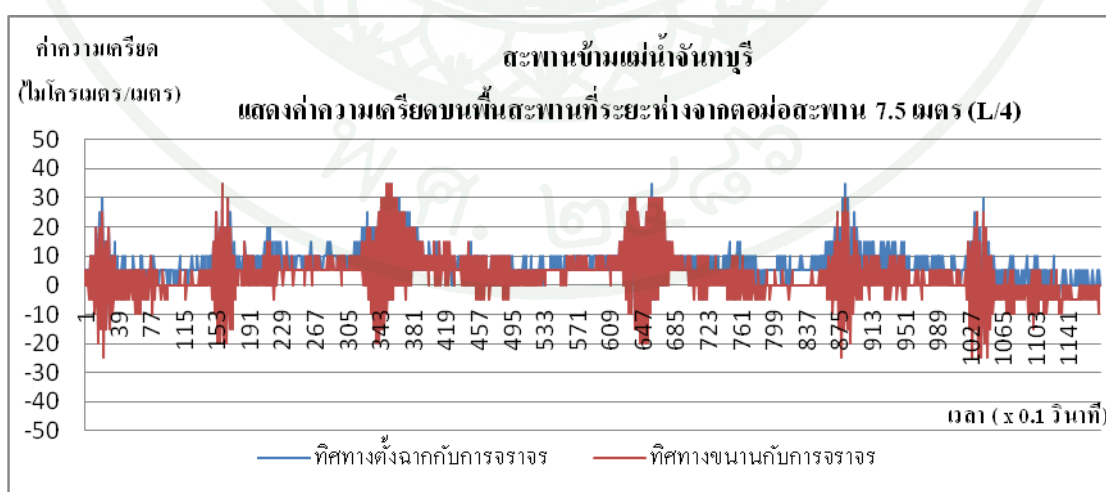
ภาพที่ 75 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเค้น (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสลิปล้อสำหรับโมเมนต์ลบลสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



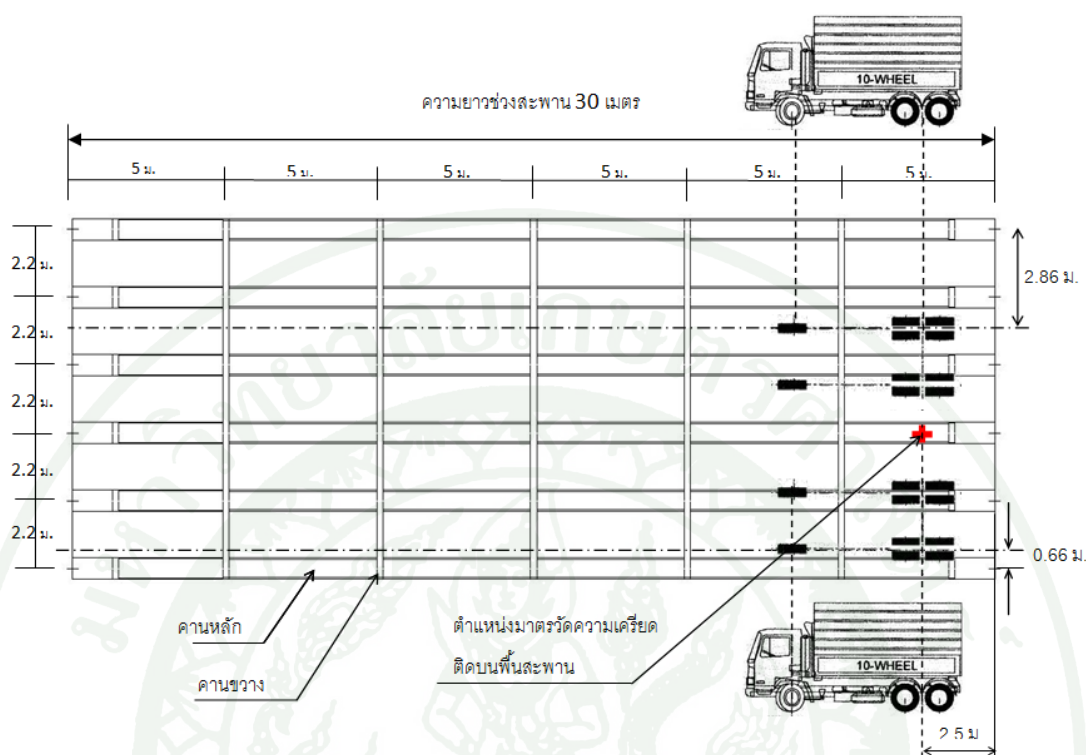
ภาพที่ 76 ค่าความเค้นสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบลสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



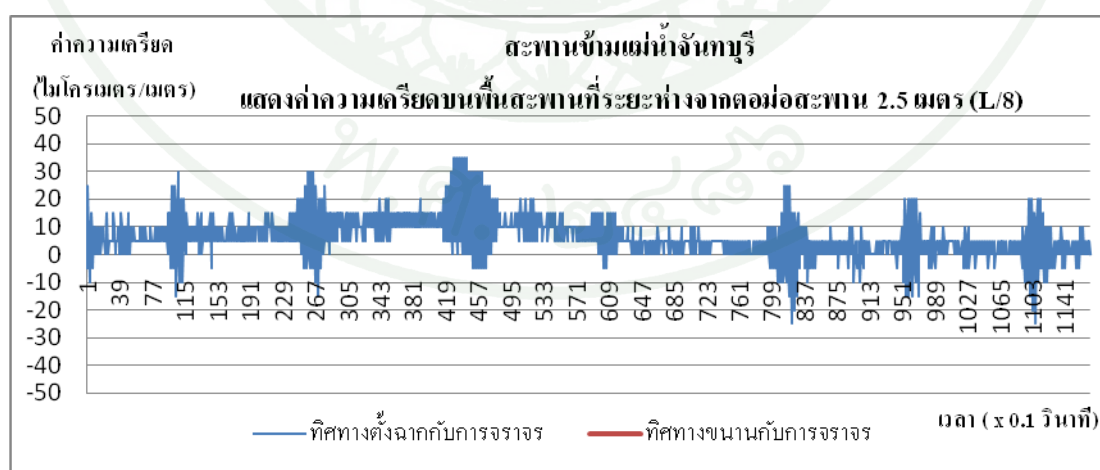
ภาพที่ 77 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



ภาพที่ 78 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



ภาพที่ 79 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสี่ล้อสำหรับ โมเมนต์ลบลสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี



ภาพที่ 80 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบลสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

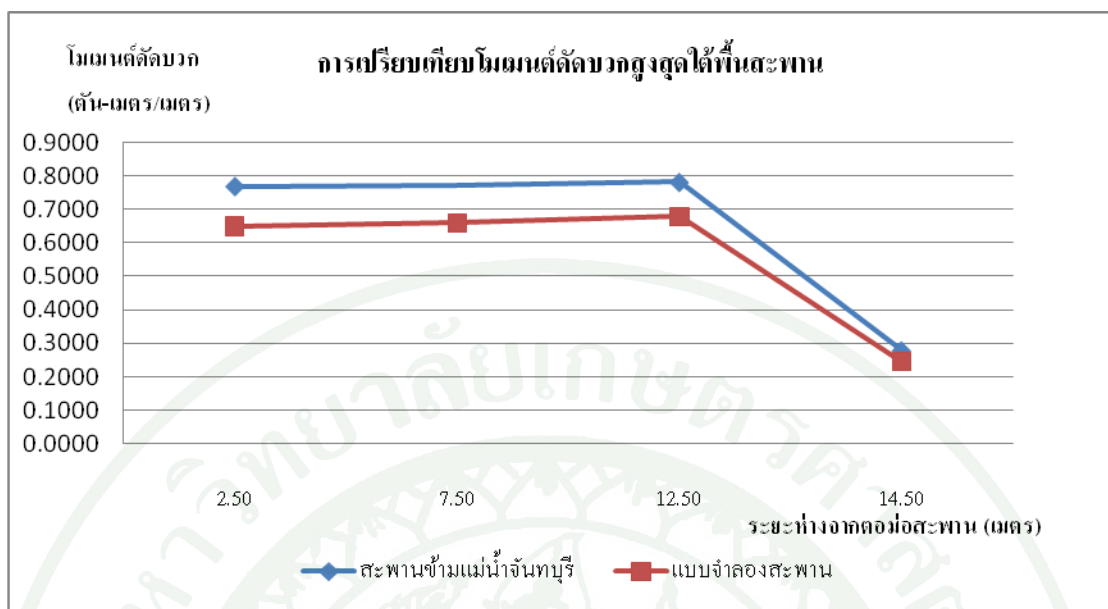
การหาค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานแต่ละตำแหน่ง จะนำค่าที่ได้จากแถววัดความเครียดที่ติดตั้งในแนวตั้งฉากกับแนวจราจรมาคำนวณเท่านั้น เพราะความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับการจราจรจะสัมพันธ์กับโมเมนต์ดัดในพื้นสะพาน ส่วนเกทที่ติดตั้งในแนวนานกับการจราจรเป็นการติดตั้งเพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเท่านั้น ส่วนที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร (ใกล้ตอม่อสะพานมากที่สุด) บริเวณบนพื้นสะพานจะติดตั้งเฉพาะในทิศทางตั้งฉากกับการจราจรเท่านั้น

ค่าความเครียดที่ตำแหน่งระยะห่างจากตอม่อ 7.5 เมตรที่ติดตั้งได้พื้นสะพานเพื่อวัดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดนั้น สามารถเก็บข้อมูลได้ประมาณ 12 วินาทีเท่านั้น โดยที่ค่าความเครียดที่ตำแหน่งอื่นๆ จะทำการเก็บข้อมูลแต่ละตำแหน่งเป็นเวลา 2 นาที หรือ 120 วินาที ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณใต้สะพานเป็นแม่น้ำกว้าง ไม่สามารถตั้งนั่งร้านเหล็กได้สะดวก ทำให้การติดตั้งแถววัดความเครียดทำได้ยากกว่าปกติจึงเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น

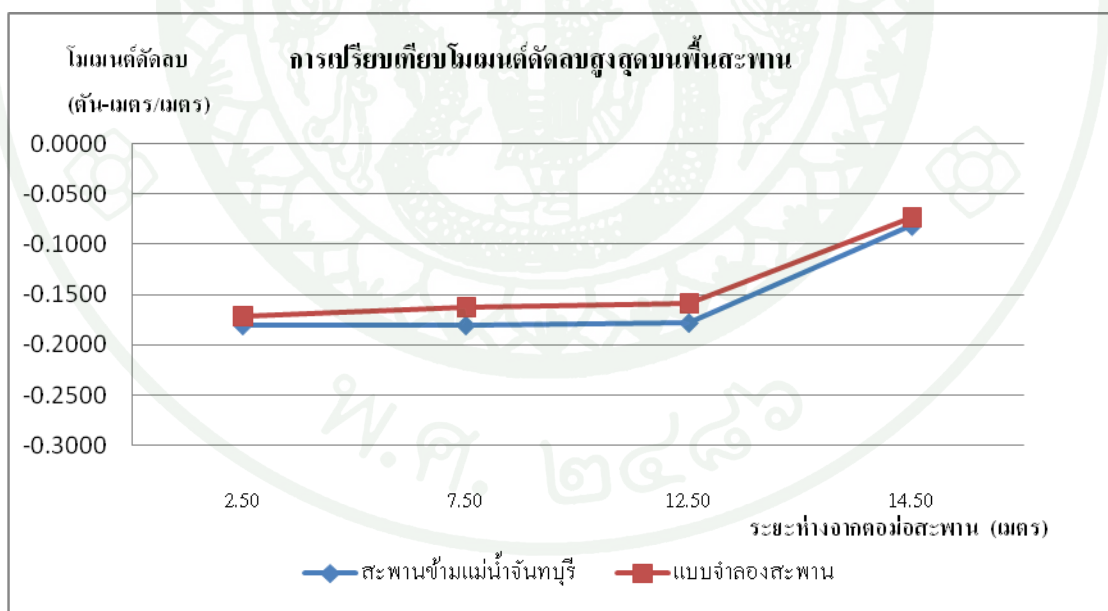
จากค่าความเครียดที่วัดได้ในตำแหน่งต่างๆ ทั้งใต้พื้นสะพาน และบนพื้นสะพานสามารถนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานและโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองสะพานด้วยโปรแกรม SAP ได้ดังนี้

ตารางที่ 25 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานในสนาม กับค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจากแบบจำลองสะพานด้วยโปรแกรม SAP สำหรับสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี

ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน (เมตร)	สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี		แบบจำลองสะพาน		ความแตกต่าง (%)	
	โมเมนต์ดัดบวก ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดลบ ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดบวก ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดลบ ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดบวก ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดลบ ตัน-เมตร/เมตร
2.50 (L/8)	0.7691	-0.1807	0.6500	-0.1715	-15.50%	-5.08%
7.50 (L/4)	-	-0.1807	0.6590	-0.1624	-	-10.09%
12.50 (3L/8)	0.7812	-0.1782	0.6779	-0.1589	-13.22%	-10.86%
14.50 (L/2)	0.2771	-0.0817	0.2454	-0.0736	-11.44%	-9.84%



ภาพที่ 81 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กับแบบจำลองสะพาน



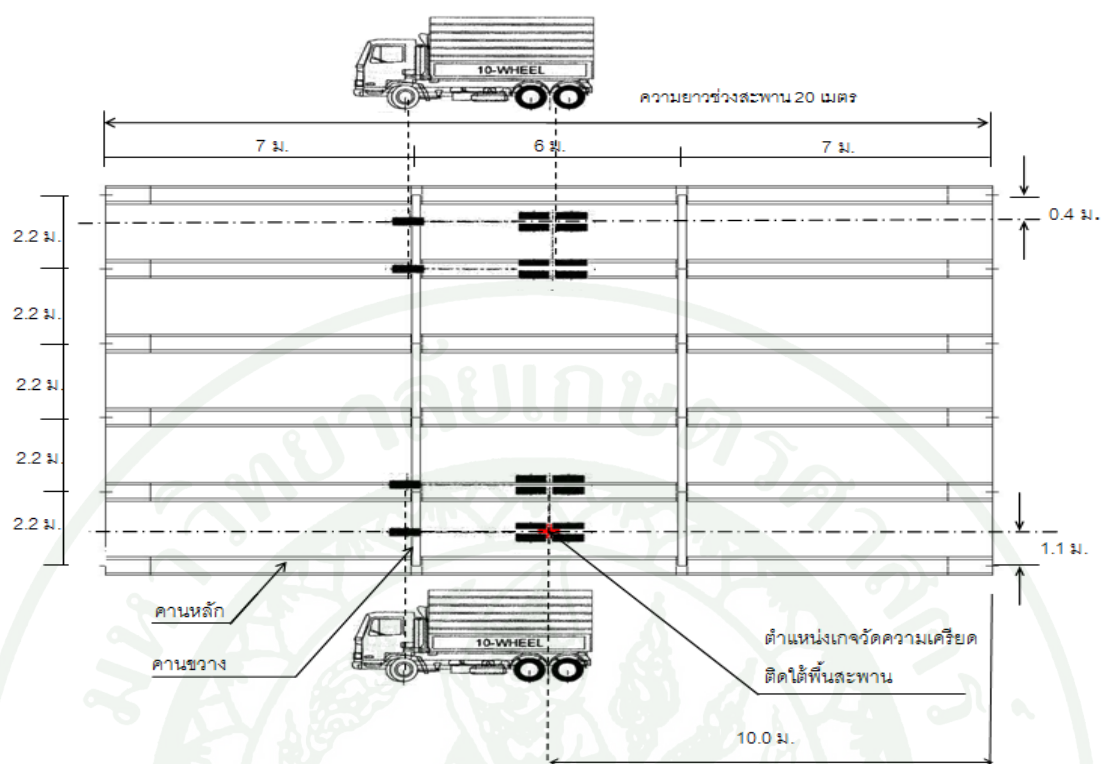
ภาพที่ 82 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี กับแบบจำลองสะพาน

ผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์คดงอสูงสุดบนพื้นสะพานในสนามกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพาน หากไม่รวมค่าโมเมนต์คดงอสูงสุดที่ระยะห่างจากตอม่อ 7.5 เมตรซึ่งเกิดความผิดพลาดจากการเก็บข้อมูลในสนามแล้วพบว่า ค่าโมเมนต์คดงอสูงสุดได้พื้นสะพานที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพาน มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนาม อยู่ 11.44% - 15.50% ในขณะที่ค่าโมเมนต์คดงอสูงสุดบนพื้นสะพานที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพานมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนามอยู่ 5.08% - 10.86% แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

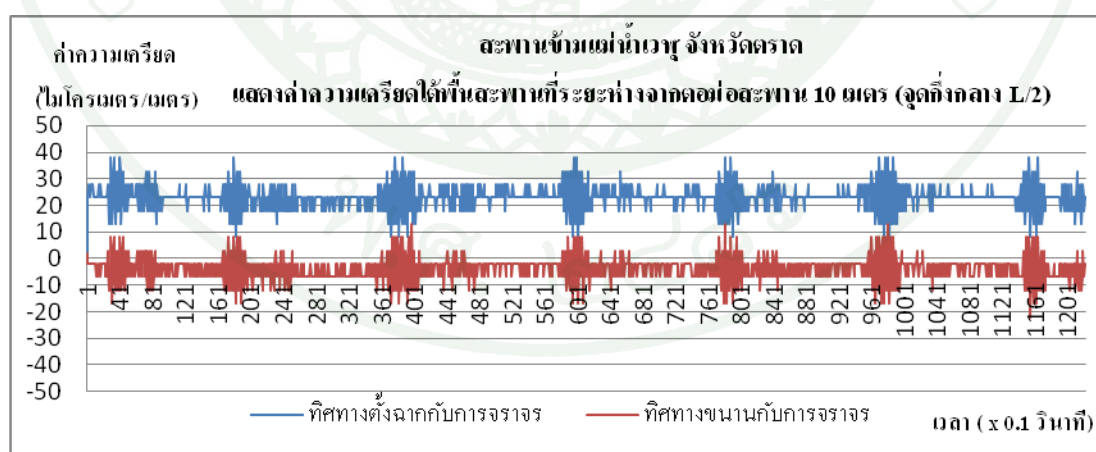
จากการเปรียบเทียบดังกล่าวพบว่าความแตกต่างระหว่างโมเมนต์คดงอสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพานและที่คำนวณได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนามสำหรับโมเมนต์คดงอสูงสุดมากกว่าโมเมนต์คดงอสูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการติดตั้งเกจสำหรับวัดความเครียดได้พื้นสะพานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์คดงอนั้นทำได้ไม่สะดวก เพราะได้สะพานเป็นแม่น้ำกว้างตลอดช่วงสะพานทำให้ไม่สามารถตั้งนั่งร้านได้ การติดตั้งจึงต้องปีนไปตามช่องใต้พื้นสะพานโดยใช้ไม้วางพาดที่ปีกคานด้านล่างเป็นทางเดิน การวัดตำแหน่งต่างๆ จึงไม่แม่นยำเท่าที่ควรทำให้ตำแหน่งการติดตั้งเกจวัดความเครียดที่ได้พื้นสะพานอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ต่างจากการติดตั้งเกจที่บนพื้นสะพานซึ่งทำได้ง่ายการวัดตำแหน่งจึงถูกต้องแม่นยำกว่า ทำให้ค่าโมเมนต์คดงอสูงสุดและลบสูงสุดมีลักษณะดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมที่เกิดขึ้นนั้นอาจมีสาเหตุมาจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และค่าอัตราส่วนปัวซองที่ใช้ในแบบจำลอง มีความแตกต่างไปจากคอนกรีตสะพานในสนาม, ความสั่นสะเทือนจากรถยนต์ที่ยังเหลืออยู่ในขณะวัดความเครียด ความสั่นสะเทือนจากแรงลมและคลื่นน้ำที่พัดกระแทกกับตัวสะพานและตอม่อสะพาน, ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสายนำสัญญาณจากตัววัดความเครียดมายังตัวเก็บข้อมูล, การกระจายน้ำหนักบรรทุกของแต่ละล้อบรรทุกทุกสลิปล้อหนัก 25 ตัน ไม่ตรงตามน้ำหนักที่กระทำแบบเป็นจุดตามที่ใช้ในแบบจำลอง, พื้นผิวสะพานด้านบนมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มการเสียดทานให้กับล้อรถ จึงต้องทำการเจียรพื้นผิวสะพานบริเวณที่ต้องติดตัววัดความเครียดให้เรียบ แต่เนื่องจากการปฏิบัติงานจำเป็นต้องทำในเวลาจำกัดเพราะเป็นการกีดขวางการจราจร จึงอาจทำให้เกจวัดความเครียดไม่แนบสนิทกับพื้นผิวคอนกรีตในบางตำแหน่ง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบให้ผลตรงตามทฤษฎีและคาดว่าจะเชื่อถือได้

3.2 สะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตรัง

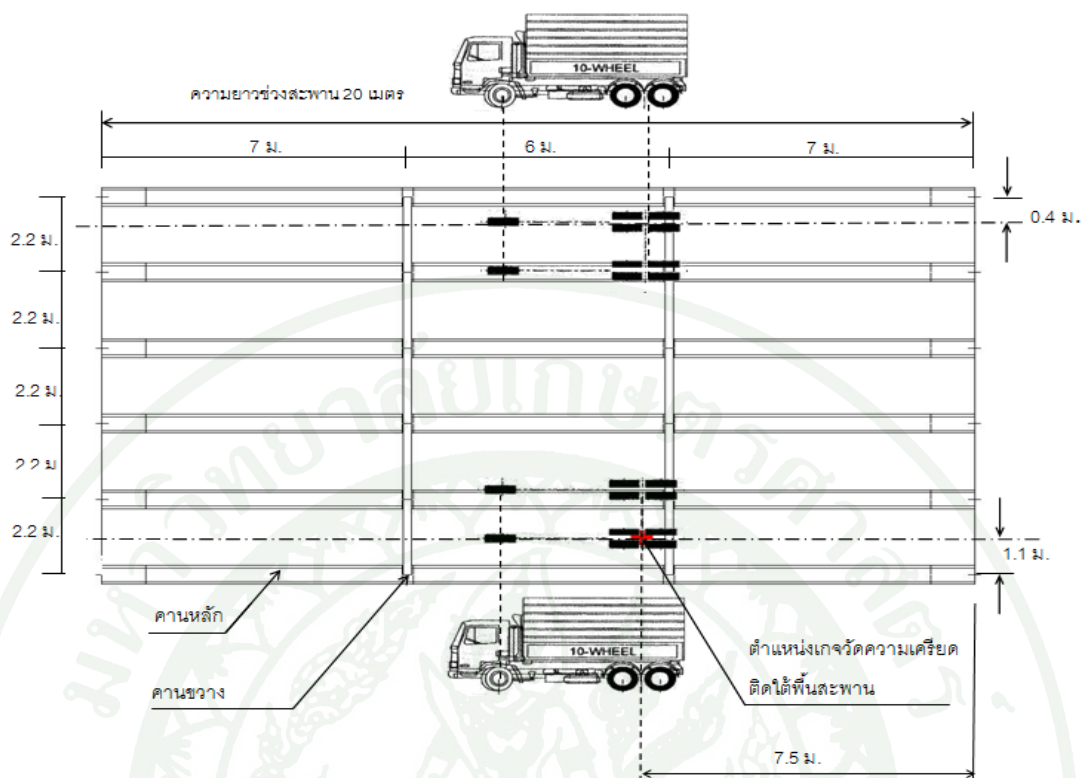
สะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตรัง มีความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร ตำแหน่งที่ติดตั้ง เภววัดความเครียดทั้งบนและใต้พื้นสะพานมีสี่ตำแหน่งคือ $L/2$, $3L/8$, $L/4$ และ $L/8$ เมื่อ L มีค่าเท่ากับ 20 เมตร ทำให้ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 10, 7.50, 5.00 และ 2.50 เมตรตามลำดับ สะพาน มีคานขวาง(diaphragm)ที่ระยะ 7 เมตรห่างจากตอม่อสะพาน ทำให้ตำแหน่งที่ $3L/8 = 7.50$ เมตร อยู่ ใกล้คานขวาง โดยอยู่ห่างออกมา 0.50 เมตร ไม่มีปัญหาในการติดตั้งเกจ จึงมิได้มีการเลื่อนตำแหน่ง เพื่อหลีกเลี่ยงตำแหน่งคานขวาง สะพานข้ามแม่น้ำแควจึงสามารถติดตั้งเภววัดความเครียดได้ตาม ตำแหน่งทั้งสี่คือ $L/2$, $3L/8$, $L/4$ และ $L/8$



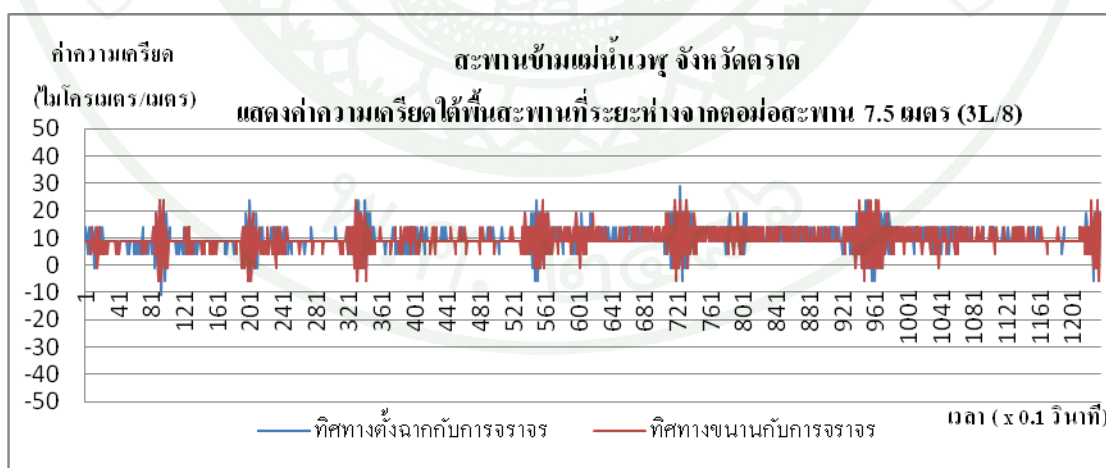
ภาพที่ 83 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากค่อม่อสะพาน 10.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุด ได้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



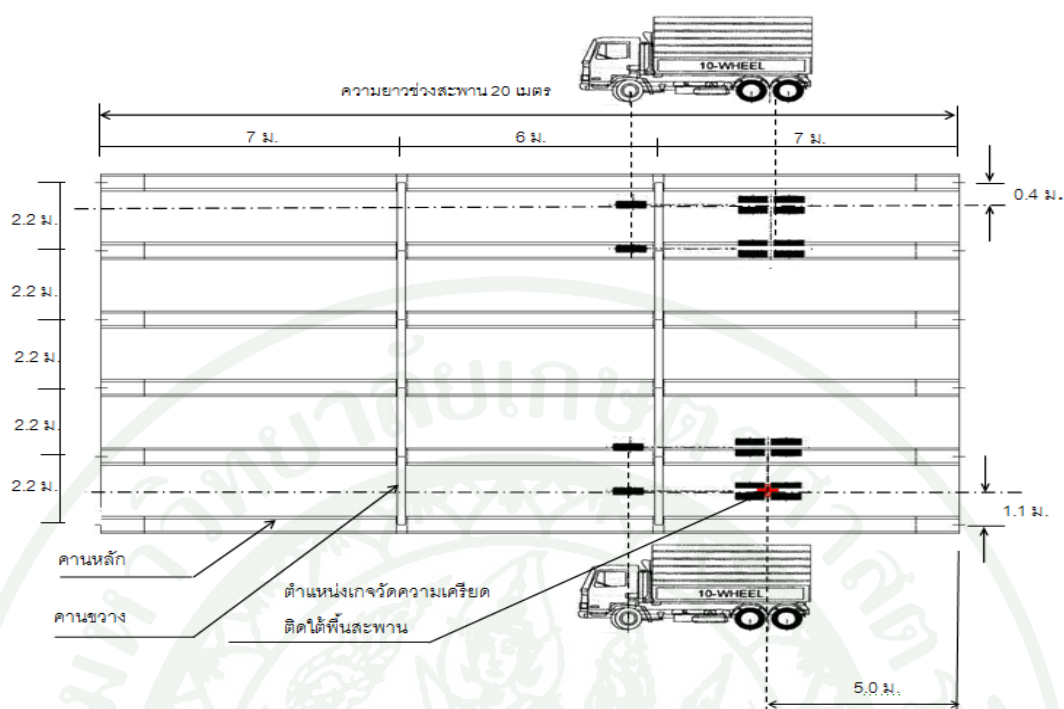
ภาพที่ 84 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดได้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากค่อม่อสะพาน 10.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



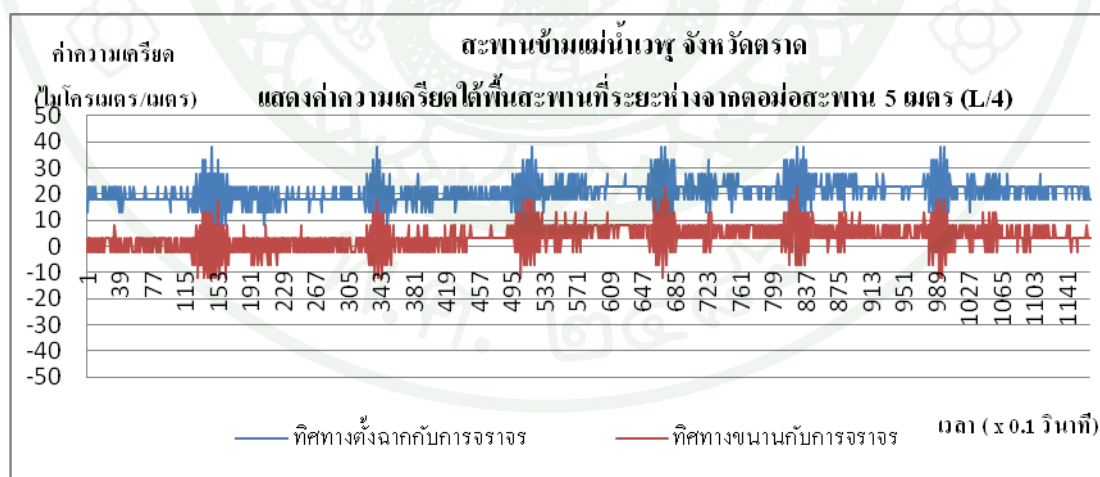
ภาพที่ 85 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



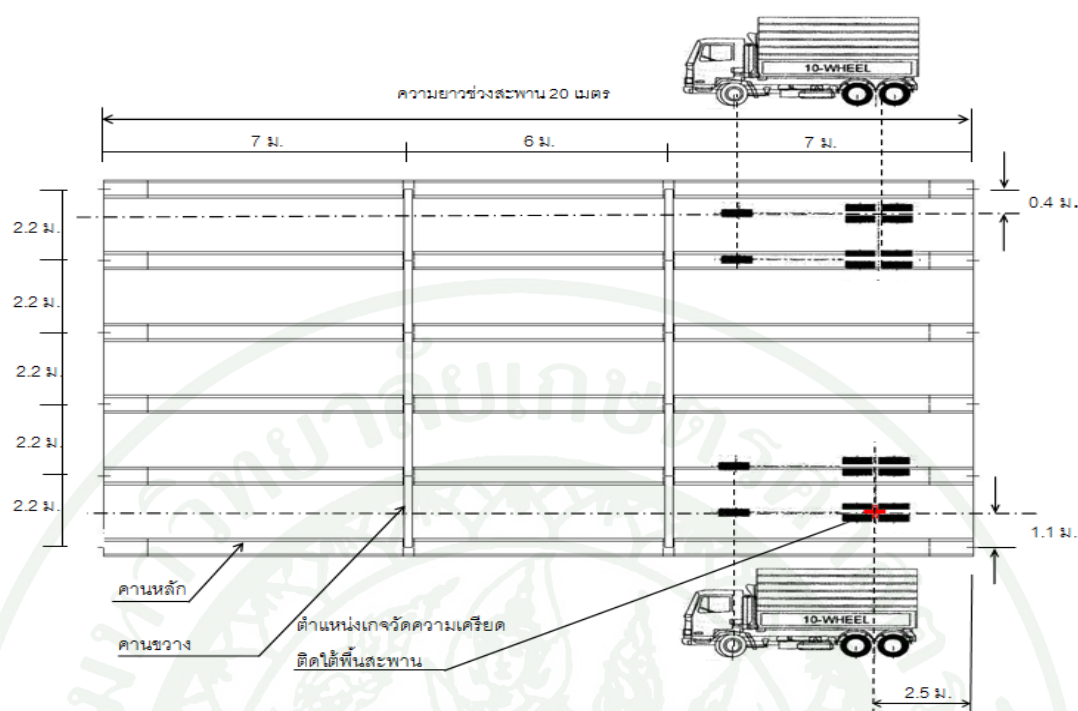
ภาพที่ 86 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



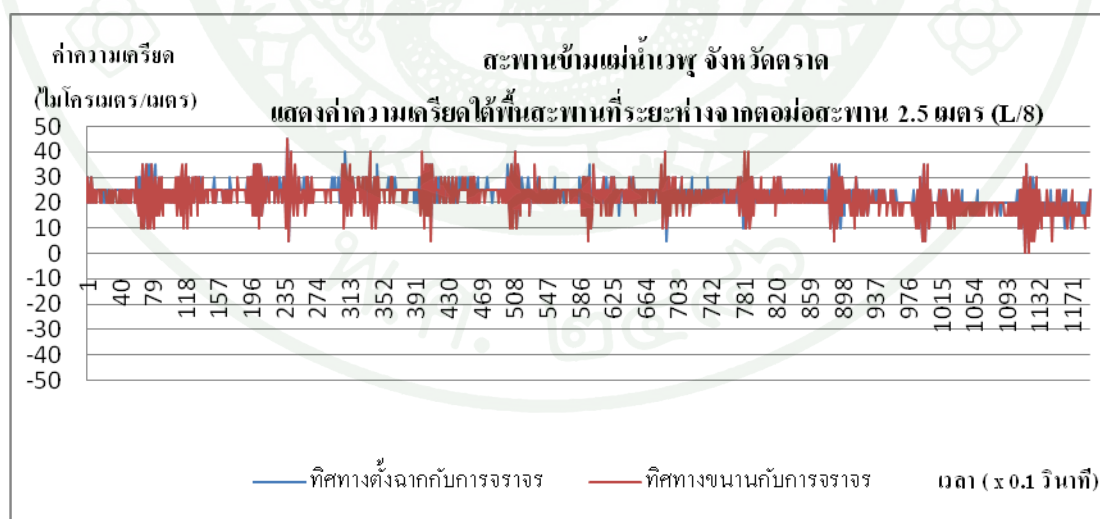
ภาพที่ 87 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกทุกสปีดสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



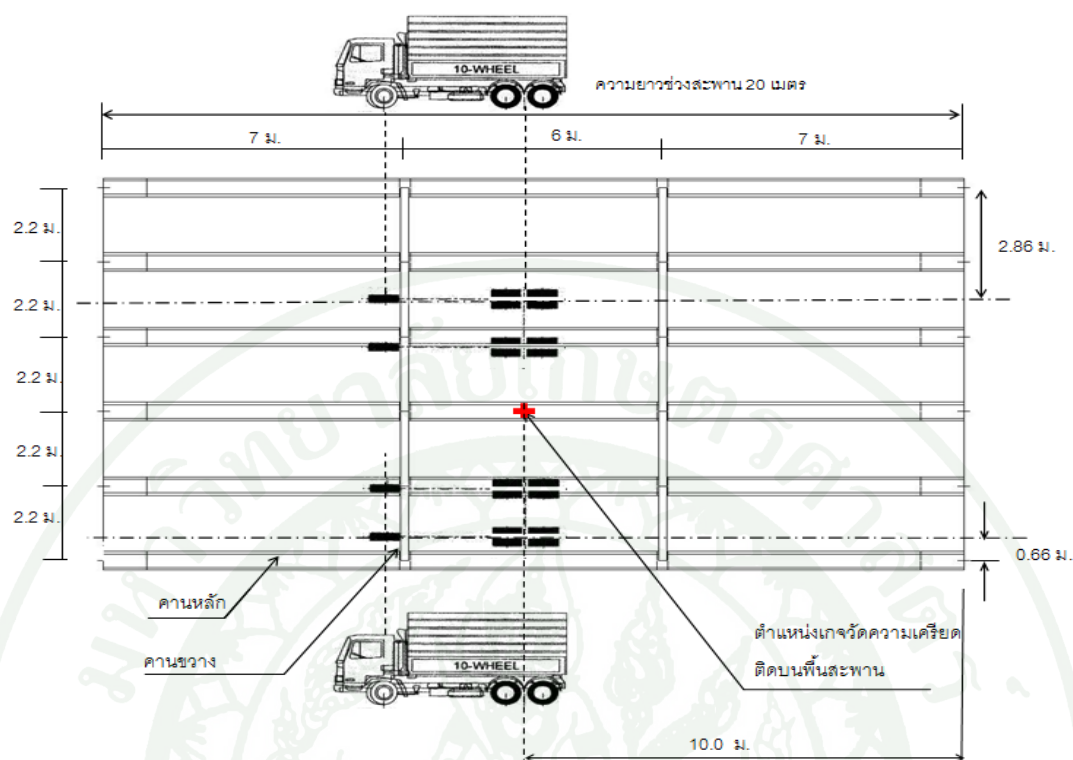
ภาพที่ 88 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



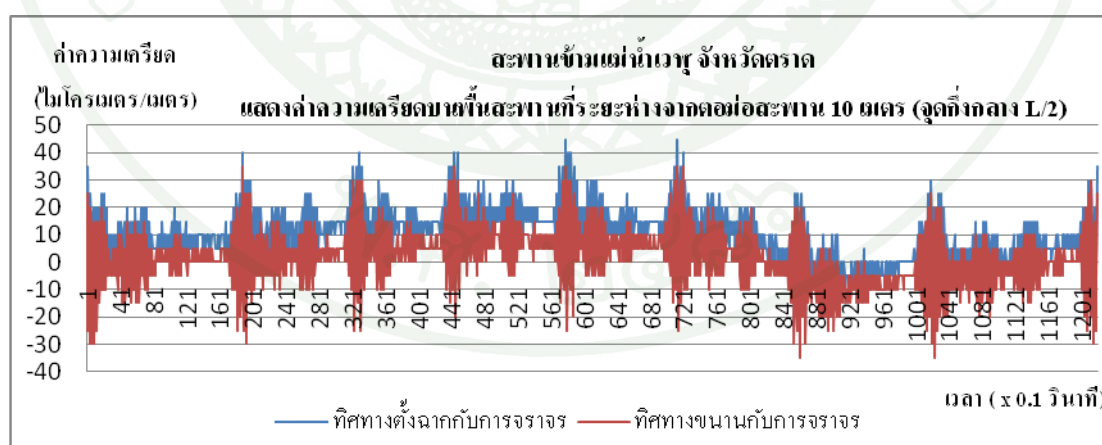
ภาพที่ 89 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกทุกสิบล้อสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด



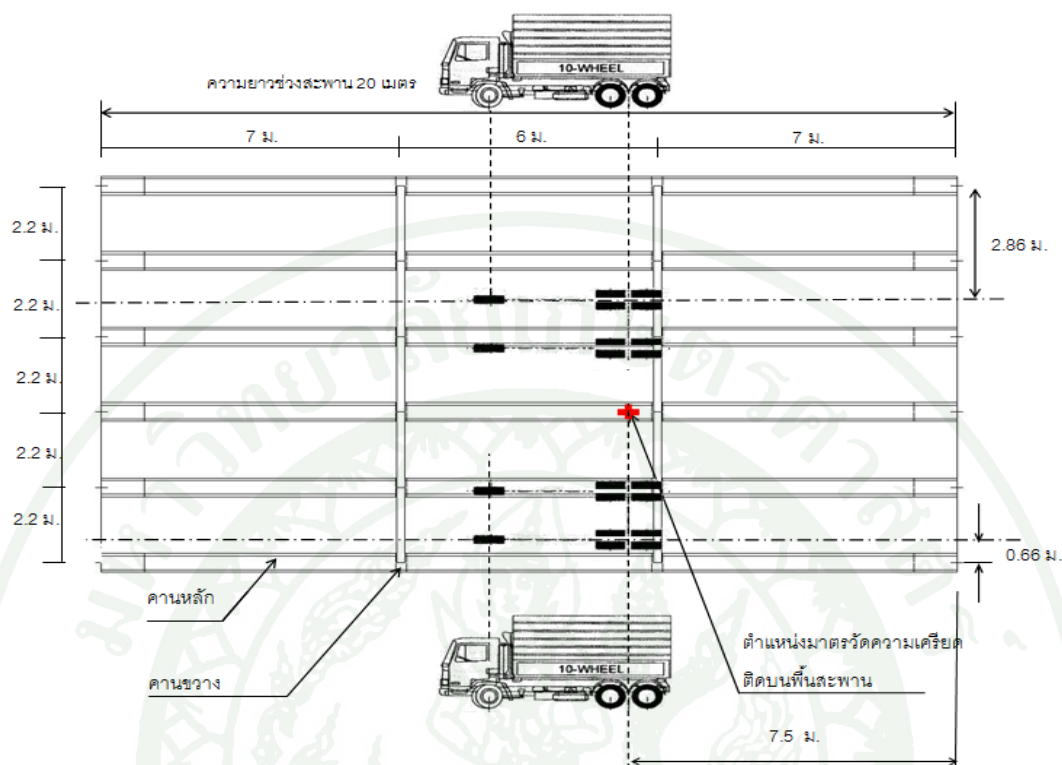
ภาพที่ 90 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด



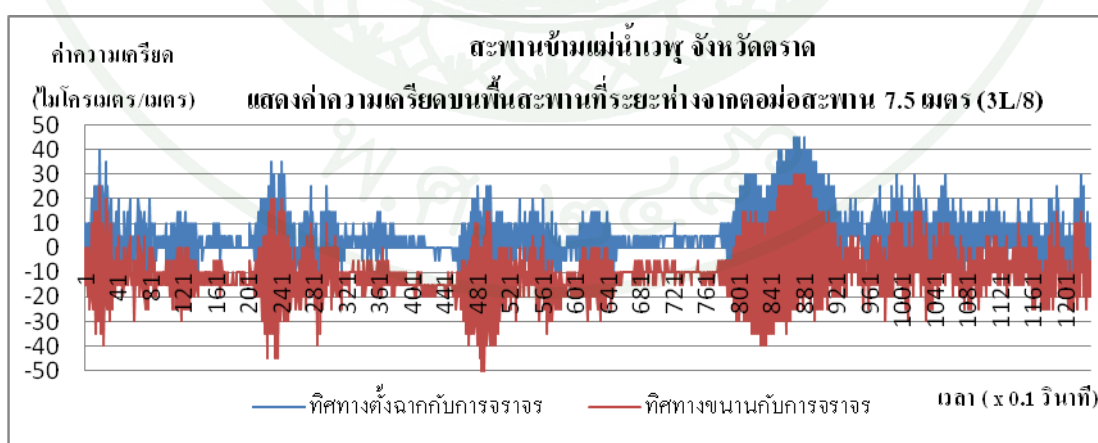
ภาพที่ 91 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 10.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ล้นสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



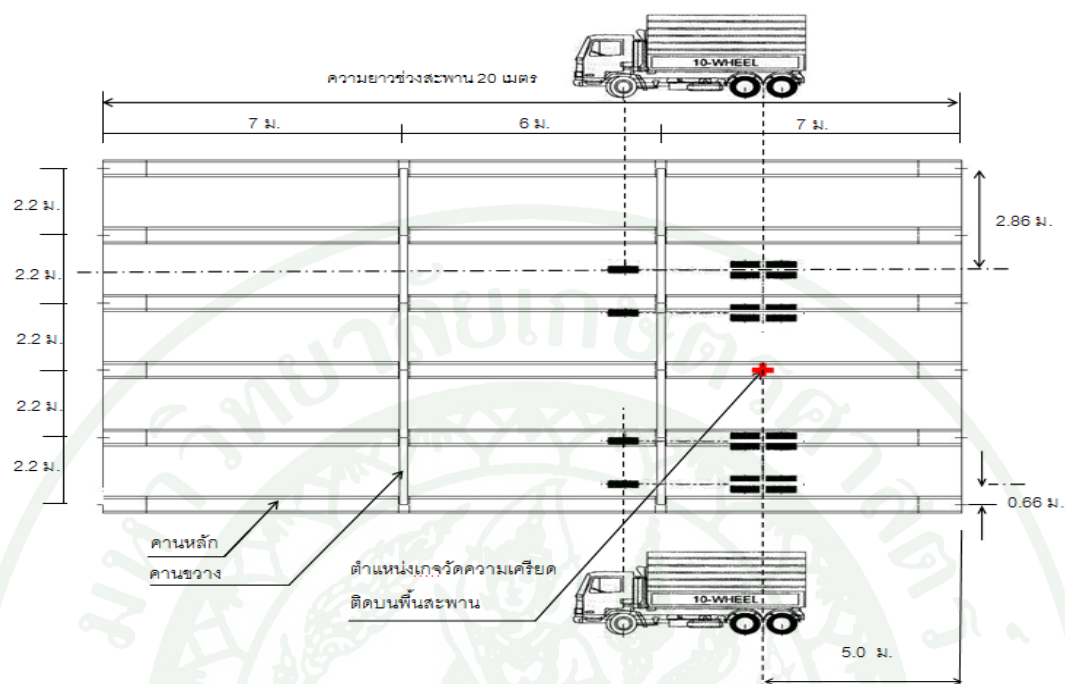
ภาพที่ 92 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดล้นสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 10.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



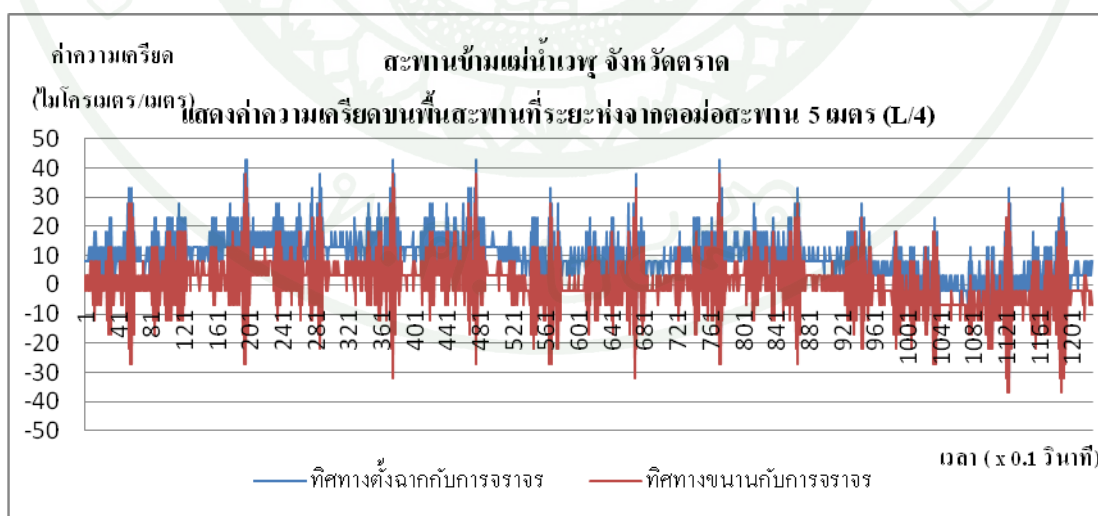
ภาพที่ 93 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ลบสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด



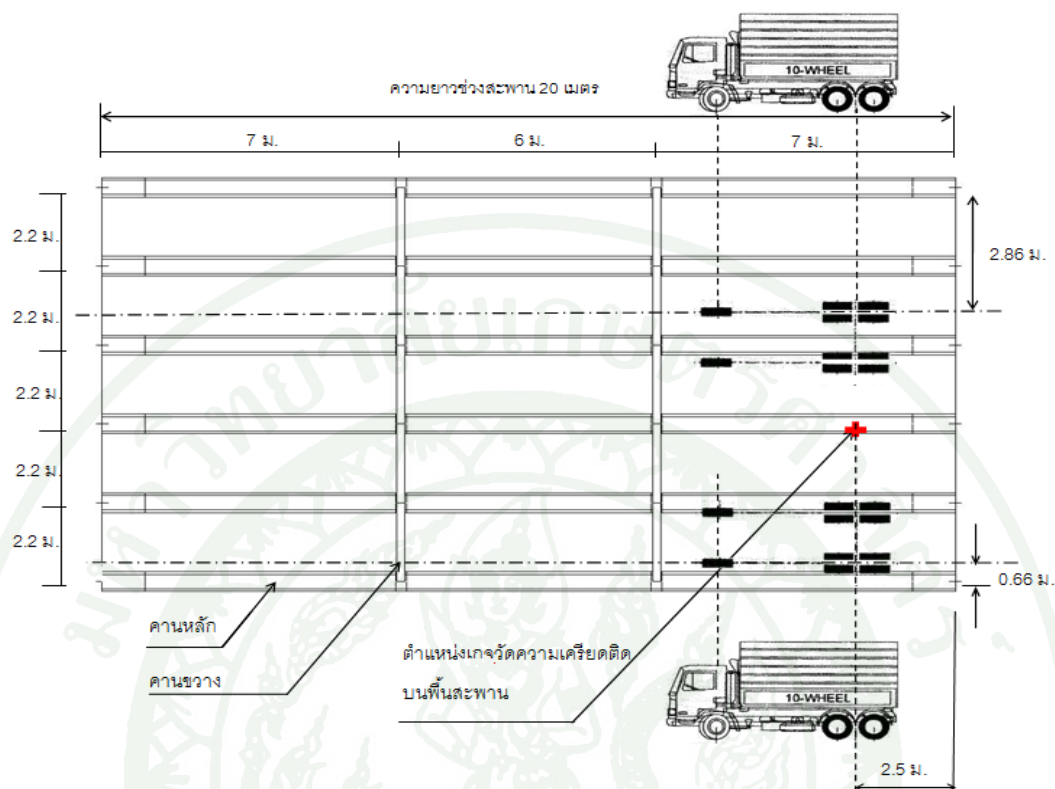
ภาพที่ 94 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด



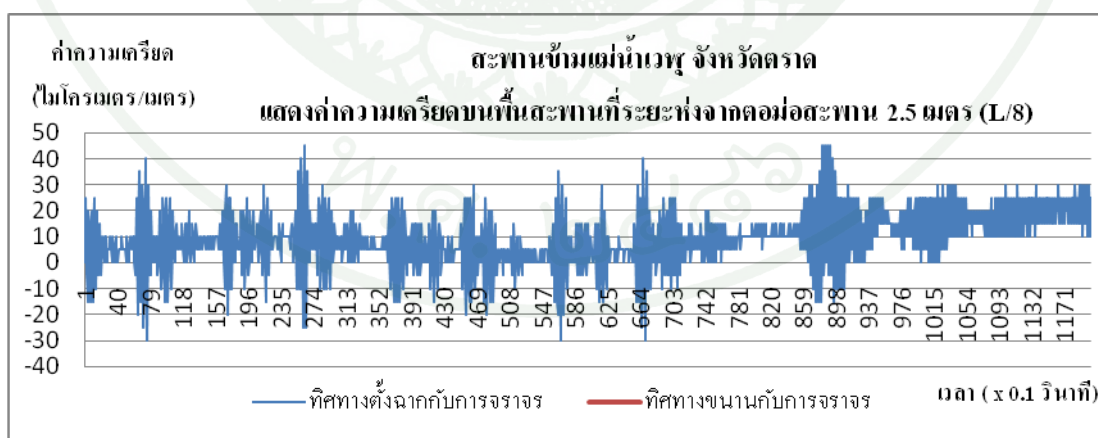
ภาพที่ 95 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสปีดสำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุด บนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



ภาพที่ 96 ค่าความเครียดสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด



ภาพที่ 97 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดความเค้น (strain gauge) ที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร และตำแหน่งรถบรรทุกสี่ล้อสำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุดบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด

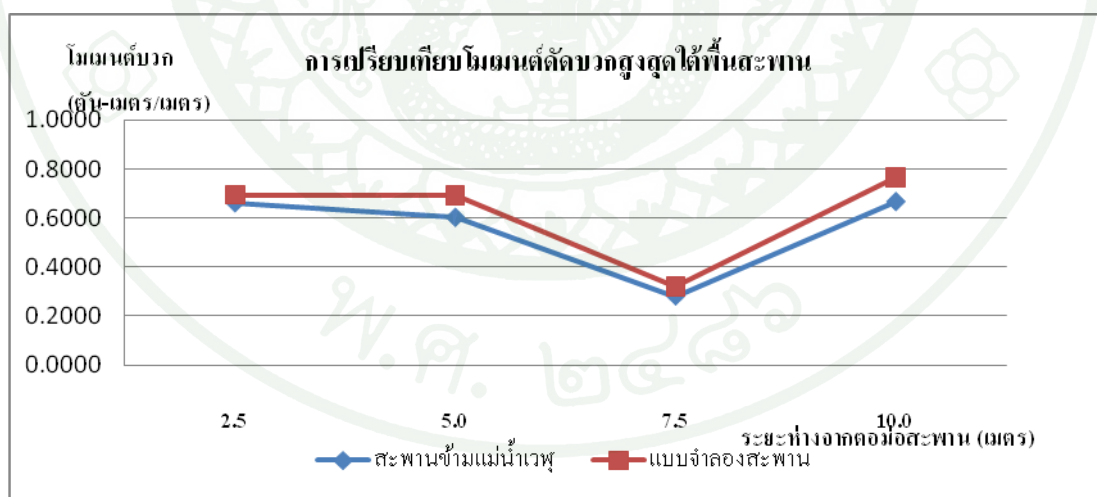


ภาพที่ 98 ค่าความเค้นสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุดบนพื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตร ของสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด

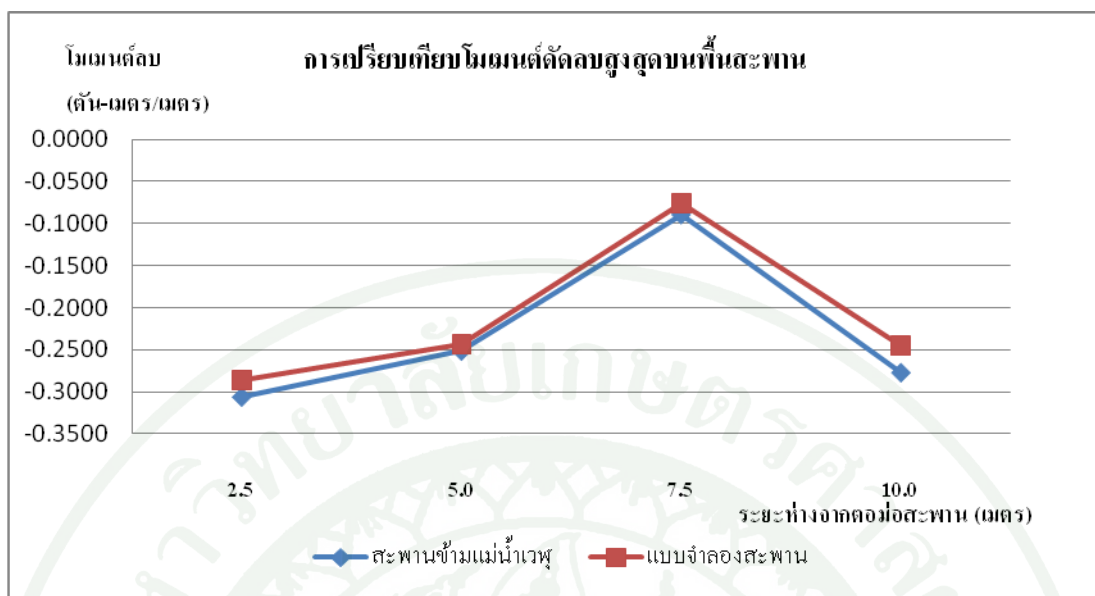
จากค่าความเครียดที่วัดได้ในตำแหน่งต่างๆ ทั้งใต้พื้นสะพานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพาน และค่าความเครียดที่วัดได้บนพื้นสะพานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยโปรแกรม SAP ได้ดังนี้

ตารางที่ 26 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานในสนาม กับค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจากแบบจำลองสะพานด้วยโปรแกรม SAP สำหรับสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด

ระยะห่างจาก ตอม่อสะพาน (เมตร)	สะพานข้ามแม่น้ำแคว		แบบจำลองสะพาน		ความแตกต่าง (%)	
	โมเมนต์ดัดบวก ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดลบ ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดบวก ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดลบ ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดบวก ตัน-เมตร/เมตร	โมเมนต์ดัดลบ ตัน-เมตร/เมตร
2.5 (L/8)	0.6626	-0.3067	0.6944	-0.2858	4.79%	-6.81%
5.0 (L/4)	0.6029	-0.2520	0.6916	-0.2437	14.72%	-3.27%
7.5 (3L/8)	0.2799	-0.0897	0.3216	-0.0759	14.87%	-15.44%
10.0 (L/2)	0.6678	-0.2776	0.7668	-0.2455	14.82%	-11.57%



ภาพที่ 99 กราฟเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกใต้พื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว ในสนาม กับแบบจำลองสะพาน



ภาพที่ 100 กราฟเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดลบบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำแคว ในสนาม
กับแบบจำลองสะพาน

สำหรับเอาสะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด จากกราฟโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดที่ได้พบว่า ที่ตำแหน่ง 7.5 เมตรห่างจากตอม่อสะพาน ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดมีค่าน้อยกว่าที่ตำแหน่งอื่นมาก ทั้งนี้เป็นเพราะที่ตำแหน่ง 7.5 เมตรนั้น อยู่ใกล้กับคานขวางของสะพานมาก โดยห่างจากคานขวางเพียง 0.50 เมตรทำให้พื้นสะพานบริเวณนี้ได้รับผลจากค่าความแข็งแรงของคานขวาง จึงเป็นผลทำให้ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดที่เกิดขึ้นที่จุดนี้มีค่าต่ำกว่าจุดอื่นๆ อย่างชัดเจน

ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ได้พื้นสะพานควรจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้น แต่จากการทดสอบพบว่า ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร มีค่าน้อยกว่าที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตรนั้นอยู่ใกล้กับคานขวางกว่าที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร เป็นผลให้พื้นสะพานที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตร มีค่าความแข็งแรงมากกว่าพื้นสะพานบริเวณที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร จึงทำให้ค่าโมเมนต์ดัดบวกได้พื้นสะพานมีค่าลดลง ในทำนองเดียวกันพื้นสะพานที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร ก็อยู่ใกล้กับคานขวางกว่าที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 2.5 เมตรอยู่ 0.5 เมตร เช่นเดียวกัน

ในขณะเดียวกัน ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 7.5 เมตรควรจะมีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 10.0 เมตร และน้อยกว่าที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 5.0 เมตร แต่ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุอย่างเดียวกับค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดข้างต้น

ผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานในสนามเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพาน พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพาน มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนามอยู่ 4.79% - 14.87% ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพาน มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนามอยู่ 3.27% - 15.44% ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เช่นเดียวกัน

จากผลการทดสอบสะพานในสนามทั้งสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี และสะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด นั้น แสดงให้เห็นว่าค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองสะพานโดยโปรแกรม SAP นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดที่คำนวณได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนามในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำไปใช้สร้างสมการเพื่อคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานและปรับแก้ค่าความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพาน

4. การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการโมเมนต์ดัดสูงสุดและความกว้างประสิทธิผลในพื้น สะพาน

สมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณหาโมเมนต์ดัด และความกว้างประสิทธิผลของพื้นสะพาน ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวของสะพาน หาได้โดยนำผลการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดบวกและโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานด้วยโปรแกรม CONTBEAM และปรับแก้ค่าความกว้างประสิทธิผลที่ใช้ในโปรแกรม CONTBEAM เพื่อให้ค่าโมเมนต์ดัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP ดังได้แสดงมาแล้ว จึงนำผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานทั้งหมด 375 สะพาน โดยมีตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดบวก และโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานทั้งหมด 4725 ตำแหน่ง มาวิเคราะห์การถดถอยแบบหลายตัวแปร (multiple regression analysis) โดยตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการคำนวณโมเมนต์ดัดบวก และลบสูงสุดในพื้นสะพานที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวของสะพาน นั้นประกอบไปด้วย ความยาวช่วงคาน มีหน่วยเป็นเมตร, จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน, ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน มีหน่วยเป็นเมตร, ความหนาของพื้นสะพาน มีหน่วยเป็นเมตร และตัวแปรตัวสุดท้ายคือระยะห่างจากตอม่อสะพาน ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร โดยตัวแปรเหล่านี้จะเรียกว่าเป็นตัวแปรอิสระ (independent variables) ส่วนค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน โมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวก และค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบเรียกว่าตัวแปรตาม (dependent variables) สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear equation) โดยมีรูปแบบพหุนามในเมียดกำลังสอง เนื่องจากสอดคล้องกับโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานมากกว่าสมการชนิดอื่น

สมการสำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุดและความกว้างประสิทธิผลในพื้นสะพานแสดงดังนี้

$$y_i = a_i + b_{i1}x_1 + c_{i1}x_1^2 + b_{i2}x_2 + c_{i2}x_2^2 + b_{i3}x_3 + c_{i3}x_3^2 + b_{i4}x_4 + c_{i4}x_4^2 + b_{i5}x_5 + c_{i5}x_5^2 \quad (18)$$

เมื่อ y_i เป็นตัวแปรตาม (dependent variables)

y_1 หมายถึง สัมประสิทธิ์โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน

y_2 หมายถึง สัมประสิทธิ์โมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน

y_3 หมายถึง ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน

y_4 หมายถึง ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน

x_1 หมายถึง ความยาวช่วงคาน มีหน่วยเป็นเมตร

x_2 หมายถึง จำนวนของคานรองรับพื้นสะพาน

x_3 หมายถึง ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานมีหน่วยเป็นเมตร

x_4 หมายถึง ความหนาของพื้นสะพาน มีหน่วยเป็นเมตร

x_5 หมายถึง ระยะห่างจากตอม่อสะพาน มีหน่วยเป็นเมตร

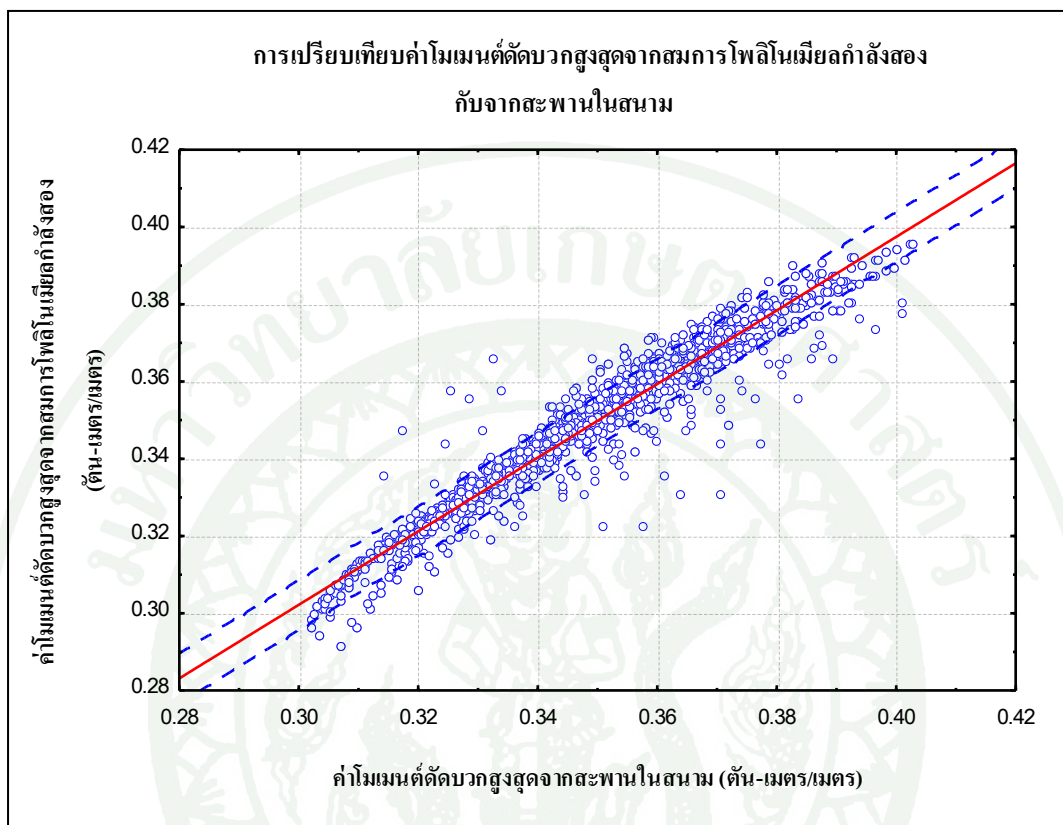
a_i หมายถึง ค่าคงที่สำหรับ y_i

b_{ij} หมายถึง ค่าคงที่สำหรับ x_j

c_{ij} หมายถึง ค่าคงที่สำหรับ x_j^2

สมการสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน

ผลการพิจารณาความสำคัญของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรที่สนใจ ในขณะที่ตัวแปรอื่นคงที่ พบว่าตัวแปรจำนวนคานรองรับพื้นสะพานไม่นับสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ดัดบวกในพื้นสะพาน จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบหลายตัวแปร (multiple regression analysis) โดยใช้รูปแบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง และใช้ค่า R^2 ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจโดย ถ้าค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ารูปแบบสมการที่ใช้สอดคล้องกับข้อมูลมาก สมการดังกล่าวจะสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลนั้นๆ ได้ จากการวิเคราะห์สมการสำหรับโมเมนต์ดัดบวกในพื้นสะพานพบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.954 แสดงว่าสมการที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลทั้งหมดเป็นอย่างดี และเมื่อกำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.85 ได้กราฟเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสองกับจากสะพานในสนามดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 101 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม

และได้สมการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ตัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานดังนี้

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 0.188084 - 0.002037x_1 + 0.000015x_1^2 + 0.000001x_2 + 0.000001x_2^2 \\
 & + 0.092085x_3 - 0.010525x_3^2 + 0.253916x_4 - 0.195217x_4^2 \\
 & + 0.002585x_5 - 0.000093x_5^2
 \end{aligned} \tag{19}$$

ดังนั้นค่าโมเมนต์ตัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานแสดงได้ดังสมการข้างล่าง

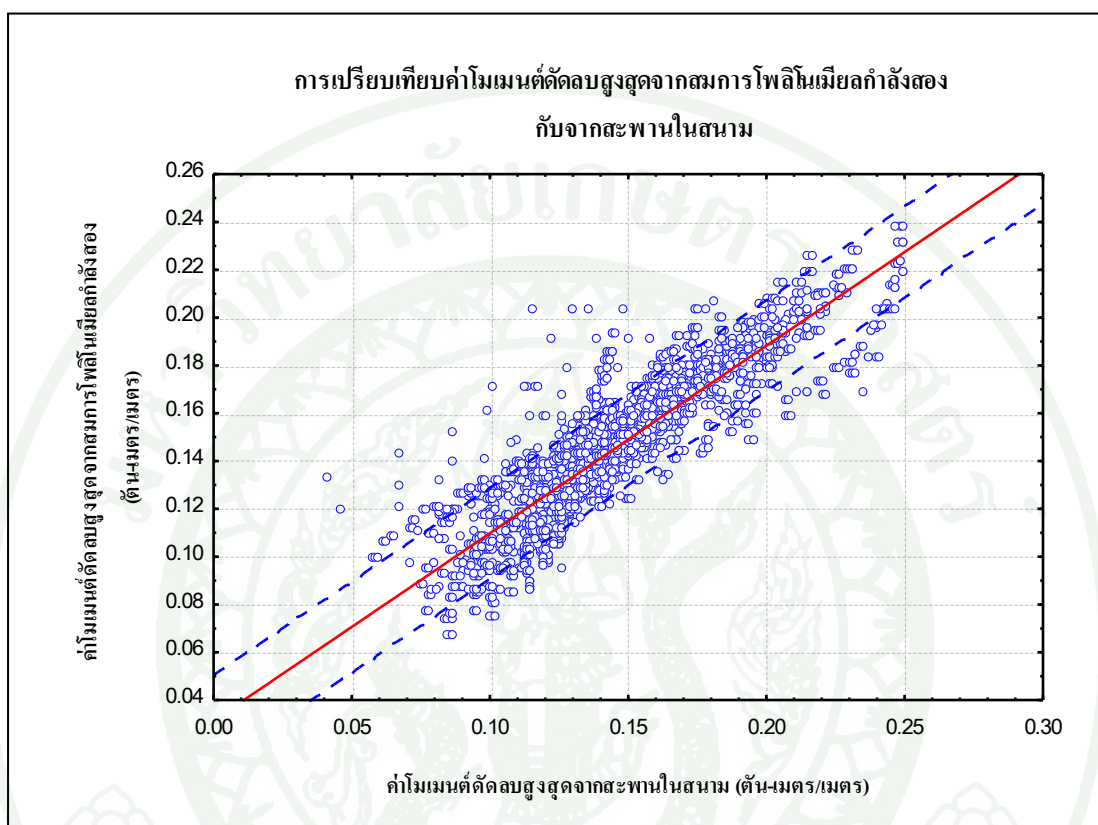
$$M_{\max}^+ = y_1 P \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร} \tag{20}$$

เมื่อ $P = 5.450$ ตัน สำหรับรถบรรทุก H15 และ HS15

$P = 7.270$ ตัน สำหรับรถบรรทุก H20 และ HS20

สมการสำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน

การวิเคราะห์หาสมการสำหรับค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพาน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระต่างๆ กับค่าโมเมนต์ดัด มีลักษณะเหมือนกับโมเมนต์ดัดบวกในพื้นสะพาน คือ จำนวนคานรองรับพื้นสะพานไม่แสดงนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพาน จากการวิเคราะห์พบว่า สมการโพลิโนเมียลกำลังสองให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.784 กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.85 ได้กราฟเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสองกับจากสะพานในสนามดังแสดงในภาพที่ 102



ภาพที่ 102 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานจากสมการโพลิโนเมียล
กำลังสอง กับจากสะพานในสนาม

และได้สมการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานดังนี้

$$y_2 = 0.079140 + 0.006143x_1 - 0.000085x_1^2 + 0.000001x_2 + 0.000001x_2^2 + 0.018455x_3 + 0.006681x_3^2 - 0.050530x_4 - 0.754273x_4^2 - 0.012828x_5 + 0.000628x_5^2 \quad (21)$$

ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นสะพานแสดงได้ดังสมการข้างล่าง

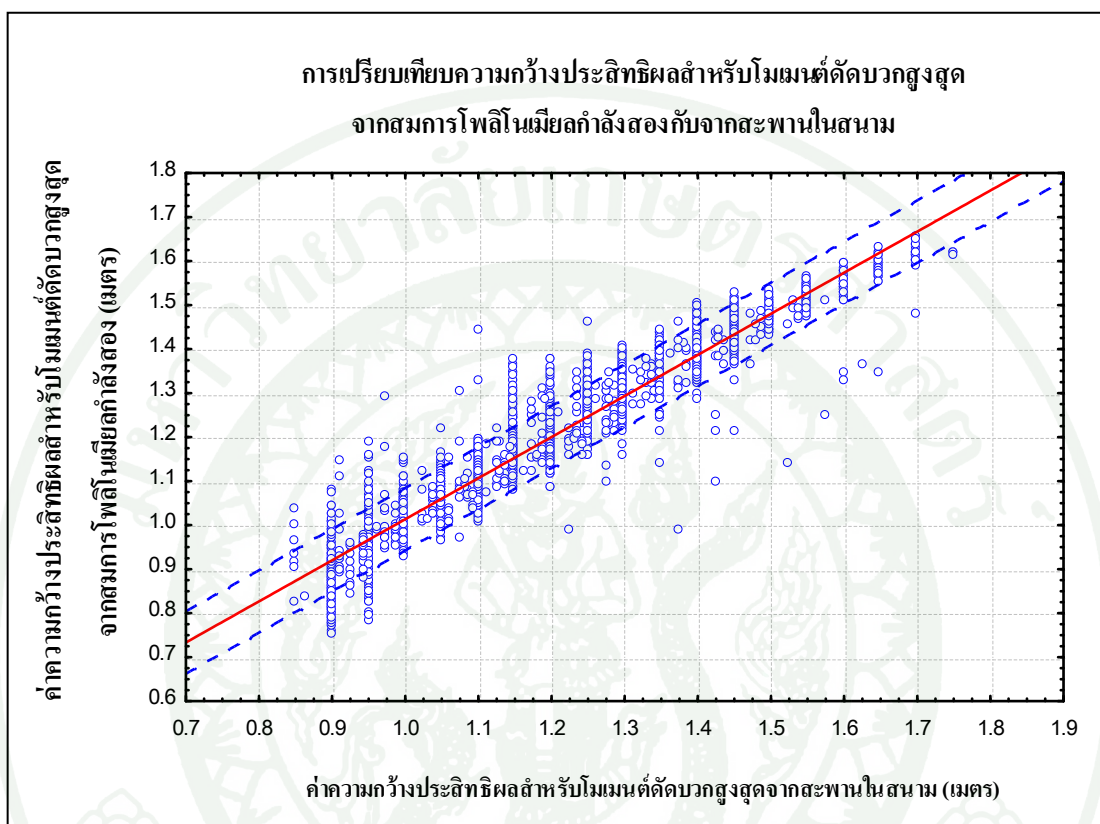
$$M_{\max}^- = y_2 P \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร} \quad (22)$$

เมื่อ $P = 5.450$ ตัน สำหรับรถบรรทุก H15 และ HS15

$P = 7.270$ ตัน สำหรับรถบรรทุก H20 และ HS20

สมการสำหรับค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด พบว่า ตัวแปรอิสระทุกตัวแสดงนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างประสิทธิผล ดังนั้นในการวิเคราะห์ จึงนำตัวแปรอิสระทั้งหมดเข้ามาใช้ในสมการ และจากการวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบหลายตัวแปร โดยใช้รูปแบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง พบว่า สมการโพลิโนเมียลกำลังสองให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.932 แสดงว่าสมการที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลทั้งหมดเป็นอย่างดี และเมื่อกำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.85 ได้กราฟเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนามดังแสดงในภาพที่ 103



ภาพที่ 103 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้น
สะพานจากสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม

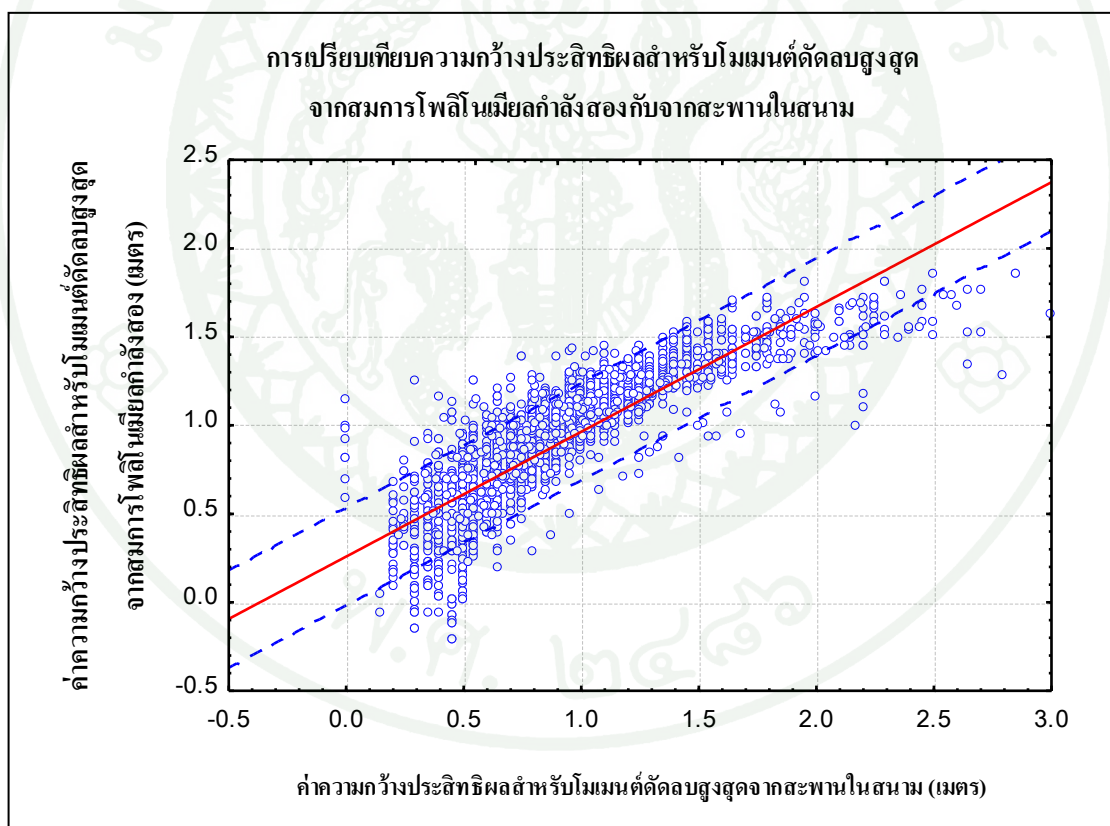
สมการสำหรับค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดสามารถแสดงได้
ดังนี้

$$\begin{aligned}
 y_3 = & 0.2314 + 0.005176X_1 - 0.00016558X_1^2 - 0.052626X_2 + 0.003456X_2^2 \\
 & + 0.32044X_3 + 0.02968X_3^2 + 0.35108X_4 + 2.5072X_4^2 \\
 & + 0.05068X_5 - 0.001967X_5^2
 \end{aligned}$$

เมตร (23)

สมการสำหรับค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับ โมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพาน

ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับ โมเมนต์ดัดลบสูงสุดแสดงความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระ ทุกตัวเช่นเดียวกับค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด ดังนั้นในการวิเคราะห์ จึงนำตัวแปรอิสระทั้งหมดเข้ามาใช้ในสมการ และจากการวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบหลายตัวแปร โดยใช้รูปแบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง พบว่า สมการโพลิโนเมียลกำลังสองให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.733 และเมื่อกำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.85 ได้กราฟเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับ โมเมนต์ดัดลบสูงสุดจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม ดังแสดงในภาพที่ 104



ภาพที่ 104 การเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้น สะพานจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง กับจากสะพานในสนาม

และสมการความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นที่สะพานแสดงได้ดังนี้

$$y_4 = 0.75875 - 0.049679X_1 + 0.00059938X_1^2 + 0.000001X_2 - 0.000001X_2^2 \\ - 0.35305X_3 + 0.00934X_3^2 - 6.54344X_4 + 26.61406X_4^2 \\ + 0.11168X_5 - 0.00495X_5^2 \quad \text{เมตร} \quad (24)$$

การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นที่สะพานจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสองที่เสนอแนะกับที่เสนอโดย AASHTO

ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดใต้พื้นที่สะพานสำหรับสะพานที่มีช่วงสะพานยาวที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ ที่ความยาว 30 เมตร ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นที่สะพาน 2.5 เมตร ความหนาของพื้นที่สะพาน 0.250 เมตร และตำแหน่งกึ่งกลางสะพานคือ 15 เมตร ได้ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดจากสมการโพลิโนเมียลดังนี้

$$y_1 = 0.188084 - 0.002037x_1 + 0.000015x_1^2 + 0.000001x_2 + 0.000001x_2^2 \\ + 0.092085x_3 - 0.010525x_3^2 + 0.253916x_4 - 0.195217x_4^2 \\ + 0.002585x_5 - 0.000093x_5^2 \quad (25)$$

โดยที่

$x_1 = 30$ เมตร (ความยาวช่วงคาน)

$x_3 = 2.5$ เมตร (ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นที่สะพาน)

$x_4 = 0.25$ เมตร (ความหนาของพื้นที่สะพาน)

$x_5 = 15$ เมตร (ระยะห่างจากตอม่อสะพาน)

ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นที่สะพานดังนี้

$$M_{\max}^+ = y_1 P = 0.3740P \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร} \quad (26)$$

และค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดจากสมการโพลิโนเมียลกำลังสองดังนี้

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 0.079140 + 0.006143x_1 - 0.000085x_1^2 + 0.000001x_2 + 0.000001x_2^2 \\
 & + 0.018455x_3 + 0.006681x_3^2 - 0.050530x_4 - 0.754273x_4^2 \\
 & - 0.012828x_5 + 0.000628x_5^2
 \end{aligned}
 \quad (27)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 30 \text{ เมตร (ความยาวช่วงคัน) } \\
 x_3 &= 2.5 \text{ เมตร (ระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพาน) } \\
 x_4 &= 0.25 \text{ เมตร (ความหนาของพื้นสะพาน) } \\
 x_5 &= 1 \text{ เมตร (ระยะห่างจากตอม่อสะพาน) }
 \end{aligned}$$

ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดบนพื้นสะพานดังนี้

$$M_{\max}^- = y_2 P = 0.2028P \text{ ตัน-เมตร/เมตร} \quad (28)$$

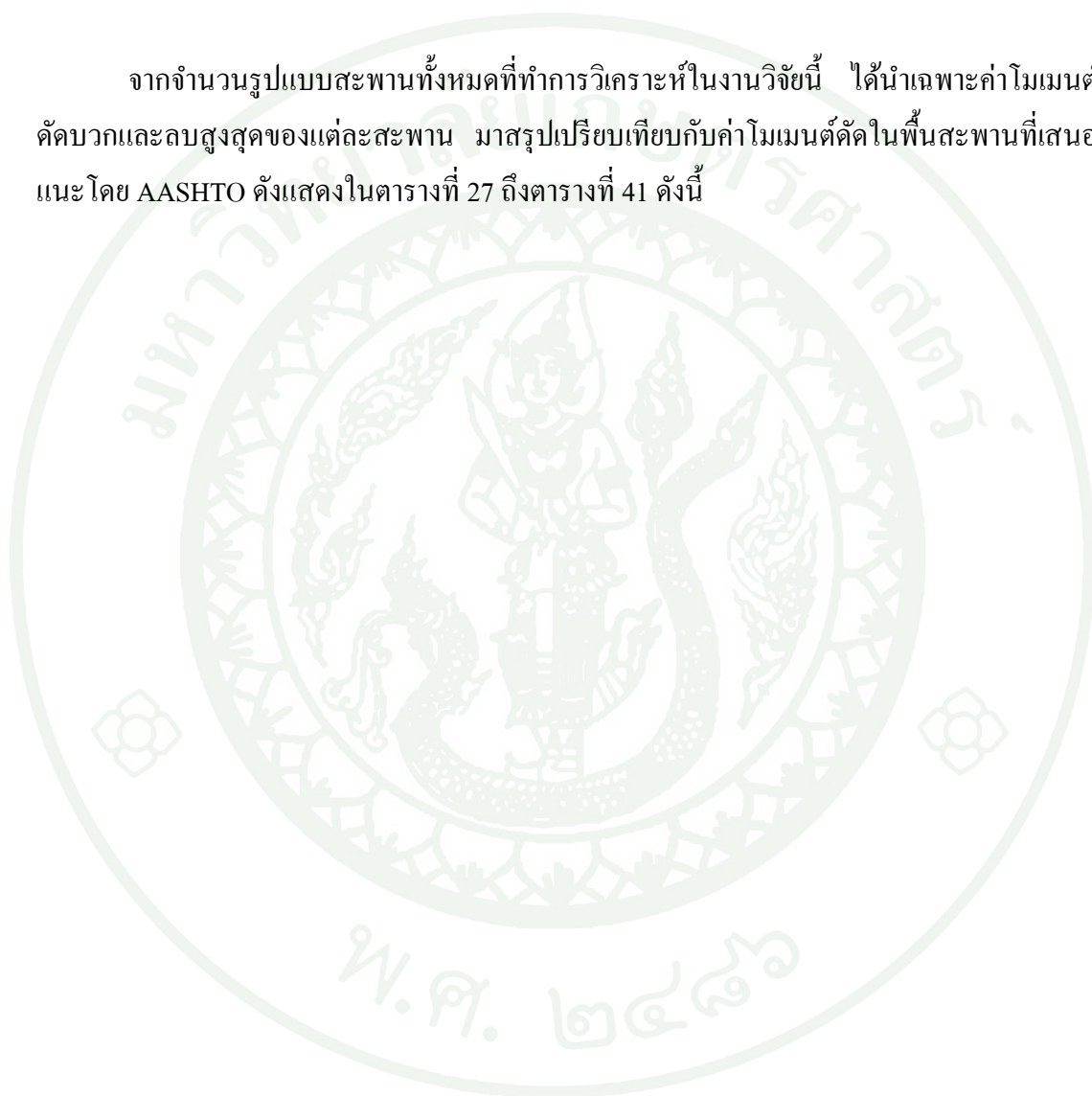
ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานที่ได้จาก AASHTO เมื่อ $S = 2.5$ เมตร (S คือค่าระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพาน) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 M_{\max}^\pm &= 0.8 \frac{(S+0.61)}{9.74} P \\
 &= 0.8 \frac{(2.5+0.61)}{9.74} P \\
 &= 0.8(0.3193)P \\
 &= 0.2554P \text{ ตัน-เมตร/เมตร}
 \end{aligned}
 \quad (29)$$

ตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบนั้น ได้เลือกตัวอย่างสะพานที่มีความยาวช่วงสะพาน, ระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพาน และความหนาของพื้นสะพานสูงสุดจากตัวอย่างทั้งหมด รวมทั้งตำแหน่งที่พิจารณาค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด คือที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงสะพานทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์ดัดบวกที่เสนอแนะโดย AASHTO ซึ่งแนะนำให้ใช้ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานเท่านั้น และตลอดความยาวสะพานจากการเปรียบเทียบแสดงว่า ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่เสนอโดย AASHTO นั้นน้อยกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็กเสริมด้านล่างที่คำนวณตามข้อเสนอแนะของ AASHTO

นั้นน้อยเกินไป ในกรณีที่รถบรรทุกอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดตามข้อเสนอแนะของ AASHTO ให้ค่าสูงกว่างานวิจัยนี้ แสดงว่าปริมาณเหล็กเสริมบนเพื่อด้านทานโมเมนต์ลบตามข้อเสนอแนะของ AASHTO อยู่ในด้านที่ปลอดภัยโดยมีปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากงานวิจัยนี้

จากจำนวนรูปแบบสะพานทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้นำเฉพาะค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของแต่ละสะพาน มาสรุปเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานที่เสนอแนะโดย AASHTO ดังแสดงในตารางที่ 27 ถึงตารางที่ 41 ดังนี้



ตารางที่ 27 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับ โมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
10 เมตร, 2 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน(เมตร)	ความหนา พื้น สะพาน (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO* (ตัน-เมตร/เมตร)
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	
6	1.50	0.150	0.95	0.3259	0.70	0.1258	0.1733
		0.175	0.95	0.3332	0.70	0.1252	
		0.200	0.95	0.3395	0.75	0.1160	
		0.225	0.95	0.3448	0.75	0.1070	
		0.250	0.95	0.3493	0.75	0.0969	
5	1.75	0.150	0.95	0.3396	0.70	0.1664	0.1938
		0.175	0.95	0.3474	0.70	0.1583	
		0.200	0.95	0.3542	0.75	0.1482	
		0.225	0.95	0.3599	0.75	0.1371	
		0.250	0.95	0.3648	0.80	0.1242	
5	2.00	0.150	1.10	0.3517	0.70	0.1933	0.2144
		0.175	1.10	0.3600	0.75	0.1871	
		0.200	1.20	0.3674	0.75	0.1762	
		0.225	1.20	0.3737	0.80	0.1640	
		0.250	1.30	0.3790	0.80	0.1496	
4	2.25	0.150	1.25	0.3634	0.70	0.2045	0.2349
		0.175	1.30	0.3723	0.75	0.1907	
		0.200	1.30	0.3802	0.80	0.1794	
		0.225	1.35	0.3871	0.80	0.1639	
		0.250	1.40	0.3928	0.85	0.1467	
4	2.50	0.150	1.40	0.3724	0.75	0.2378	0.2554
		0.175	1.35	0.3815	0.80	0.2307	
		0.200	1.45	0.3897	0.85	0.2212	
		0.225	1.50	0.3968	0.90	0.2074	
		0.250	1.55	0.4028	0.90	0.1955	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 28 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
10 เมตร, 3 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
8	1.50	0.150	0.95	0.3259	0.70	0.1321	0.1733
		0.175	0.95	0.3332	0.70	0.1252	
		0.200	0.95	0.3396	0.75	0.1165	
		0.225	1.00	0.3449	0.75	0.1065	
		0.250	1.00	0.3494	0.80	0.0969	
7	1.75	0.150	1.00	0.3396	0.70	0.1664	0.1938
		0.175	1.05	0.3474	0.70	0.1570	
		0.200	1.05	0.3543	0.75	0.1477	
		0.225	1.10	0.3601	0.75	0.1366	
		0.250	1.15	0.3649	0.80	0.1244	
6	2.00	0.150	1.15	0.3518	0.70	0.1956	0.2144
		0.175	1.15	0.3601	0.75	0.1871	
		0.200	1.20	0.3675	0.75	0.1761	
		0.225	1.25	0.3738	0.80	0.1638	
		0.250	1.25	0.3790	0.85	0.1509	
6	2.25	0.150	1.25	0.3635	0.70	0.2045	0.2349
		0.175	1.30	0.3725	0.75	0.1927	
		0.200	1.30	0.3804	0.80	0.1793	
		0.225	1.35	0.3873	0.85	0.1637	
		0.250	1.40	0.3929	0.90	0.1470	
5	2.50	0.150	1.30	0.3725	0.75	0.2404	0.2554
		0.175	1.35	0.3817	0.80	0.2313	
		0.200	1.40	0.3899	0.85	0.2212	
		0.225	1.45	0.3970	0.90	0.2088	
		0.250	1.50	0.4029	0.95	0.1943	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 29 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
10 เมตร, 4 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน(เมตร)	ความหนา พื้น สะพาน (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	
10	1.50	0.150	0.95	0.3259	0.70	0.1338	0.1733
		0.175	0.95	0.3332	0.70	0.1263	
		0.200	0.95	0.3396	0.75	0.1176	
		0.225	1.00	0.3449	0.75	0.1081	
		0.250	1.00	0.3494	0.80	0.0980	
9	1.75	0.150	1.00	0.3396	0.70	0.1676	0.1938
		0.175	1.05	0.3474	0.70	0.1594	
		0.200	1.05	0.3543	0.75	0.1493	
		0.225	1.10	0.3601	0.75	0.1380	
		0.250	1.10	0.3649	0.80	0.1258	
8	2.00	0.150	1.15	0.3518	0.70	0.1972	0.2144
		0.175	1.15	0.3601	0.75	0.1882	
		0.200	1.20	0.3675	0.75	0.1774	
		0.225	1.25	0.3738	0.80	0.1650	
		0.250	1.25	0.3791	0.85	0.1517	
7	2.25	0.150	1.20	0.3635	0.70	0.2061	0.2349
		0.175	1.25	0.3725	0.75	0.1947	
		0.200	1.25	0.3804	0.80	0.1807	
		0.225	1.30	0.3870	0.85	0.1649	
		0.250	1.35	0.3929	0.90	0.1479	
7	2.50	0.150	1.30	0.3725	0.75	0.2414	0.2554
		0.175	1.35	0.3817	0.80	0.2327	
		0.200	1.40	0.3899	0.85	0.2218	
		0.225	1.45	0.3970	0.90	0.2094	
		0.250	1.50	0.4030	0.95	0.1958	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 30 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
15 เมตร, 2 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
		(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
6	1.50	0.150	0.95	0.3259	0.70	0.1338	0.1733
		0.175	0.95	0.3332	0.70	0.1263	
		0.200	0.95	0.3396	0.75	0.1176	
		0.225	1.00	0.3449	0.75	0.1081	
		0.250	1.00	0.3494	0.80	0.0980	
5	1.75	0.150	1.00	0.3396	0.70	0.1676	0.1938
		0.175	1.05	0.3474	0.70	0.1594	
		0.200	1.05	0.3543	0.75	0.1493	
		0.225	1.10	0.3601	0.75	0.1380	
		0.250	1.10	0.3649	0.80	0.1258	
	2.00	0.150	1.15	0.3518	0.70	0.1972	0.2144
		0.175	1.15	0.3601	0.75	0.1882	
		0.200	1.20	0.3675	0.75	0.1774	
		0.225	1.25	0.3738	0.80	0.1650	
		0.250	1.25	0.3791	0.85	0.1517	
	2.25	0.150	1.20	0.3635	0.70	0.2061	0.2349
		0.175	1.25	0.3725	0.75	0.1947	
		0.200	1.25	0.3804	0.80	0.1807	
		0.225	1.30	0.3870	0.85	0.1649	
		0.250	1.35	0.3929	0.90	0.1479	
	2.50	0.150	1.30	0.3725	0.75	0.2414	0.2554
		0.175	1.35	0.3817	0.80	0.2327	
		0.200	1.40	0.3899	0.85	0.2218	
		0.225	1.45	0.3970	0.90	0.2094	
		0.250	1.50	0.4030	0.95	0.1958	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 31 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
15 เมตร, 3 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน(เมตร)	ความหนา พื้น สะพาน (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO* (ตัน-เมตร/เมตร)
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	
8	1.50	0.150	0.95	0.3228	0.65	0.1378	0.1733
		0.175	1.00	0.3292	0.65	0.1323	
		0.200	1.05	0.3347	0.70	0.1258	
		0.225	1.05	0.3395	0.75	0.1183	
		0.250	1.10	0.3436	0.80	0.1092	
7	1.75	0.150	1.05	0.3374	0.65	0.1704	0.1938
		0.175	1.10	0.3445	0.65	0.1657	
		0.200	1.15	0.3504	0.70	0.1592	
		0.225	1.20	0.3556	0.75	0.1509	
		0.250	1.25	0.3601	0.80	0.1415	
6	2.00	0.150	1.20	0.3504	0.65	0.2012	0.2144
		0.175	1.25	0.3580	0.65	0.1987	
		0.200	1.25	0.3646	0.70	0.1886	
		0.225	1.30	0.3703	0.75	0.1798	
		0.250	1.35	0.3752	0.80	0.1692	
6	2.25	0.150	1.30	0.3622	0.70	0.2113	0.2349
		0.175	1.35	0.3713	0.70	0.2042	
		0.200	1.40	0.3794	0.70	0.1947	
		0.225	1.45	0.3864	0.80	0.1832	
		0.250	1.50	0.3924	0.85	0.1702	
5	2.50	0.150	1.40	0.3725	0.70	0.2461	0.2554
		0.175	1.45	0.3814	0.75	0.2397	
		0.200	1.50	0.3892	0.75	0.2342	
		0.225	1.55	0.3959	0.80	0.2254	
		0.250	1.60	0.4015	0.85	0.2155	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 32 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
15 เมตร, 4 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน(เมตร)	ความหนา พื้น สะพาน (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO* (ตัน-เมตร/เมตร)
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	ความกว้าง ประสิทธิภาพ (เมตร)	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด (ตัน-เมตร/เมตร)	
10	1.50	0.150	1.00	0.3228	0.65	0.1388	0.1733
		0.175	1.00	0.3292	0.65	0.1333	
		0.200	1.00	0.3347	0.70	0.1268	
		0.225	1.05	0.3395	0.75	0.1193	
		0.250	1.10	0.3436	0.80	0.1111	
9	1.75	0.150	1.05	0.3374	0.70	0.1726	0.1938
		0.175	1.10	0.3444	0.65	0.1673	
		0.200	1.15	0.3504	0.70	0.1604	
		0.225	1.20	0.3556	0.75	0.1520	
		0.250	1.20	0.3601	0.80	0.1426	
8	2.00	0.150	1.20	0.3504	0.70	0.2024	0.2144
		0.175	1.25	0.3580	0.65	0.1971	
		0.200	1.30	0.3647	0.70	0.1898	
		0.225	1.30	0.3704	0.75	0.1810	
		0.250	1.35	0.3752	0.80	0.1709	
7	2.25	0.150	1.25	0.3622	0.70	0.2130	0.2349
		0.175	1.30	0.3713	0.70	0.2057	
		0.200	1.35	0.3794	0.75	0.1961	
		0.225	1.35	0.3864	0.80	0.1846	
		0.250	1.45	0.3924	0.85	0.1715	
7	2.50	0.150	1.35	0.3725	0.75	0.2471	0.2554
		0.175	1.45	0.3814	0.75	0.2420	
		0.200	1.50	0.3893	0.80	0.2349	
		0.225	1.55	0.3960	0.80	0.2263	
		0.250	1.60	0.4016	0.85	0.3490	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 33 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
20 เมตร, 2 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
6	1.50	0.150	1.00	0.3155	0.45	0.1429	0.1733
		0.175	1.00	0.3209	0.50	0.1392	
		0.200	1.05	0.3257	0.50	0.1347	
		0.225	1.10	0.3299	0.55	0.1293	
		0.250	1.10	0.3376	0.55	0.1239	
5	1.75	0.150	1.10	0.3301	0.60	0.1751	0.1938
		0.175	1.10	0.3360	0.60	0.1723	
		0.200	1.15	0.3413	0.60	0.1682	
		0.225	1.20	0.3461	0.65	0.1629	
		0.250	1.25	0.3503	0.65	0.1565	
5	2.00	0.150	1.20	0.3432	0.60	0.2045	0.2144
		0.175	1.20	0.3496	0.60	0.2021	
		0.200	1.30	0.3554	0.60	0.1981	
		0.225	1.35	0.3606	0.65	0.1927	
		0.250	1.40	0.3652	0.65	0.1861	
4	2.25	0.150	1.35	0.3587	0.65	0.2020	0.2349
		0.175	1.40	0.3661	0.70	0.1996	
		0.200	1.45	0.3727	0.70	0.1964	
		0.225	1.50	0.3786	0.75	0.1825	
		0.250	1.55	0.3838	0.80	0.1758	
4	2.50	0.150	1.50	0.3651	0.70	0.2498	0.2554
		0.175	1.55	0.3728	0.70	0.2474	
		0.200	1.60	0.3799	0.75	0.2437	
		0.225	1.65	0.3862	0.75	0.2386	
		0.250	1.70	0.3918	0.80	0.2322	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ย

ตารางที่ 34 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
20 เมตร, 3 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิผล	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิผล	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
8	1.50	0.150	1.00	0.3155	0.45	0.1429	0.1733
		0.175	1.00	0.3209	0.50	0.1392	
		0.200	1.05	0.3257	0.50	0.1347	
		0.225	1.10	0.3300	0.55	0.1293	
		0.250	1.10	0.3337	0.55	0.1233	
7	1.75	0.150	1.10	0.3302	0.60	0.1751	0.1938
		0.175	1.15	0.3361	0.60	0.1723	
		0.200	1.20	0.3414	0.60	0.1682	
		0.225	1.20	0.3460	0.65	0.1629	
		0.250	1.25	0.3502	0.65	0.1565	
6	2.00	0.150	1.20	0.3432	0.60	0.2045	0.2144
		0.175	1.25	0.3497	0.65	0.2021	
		0.200	1.30	0.3555	0.60	0.1981	
		0.225	1.35	0.3606	0.65	0.1927	
		0.250	1.40	0.3651	0.70	0.1861	
6	2.25	0.150	1.35	0.3589	0.70	0.2068	0.2349
		0.175	1.40	0.3661	0.75	0.2026	
		0.200	1.40	0.3726	0.75	0.1934	
		0.225	1.45	0.3784	0.75	0.1883	
		0.250	1.50	0.3834	0.80	0.1786	
5	2.50	0.150	1.40	0.3652	0.70	0.2497	0.2554
		0.175	1.45	0.3729	0.75	0.2472	
		0.200	1.55	0.3799	0.75	0.2436	
		0.225	1.60	0.3860	0.75	0.2385	
		0.250	1.65	0.3914	0.80	0.2322	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 35 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นที่สะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
20 เมตร, 4 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
10	1.50	0.150	1.00	0.3155	0.45	0.1429	0.1733
		0.175	1.05	0.3209	0.50	0.1392	
		0.200	1.05	0.3257	0.50	0.1347	
		0.225	1.10	0.3300	0.55	0.1293	
		0.250	1.10	0.3338	0.55	0.1233	
9	1.75	0.150	1.10	0.3302	0.60	0.1751	0.1938
		0.175	1.10	0.3361	0.60	0.1723	
		0.200	1.15	0.3414	0.60	0.1682	
		0.225	1.20	0.3461	0.65	0.1629	
		0.250	1.25	0.3502	0.65	0.1565	
8	2.00	0.150	1.20	0.3432	0.60	0.2045	0.2144
		0.175	1.25	0.3497	0.65	0.2021	
		0.200	1.30	0.3555	0.60	0.1981	
		0.225	1.35	0.3606	0.65	0.1927	
		0.250	1.40	0.3652	0.70	0.1861	
7	2.25	0.150	1.30	0.3589	0.70	0.2068	0.2349
		0.175	1.35	0.3661	0.75	0.2022	
		0.200	1.40	0.3726	0.75	0.1964	
		0.225	1.45	0.3784	0.75	0.1883	
		0.250	1.50	0.3834	0.80	0.1786	
7	2.50	0.150	1.40	0.3653	0.70	0.2497	0.2554
		0.175	1.45	0.3729	0.75	0.2474	
		0.200	1.55	0.3799	0.75	0.2436	
		0.225	1.60	0.3861	0.75	0.2385	
		0.250	1.65	0.3915	0.80	0.2322	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 36 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
25 เมตร, 2 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
6	1.50	0.150	1.00	0.3104	0.65	0.1451	0.1733
		0.175	1.05	0.3149	0.65	0.1424	
		0.200	1.10	0.3191	0.65	0.1391	
		0.225	1.10	0.3228	0.65	0.1351	
		0.250	1.15	0.3262	0.65	0.1304	
5	1.75	0.150	1.10	0.3249	0.65	0.1745	0.1938
		0.175	1.15	0.3299	0.65	0.1741	
		0.200	1.20	0.3345	0.65	0.1716	
		0.225	1.25	0.3386	0.65	0.1681	
		0.250	1.30	0.3424	0.65	0.1636	
5	2.00	0.150	1.20	0.3378	0.65	0.2044	0.2144
		0.175	1.25	0.3432	0.65	0.2034	
		0.200	1.30	0.3483	0.65	0.2012	
		0.225	1.35	0.3528	0.65	0.1979	
		0.250	1.40	0.3570	0.65	0.1935	
4	2.25	0.150	1.35	0.3497	0.65	0.2167	0.2349
		0.175	1.40	0.3558	0.65	0.2148	
		0.200	1.45	0.3615	0.65	0.2115	
		0.225	1.50	0.3667	0.65	0.2067	
		0.250	1.60	0.3714	0.65	0.2007	
4	2.50	0.150	1.50	0.3594	0.70	0.2499	0.2554
		0.175	1.55	0.3660	0.70	0.2490	
		0.200	1.60	0.3721	0.65	0.2470	
		0.225	1.65	0.3778	0.70	0.2439	
		0.250	1.70	0.3828	0.75	0.2398	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 37 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิผลของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
25 เมตร, 3 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิผล	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิผล	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
8	1.50	0.150	1.00	0.3104	0.65	0.1451	0.1733
		0.175	1.00	0.3150	0.65	0.1424	
		0.200	1.05	0.3191	0.65	0.1391	
		0.225	1.10	0.3228	0.70	0.1351	
		0.250	1.15	0.3262	0.70	0.1304	
7	1.75	0.150	1.10	0.3250	0.60	0.1756	0.1938
		0.175	1.15	0.3300	0.65	0.1741	
		0.200	1.20	0.3345	0.65	0.1716	
		0.225	1.25	0.3386	0.70	0.1681	
		0.250	1.30	0.3423	0.70	0.1636	
6	2.00	0.150	1.20	0.3378	0.65	0.2044	0.2144
		0.175	1.30	0.3433	0.65	0.2034	
		0.200	1.35	0.3483	0.65	0.2012	
		0.225	1.40	0.3528	0.70	0.1979	
		0.250	1.45	0.3569	0.70	0.1935	
6	2.25	0.150	1.35	0.3498	0.65	0.2167	0.2349
		0.175	1.40	0.3558	0.70	0.2148	
		0.200	1.45	0.3614	0.70	0.2115	
		0.225	1.50	0.3665	0.75	0.2067	
		0.250	1.55	0.3710	0.75	0.2006	
5	2.50	0.150	1.40	0.3595	0.70	0.2499	0.2554
		0.175	1.50	0.3660	0.70	0.2489	
		0.200	1.55	0.3721	0.75	0.2469	
		0.225	1.65	0.3776	0.75	0.2438	
		0.250	1.70	0.3825	0.75	0.2397	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 38 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
25 เมตร, 4 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
10	1.50	0.150	1.00	0.3104	0.65	0.1451	0.1733
		0.175	1.05	0.3150	0.65	0.1424	
		0.200	1.10	0.3191	0.65	0.1391	
		0.225	1.10	0.3228	0.70	0.1351	
		0.250	1.15	0.3262	0.70	0.1304	
9	1.75	0.150	1.10	0.3250	0.65	0.1756	0.1938
		0.175	1.15	0.3300	0.65	0.1741	
		0.200	1.20	0.3345	0.65	0.1716	
		0.225	1.25	0.3386	0.70	0.1681	
		0.250	1.30	0.3423	0.70	0.1636	
8	2.00	0.150	1.25	0.3378	0.65	0.2043	0.2144
		0.175	1.30	0.3433	0.65	0.2034	
		0.200	1.35	0.3483	0.65	0.2012	
		0.225	1.40	0.3529	0.70	0.1979	
		0.250	1.45	0.3569	0.70	0.1935	
7	2.25	0.150	1.30	0.3497	0.65	0.2167	0.2349
		0.175	1.35	0.3558	0.65	0.2148	
		0.200	1.45	0.3614	0.65	0.2115	
		0.225	1.50	0.3665	0.70	0.2067	
		0.250	1.55	0.3710	0.75	0.2007	
7	2.50	0.150	1.45	0.3595	0.70	0.2499	0.2554
		0.175	1.50	0.3660	0.70	0.2489	
		0.200	1.55	0.3721	0.75	0.2469	
		0.225	1.65	0.3776	0.75	0.2438	
		0.250	1.70	0.3825	0.75	0.2397	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 39 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นที่สะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นที่สะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
30 เมตร, 2 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
6	1.50	0.150	1.00	0.3076	0.60	0.1452	0.1733
		0.175	1.05	0.3114	0.60	0.1430	
		0.200	1.05	0.3148	0.60	0.1402	
		0.225	1.10	0.3178	0.65	0.1368	
		0.250	1.15	0.3206	0.65	0.1329	
5	1.75	0.150	1.10	0.3222	0.60	0.1742	0.1938
		0.175	1.15	0.3264	0.60	0.1733	
		0.200	1.20	0.3302	0.60	0.1720	
		0.225	1.25	0.3337	0.65	0.1693	
		0.250	1.30	0.3368	0.65	0.1658	
5	2.00	0.150	1.20	0.3350	0.60	0.2115	0.2144
		0.175	1.25	0.3397	0.60	0.2105	
		0.200	1.30	0.3439	0.60	0.2083	
		0.225	1.35	0.3478	0.65	0.2050	
		0.250	1.40	0.3513	0.65	0.2007	
4	2.25	0.150	1.35	0.3467	0.60	0.2151	0.2349
		0.175	1.40	0.3520	0.60	0.2142	
		0.200	1.45	0.3569	0.65	0.2112	
		0.225	1.50	0.3614	0.70	0.2083	
		0.250	1.60	0.3654	0.70	0.2031	
4	2.50	0.150	1.50	0.3564	0.65	0.2489	0.2554
		0.175	1.55	0.3621	0.70	0.2484	
		0.200	1.60	0.3675	0.70	0.2471	
		0.225	1.65	0.3724	0.75	0.2452	
		0.250	1.75	0.3768	0.75	0.2421	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 40 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
30 เมตร, 3 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
8	1.50	0.150	1.00	0.3076	0.60	0.1452	0.1733
		0.175	1.05	0.3114	0.60	0.1430	
		0.200	1.10	0.3148	0.65	0.1402	
		0.225	1.10	0.3178	0.65	0.1368	
		0.250	1.15	0.3206	0.65	0.1329	
7	1.75	0.150	1.10	0.3222	0.60	0.1748	0.1938
		0.175	1.15	0.3264	0.60	0.1738	
		0.200	1.20	0.3302	0.65	0.1720	
		0.225	1.25	0.3336	0.65	0.1688	
		0.250	1.30	0.3367	0.65	0.1658	
6	2.00	0.150	1.20	0.3350	0.60	0.2115	0.2144
		0.175	1.25	0.3397	0.60	0.2099	
		0.200	1.30	0.3439	0.65	0.2078	
		0.225	1.40	0.3477	0.65	0.2052	
		0.250	1.45	0.3512	0.65	0.2007	
6	2.25	0.150	1.35	0.3468	0.60	0.2171	0.2349
		0.175	1.40	0.3520	0.60	0.2159	
		0.200	1.45	0.3568	0.70	0.2135	
		0.225	1.50	0.3611	0.75	0.2099	
		0.250	1.55	0.3650	0.75	0.2051	
5	2.50	0.150	1.40	0.3565	0.70	0.2472	0.2554
		0.175	1.50	0.3622	0.70	0.2483	
		0.200	1.55	0.3674	0.70	0.2471	
		0.225	1.60	0.3721	0.80	0.2249	
		0.250	1.70	0.3764	0.80	0.2404	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

ตารางที่ 41 การเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน และความกว้าง
ประสิทธิภาพของพื้นสะพานสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดของสะพานยาว
30 เมตร, 4 ช่องจราจร

จำนวน คาน รองรับพื้น สะพาน	ระยะห่าง ระหว่างคาน รองรับพื้น สะพาน	ความหนา พื้น สะพาน	โมเมนต์ดัดบวกสูงสุด		โมเมนต์ดัดลบสูงสุด		โมเมนต์ดัด ที่เสนอโดย AASHTO*
			ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดบวก สูงสุด	ความกว้าง ประสิทธิภาพ	โมเมนต์ดัดลบ สูงสุด	
สะพาน	สะพาน(เมตร)	(เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)	(ตัน-เมตร/เมตร)
10	1.50	0.150	1.00	0.3076	0.60	0.1459	0.1733
		0.175	1.05	0.3114	0.60	0.1438	
		0.200	1.05	0.3148	0.65	0.1410	
		0.225	1.10	0.3178	0.65	0.1376	
		0.250	1.15	0.3206	0.65	0.1337	
9	1.75	0.150	1.10	0.3222	0.60	0.1758	0.1938
		0.175	1.15	0.3264	0.60	0.1749	
		0.200	1.20	0.3302	0.65	0.1730	
		0.225	1.25	0.3336	0.65	0.1703	
		0.250	1.30	0.3367	0.65	0.1668	
8	2.00	0.150	1.25	0.3350	0.60	0.2130	0.2144
		0.175	1.25	0.3397	0.60	0.2120	
		0.200	1.30	0.3439	0.65	0.2098	
		0.225	1.35	0.3477	0.65	0.2065	
		0.250	1.40	0.3512	0.65	0.2022	
7	2.25	0.150	1.30	0.3468	0.65	0.2171	0.2349
		0.175	1.35	0.3520	0.60	0.2159	
		0.200	1.40	0.3568	0.70	0.2135	
		0.225	1.50	0.3611	0.75	0.2099	
		0.250	1.55	0.3650	0.75	0.2051	
7	2.50	0.150	1.40	0.3564	0.70	0.2498	0.2554
		0.175	1.50	0.3622	0.70	0.2494	
		0.200	1.55	0.3674	0.70	0.2481	
		0.225	1.60	0.3721	0.75	0.2459	
		0.250	1.70	0.3764	0.75	0.2429	

หมายเหตุ * ใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางคานรองรับพื้นสะพาน

สรุป

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานและผลการทดสอบสะพานในสนาม สรุปได้ดังนี้

1. สำหรับสะพานช่วงเดียวธรรมดาที่มีความยาวช่วงสะพาน จำนวนช่องจราจร จำนวน คานรองรับพื้นสะพาน และความหนาของพื้นสะพานแตกต่างกัน หากมีค่าระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพานเท่ากันแล้ว จะมีตำแหน่งที่ล้อรถบรรทุกทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ตำแหน่งเดียวกัน
2. โมเมนต์ดัดในพื้นสะพานในตำแหน่งที่ห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้นจะมีค่าโมเมนต์ดัดบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบจะมีค่าลดลง
3. ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากตอม่อสะพานมากขึ้น
4. ในตำแหน่งที่ห่างจากตอม่อสะพานเป็นสัดส่วนของความยาวสะพานเดียวกัน เมื่อความยาวช่วงสะพานเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ดัดบวกในพื้นสะพานมีค่าลดลงและค่าโมเมนต์ดัดลบในพื้นสะพานมีค่าเพิ่มขึ้น
5. เมื่อความยาวช่วงสะพานเพิ่มขึ้น ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกของพื้นสะพานมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดลบของพื้นสะพานมีค่าน้อยลง
6. เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพาน ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพานไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพาน
7. ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานมีค่าคงที่เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนคานรองรับพื้นสะพาน

8. การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพาน มีผลต่อค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานมากที่สุด
9. ความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างคันรองรับพื้นสะพานเพิ่มขึ้น
10. เมื่อความหนาของพื้นสะพานเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบสูงสุดในพื้นสะพานมีค่าลดลง
11. ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดในพื้นสะพานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของพื้นสะพานเพิ่มขึ้น
12. ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดที่คำนวณจากแบบจำลองสะพานและที่คำนวณได้จากสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี แตกต่างกันตั้งแต่ 5.08% - 15.50%
13. ค่าโมเมนต์ดัดบวกและลบสูงสุดที่คำนวณจากแบบจำลองสะพานและที่คำนวณได้จากสะพานข้ามแม่น้ำแคว แตกต่างกันตั้งแต่ 3.27% - 15.44%
14. ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่เสนอโดย AASHTO นั้น ต่ำกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ 28.32 – 50.39% ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดลบ ที่เสนอโดย AASHTO สูงกว่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ 0.62 - 78.91%
15. สมการสำหรับค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดที่ด้านล่างของพื้นสะพานคือ

$$M_{\max}^+ = y_1 P \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร}$$

เมื่อ

$$y_1 = 0.188084 - 0.002037x_1 + 0.000015x_1^2 + 0.000001x_2 + 0.000001x_2^2 + 0.092085x_3 - 0.010525x_3^2 + 0.253916x_4 - 0.195217x_4^2 + 0.002585x_5 - 0.000093x_5^2$$

และสำหรับค่าโมเมนต์คดสูงสุดที่ด้านบนของพื้นสะพานคือ

$$M_{\max}^- = y_2 P \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} y_2 = & 0.079140 + 0.006143x_1 - 0.000085x_1^2 + 0.000001x_2 \\ & + 0.000001x_2^2 + 0.018455x_3 + 0.006681x_3^2 - 0.050530x_4 \\ & - 0.754273x_4^2 - 0.012828x_5 + 0.000628x_5^2 \end{aligned}$$

และ

$$P = 5.450 \text{ ตัน สำหรับรถบรรทุก H15 และ HS15}$$

$$P = 7.270 \text{ ตัน สำหรับรถบรรทุก H20 และ HS20}$$

ข้อเสนอแนะ

1. โมเมนต์คัตบวกในพื้นที่สะพานด้านล่างมีค่ามากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางสะพานและมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้กับตอม่อสะพาน การเสริมเหล็กบริเวณด้านล่างของพื้นที่สะพาน เพื่อดำเนินงานโมเมนต์คัตบวก จึงควรจะต้องมีปริมาณมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางสะพาน และมีปริมาณลดลงที่บริเวณใกล้กับตอม่อสะพาน
2. โมเมนต์คัตลบในพื้นที่สะพานด้านบนบริเวณเหนือคานรองรับพื้นที่สะพาน มีค่ามากที่สุดที่บริเวณใกล้กับตอม่อสะพาน และมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้บริเวณกึ่งกลางสะพาน การเสริมเหล็กบริเวณด้านบนของพื้นที่สะพานเพื่อดำเนินงานโมเมนต์คัตลบ จึงควรจะต้องมีปริมาณมากที่สุดบริเวณใกล้กับตอม่อสะพานและมีปริมาณลดลงที่บริเวณกึ่งกลางสะพาน
3. ปริมาณเหล็กเสริมดำเนินการโมเมนต์คัตบวกและลบตามระยะห่างจากตอม่อสะพาน ควรแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็นสี่ช่วงคือ ที่บริเวณ $L/8$, $L/4$, $3L/8$ และ $L/2$ เมื่อ L คือความยาวช่วงสะพาน ค่าโมเมนต์คัตทั้งบวกและลบสูงสุดของแต่ละช่วง สามารถคำนวณได้จากสมการที่เสนอแนะโดยเลือกใช้ค่าสูงสุดของแต่ละช่วงเพื่อนำมาใช้ในการหาปริมาณเหล็กเสริม โดยเสริมเหล็กคงที่ตลอดช่วงนั้นๆ
4. ควรมีการวิเคราะห์โมเมนต์คัตในพื้นที่สะพานคอนกรีตของสะพานทางหลวง ชนิดแผ่นพื้นบนคานเหล็กรูปพรรณ เนื่องจากคานเหล็กรูปพรรณมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากคานคอนกรีตอัดแรง ทำให้โมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นในพื้นที่สะพานมีลักษณะแตกต่างกัน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ศุภวุฒิ ควนอวน และสมโพธิ วิวิธเกสรวงศ์ 1999. เส้นอิทธิพลของคานต่อเนื่องบนฐานรองรับ
ยึดหยุ่นโดยวิธีสถิติเฟนส์โดยตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).1996.

Standard Specifications for Highway Bridges. Sixteenth Edition. American
Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.,
U.S.A.

Computers and Structures, Inc. 2008. **SAP version 12.0.** 1995 University Ave. Berkeley, CA
94704, U.S.A.

Wilson, E.N. 1974. **Influence Lines for Beams on Elastic Supports.** Journal of the
Structural Division Vol. 100 No. 6 June 1974: 1325-1330.

Firmage, D.A. and R.H. Chiu. 1961. **Influence Lines for Continuous Beams on Elastic
Supports.** Brigham Young University Press, Utah.

Ioannides, A.M. and Thompson, M.R. and Barenberg, E.J. 1985. **Westergaard Solutions
Reconsidered.** Transportation Research Record, No 1043, TRB National Research

Cao, L. 1996, **Analysis and Design of Slab-on-Girder Highway Bridge Deck.** Ph.D.Thesis,
University of Colorado, U.S.A.

Petrou, M.F. 1996. **Static Behavior of Noncomposite Concrete Bridge Decks under
Concentrated Loads.** Journal of Bridge Engineering. Volume 1, 1996: 143-154.

- Park, N.H. and Kang, Y.J. 2003. **Analytical and Experimental Study on the Behavior of Elastically Support Reinforced Concrete Decks.** Structural Engineering and Mechanics, Vol. 15, No. 6, 629-651.
- Tangwongchai, S. 2003. **Effect of Beam Flexibility to Bending Moment in Slab of Slab Beam Bridge.** Thesis. Master of Engineering. Kasetsart University.
- Westergaard, H. M. 1930. **Computational of Stresses in Bridge Slabs Due to Wheel Loads.** Public Roads, March, 1930: 1-23.
- Yousif, Z. and Hindi, R. 2006. **Live Load Distribution Factor for Highway Bridges Based on AASHTO-LRFD and Finite Element Analysis.** 2006 Structural Engineering and public Safety 2006: 1-11.





ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรม CONTBEAM และโปรแกรม SAP

ตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรม CONTBEAM

ลักษณะของสะพาน

ความยาวช่วงสะพาน	=	20.00	ม
จำนวนช่องจราจร	=	3	ช่องจราจร
จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน	=	6	คาน
ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน	=	2.00	ม
ความหนาของพื้นสะพาน	=	0.200	ม
ระยะห่างจากตอม่อสะพาน	=	10.00	ม

คุณสมบัติของพื้น

ค่าความกว้างประสิทธิภาพ (b_e)	=	1.30	ม
โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นสะพาน	=	$\frac{1.30 \times 0.200^3}{12}$	
	=	8.667×10^{-4}	ม ⁴
โมดูลัสของพื้นคอนกรีต	=	2.545×10^6	ตัน/ม ²

คุณสมบัติของคาน

คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ AASHTO-PCI Beam Type III

โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน	=	5.22×10^{-2}	ม ⁴
-------------------------	---	-----------------------	----------------

ค่าการโก่งตัวที่ตำแหน่งห่างจากตอม่อสะพาน 10 เมตร (d)

$$d = 4.286 \times 10^{-4} \text{ ม}$$

ค่าคงที่ยืดหยุ่นของสปริง (elastic spring constant, K)

$$K = \frac{1}{d} = 2333.18 \text{ ตัน/ม}$$

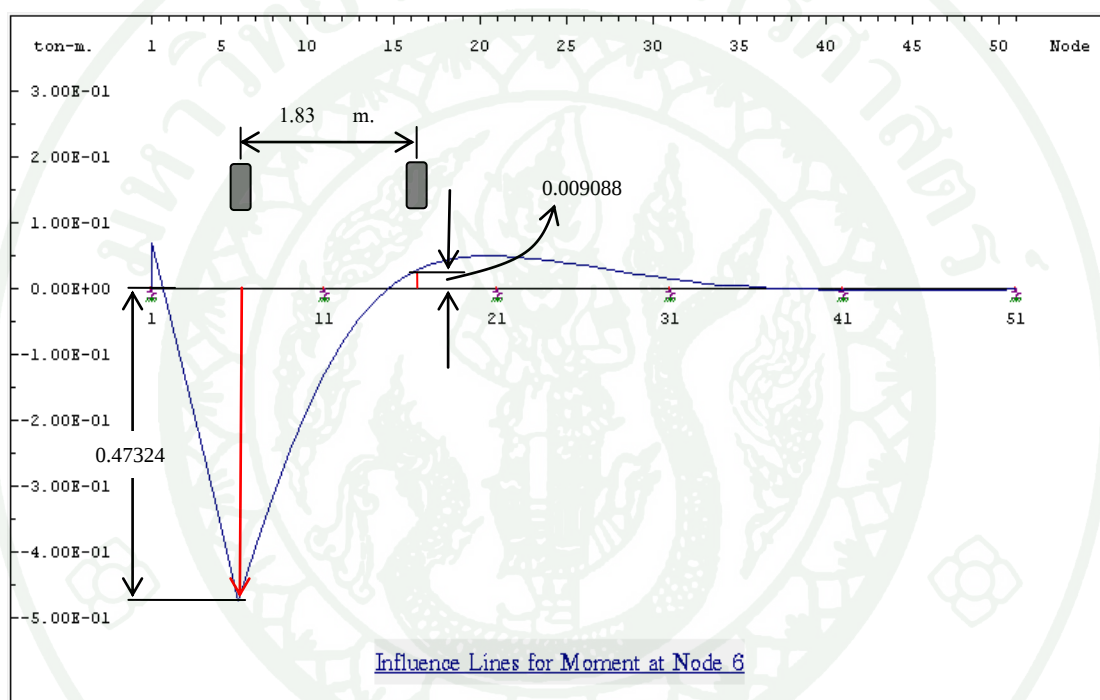
ค่าการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานต่อเนื่องโดยมีแรงหนึ่งหน่วยกระทำที่กึ่งกลาง

$$\delta = 2.7024 \times 10^{-4} \text{ ม}$$

ค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริง (effective spring constants, K_{eff})

$$K_{\text{eff}} = 3.7004 \times 10^3 \text{ ตัน/ม}$$

นำค่าคงที่ประสิทธิภาพของสปริงที่ได้ไปใช้เป็นค่าคงที่ค่าสปริงที่จุดรองรับในโปรแกรม CONTBEAM เพื่อคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในพื้นที่สะพาน



ภาพผนวกที่ ก1 แสดงตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน

ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน ตัน-เมตร/เมตร

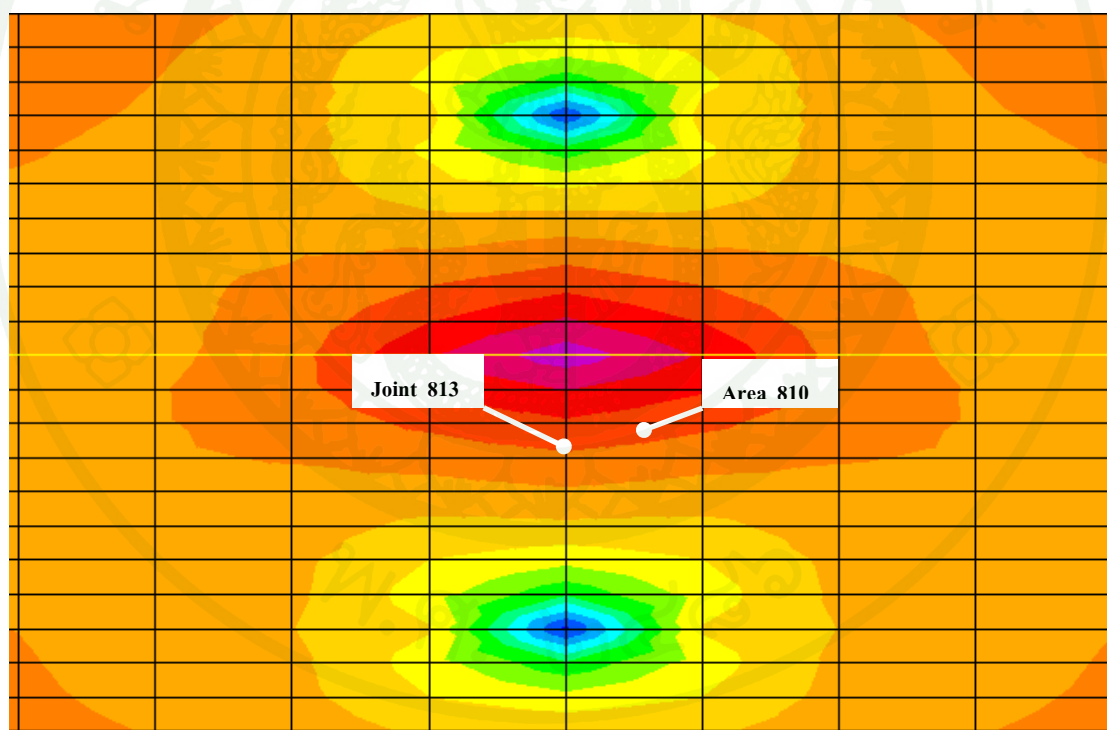
$$\begin{aligned}
 M_{\max}^+ &= \frac{(0.47324 - 0.009088)}{b_e} P \\
 &= \frac{0.464152}{1.30} (7.270) \quad , (P = 7.270 \text{ ตัน}) \\
 &= 2.5957 \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร}
 \end{aligned}$$



ตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรม SAP

ลักษณะของสะพาน

ความยาวช่วงสะพาน	=	20.00	ม
จำนวนช่องจราจร	=	3	ช่องจราจร
จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน	=	6	คาน
ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน	=	2.00	ม
ความหนาของพื้นสะพาน	=	0.200	ม
ระยะห่างจากตอม่อสะพาน	=	10.00	ม



ภาพผนวกที่ ก2 ตำแหน่งเกิด โมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน (แสดงด้วยสีน้ำเงิน)ที่ joint 813
แผ่นพื้นที่ 810

Element Forces - Area Shells

File View Options Format

Units: As Noted Element Forces - Area Shells

	Area Text	Shell Type Text	Joint Text	Output Case Text	Case Type Text	M22 Ton-m/m
	809	Shell-Thin	842	m-truck1m	LinStatic	.00345
	809	Shell-Thin	843	m-truck1m	LinStatic	.0038
	809	Shell-Thin	813	m-truck1m	LinStatic	.00415
▶	810	Shell-Thin	813	m+truck10m	LinStatic	.35546
	810	Shell-Thin	843	m+truck10m	LinStatic	.10082
	810	Shell-Thin	844	m+truck10m	LinStatic	.12231
	810	Shell-Thin	814	m+truck10m	LinStatic	.20294
	810	Shell-Thin	813	m+truck9m	LinStatic	.06853
	810	Shell-Thin	843	m+truck9m	LinStatic	.04324
	810	Shell-Thin	844	m+truck9m	LinStatic	.04488
	810	Shell-Thin	814	m+truck9m	LinStatic	.06253
	810	Shell-Thin	813	m+truck8m	LinStatic	.03525
	810	Shell-Thin	843	m+truck8m	LinStatic	.03163
	810	Shell-Thin	844	m+truck8m	LinStatic	.03338
	810	Shell-Thin	814	m+truck8m	LinStatic	.03629
	810	Shell-Thin	813	m+truck7m	LinStatic	.02889
	810	Shell-Thin	843	m+truck7m	LinStatic	.02684
	810	Shell-Thin	844	m+truck7m	LinStatic	.0288

Record: 61441 of 112000 Done

ภาพผนวกที่ ก3 ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน (M22) จากโปรแกรม SAP

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดในพื้นสะพาน} &= 0.35546 \text{ P} \\
 &= 0.35546 (7.270) , (P = 7.270 \text{ ตัน}) \\
 &= 2.5841 \text{ ตัน-เมตร/เมตร}
 \end{aligned}$$



ตัวอย่างการคำนวณโดยสมการที่เสนอแนะ

ลักษณะของสะพาน

ความยาวช่วงสะพาน	=	20.00	ม
จำนวนช่องจราจร	=	3	ช่องจราจร
จำนวนคานรองรับพื้นสะพาน	=	6	คาน
ระยะห่างระหว่างคานรองรับพื้นสะพาน	=	2.00	ม
ความหนาของพื้นสะพาน	=	0.200	ม
ระยะห่างจากตอม่อสะพาน	=	10.00	ม

$$M_{\max}^+ = y_1 P \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร}$$

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 0.188084 - 0.002037x_1 + 0.000015x_1^2 + 0.000001x_2 - 0.000001x_2^2 \\
 &\quad + 0.092085x_3 - 0.010525x_3^2 + 0.253916x_4 - 0.195217x_4^2 \\
 &\quad + 0.002585x_5 - 0.000093x_5^2 \\
 &= 0.188084 - 0.002037(20) + 0.000015(20)^2 + 0.000001(6) \\
 &\quad - 0.000001(6)^2 + 0.092085(2.00) - 0.010525(2.00)^2 \\
 &\quad + 0.253916(0.200) - 0.195217(0.200)^2 + 0.002585(10) \\
 &\quad - 0.000093(10)^2 \\
 &= 0.35490
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าโมเมนต์คัตบวกสูงสุดคือ

$$\begin{aligned}
 M_{\max}^+ &= 0.35490 P \\
 &= 0.35490(7.270) = 2.5801 \quad \text{ตัน-เมตร/เมตร}
 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่าโมเมนต์คัตในพื้นสะพานจากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนาม

การคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในพื้นสะพานจากค่าความเครียดที่วัดได้จากสะพานในสนาม

คำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใต้พื้นสะพานที่ระยะห่างจากตอม่อสะพาน 12.5 เมตรของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ดังนี้

คุณสมบัติของแก็งวัดความเครียด

แก็งวัดความเครียดของบริษัท Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น PL-90-11 สำหรับพื้นผิวคอนกรีต

ความยาวแก็ง	=	90	มม
ค่าความต้านทานของแก็ง	R	=	120 โอห์ม
ค่าแก็งแฟลคเตอร์	G	=	2.1

คุณสมบัติสายนำสัญญาณ

ยาว,	L	=	3.00	ม
พื้นที่หน้าตัด,	A	=	0.11	
ความต้านทานของสายนำสัญญาณ,	r	=	0.32	โอห์ม/เมตร

สูตรการปรับแก้ค่าแก็งแฟลคเตอร์เนื่องจากความยาวของสายนำสัญญาณ

$$\begin{aligned}
 G_o &= \frac{R}{R+r \cdot \frac{L}{120}} G \\
 &= \frac{120}{120+0.32 \cdot (3)} \cdot (2.1) \\
 &= 2.0833
 \end{aligned}$$

ค่าความเครียด (ϵ)

$$\text{ค่าความเครียดที่วัดได้} = 27.2866 \times 10^{-6} \quad \text{ม / ม}$$

ค่าความเครียดปรับแก้ด้วยแก็งแฟลคเตอร์,

$$\begin{aligned}
 \epsilon &= G_o (27.2866 \times 10^{-6}) \\
 &= 56.847 \times 10^{-6} \quad \text{ม / ม}
 \end{aligned}$$

คุณสมบัติของพื้นสะพาน

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพื้นสะพาน $E = 2.545 \times 10^9$ กก./ม²

ความหนาของพื้นสะพาน $d = 0.18$ ม

พิจารณาความกว้างของสะพาน 1 เมตร

$b = 1.00$ ม

โมดูลัสของหน้าตัด (section modulus) สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\begin{aligned} Z &= \frac{bd^2}{6} \\ &= \frac{(1)(0.18)^2}{6} \\ &= 0.0054 \text{ ม}^3 \end{aligned}$$

ค่าโมเมนต์ดัดบวกได้พื้นสะพาน

$$\begin{aligned} M &= \sigma z \\ &= (E\varepsilon)z \\ &= (2.545 \times 10^9) \cdot (56.847 \times 10^{-6})0.0054 \\ &= 781.248 \text{ กก-ม/ม.} \end{aligned}$$



ภาพแสดงการทดสอบสะพานในภาคสนาม



ภาพผนวกที่ ๔4 แสดงสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ความยาวช่วงสะพาน 30 เมตร



ภาพผนวกที่ ๔5 สภาพภูมิประเทศใต้สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี ที่เป็นแม่น้ำตลอดช่วงสะพาน



ภาพผนวกที่ ๖ การวางไม้พาดทำเป็นทางเดินเพื่อติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gauge)



ภาพผนวกที่ ๗ การติดตั้งทางเดินใต้สะพานจนถึงกึ่งกลางสะพาน สำหรับการติดตั้งเกจวัดความเครียด



ภาพผนวกที่ ๘ การติดตั้งเกจวัดความเครียดใต้สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี



ภาพผนวกที่ ๙ สะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด ความยาวช่วงสะพาน 20 เมตร



ภาพผนวกที่ ๑10 สภาพภูมิประเทศบริเวณใต้สะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัดตราด สามารถตั้ง
นั่งร้านได้ในช่วงสะพานที่ทำการทดสอบ



ภาพผนวกที่ ๑11 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งเกจวัดความเครียดใต้สะพานข้ามแม่น้ำแคว จังหวัด
ตราด



ภาพผนวกที่ 12 การติดตั้งเกจวัดความเครียดใต้สะพานข้ามแม่น้ำแควฯ จังหวัดตราด



ภาพผนวกที่ 13 เกจวัดความเครียดใต้พื้นสะพานที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ในทิศทางขนานกับการจราจร และในทิศขวางกับการจราจร



ภาพผนวกที่ 14 การกำหนดตำแหน่งล้อรถ และตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเร็วที่
ด้านบนพื้นสะพานข้ามแม่น้ำเวฬุ จังหวัดตราด



ภาพผนวกที่ 15 การเจียรพื้นผิวคอนกรีตบนพื้นสะพานบริเวณที่จะทำการติดตั้งเกจวัด
ความเร็วให้เรียบ



ภาพผนวกที่ 16 การติดตั้งเกจวัดความเครียดบนพื้นสะพานในทิศทางขนานกับการจราจร
และในทิศทางขวางกับการจราจร



ภาพผนวกที่ 17 รถบรรทุกสิบล้อสองคัน บรรทุกน้ำหนักคันละ 25 ตัน ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพผนวกที่ 18 การปิดการจราจร นำรถเข้าตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดใน
พื้นสะพาน และดับเครื่องยนต์เพื่อให้นิ่งสนิท



ภาพผนวกที่ 19 การปล่อยให้รถวิ่งเมื่อวัดได้แต่ละจุด เพื่อไม่เป็นการกีดขวางการจราจรนาน
เกินไป



ภาพผนวกที่ ๒๐ ตำรวจทางหลวงจังหวัดตราด ช่วยอำนวยความสะดวกในการปิดการจราจรเพื่อ
ทำการทดสอบสะพาน

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายชนากร จงวิลาสลักษณ์
เกิดวันที่	13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2514
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2536 วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา สาขาโครงสร้าง) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2541
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ดำเนินธุรกิจส่วนตัว
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	26/699 ม. วรางกูร ถ.รังสิต-นครนายก จ.ปทุมธานี