



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินกำลังของสะพานคอนกรีตเสริมกำลังภายนอกด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

Performance Evaluation of Concrete Bridges Strengthened with CFRP Composites

นามผู้วิจัย นายนริศ ไกรสร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ โชติกร, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจานิชย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสถิตี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินกำลังของสะพานคอนกรีตเสริมกำลังภายนอกด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

Performance Evaluation of Concrete Bridges Strengthened with CFRP Composites

โดย

นายนิศ ไกรสร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. ๒๕๕๖

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นริศ ไกรสร 2556: การประเมินกำลังของสะพานคอนกรีตเสริมกำลังภายนอกด้วย
พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยะ โชติกไกร, Ph.D. 304 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง
สะพานคอนกรีตด้วยค่า Rating Factor (RF) ซึ่งเป็นวิธีการประเมินตามข้อกำหนดมาตรฐาน
AASHTO โดยวิเคราะห์โครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 10 สะพานและสะพาน
คอนกรีตอัดแรงจำนวน 2 สะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบขนาด 1.3HS20-44 ผลการ
ประเมินสะพานทั้ง 12 สะพานพบว่าค่า RF มีค่าระหว่าง 0.57 ถึง 1.02 ซึ่งจากมาตรฐาน AASHTO
ได้มีข้อเสนอแนะว่าสะพานที่มีผลการประเมินค่า RF ที่มีค่าต่ำกว่า 1 ต้องพิจารณาให้มีการซ่อมแซม
และเสริมกำลังโครงสร้างส่วนพื้นสะพาน สำหรับงานวิจัยนี้มีการพิจารณาการเสริมกำลังภายนอก
ด้วยวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานหลังจากที่เสริม
กำลังด้วยวัสดุ CFRP ประเมินจากการทดสอบ Diagnostic Load Tests โดยใช้รถบรรทุกไทยที่มี
น้ำหนักประมาณ 25 ตัน และใช้การจำลองโครงสร้างสะพานด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มี
คุณสมบัติวัสดุและขนาดหน้าตัดที่ได้จากข้อมูลการทดสอบวัสดุ การวัดขนาดโครงสร้างสะพาน
ในภาคสนาม และข้อมูลจากแบบก่อสร้างเพื่อตรวจสอบการกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกที่
ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นสะพานและนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ตามสมการของ AASHTO
ผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนามและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็น
ว่าวัสดุเสริมกำลัง CFRP ส่งผลต่อการกระจายน้ำหนักบรรทุกภายในโครงสร้างเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม
ตามสมรรถนะการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานสามารถมีค่ากำลังที่สูงขึ้น โดยระบบการเสริม
กำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน และผลการประเมินค่า RF ของสะพานโดยส่วนมากมีค่า
มากกว่า 1 ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างสะพานที่นำมาศึกษามีความปลอดภัยสำหรับน้ำหนักบรรทุก
ขนาด 1.3HS20-44

Naris Graisor 2013: Performance Evaluation of Concrete Bridges Strengthened with CFRP Composites. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Piya Chotickai, Ph.D. 304 pages.

The main objective of the study was to evaluate the behavior and performance of concrete bridges by using a rating factor (RF) method as specified in the AASHTO specifications. The load carrying capacities of 10 reinforced concrete bridges and 2 prestressed concrete bridges were determined and compared with the maximum bending moment and shear forces required by the 1.3HS20-44 standard design vehicle. The rating factors of the structures were found to be in a range of 0.57 to 1.02. The structures with rating factor less than 1.0 were strengthened with CFRP composite. The overall performances of the all structures were then evaluated using a diagnostic load test with 25-ton Thai trucks. The finite element models were developed to investigate the distribution of wheel loads for various positions on the bridge spans and compared with the values provided by the AASHTO specifications. The results obtained from the field testing and FEM models revealed that the wheel load distribution was slightly altered due to the CFRP strengthening system. In addition, the performance of the bridge structures could considerably be enhanced by the strengthening system. The rating factors of all strengthened structures were found to increase and had a value greater than 1.0.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คงจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ถ้าขาดบุคคลอันเป็นที่เคารพรัก
เหล่านี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ โชติกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้คำปรึกษาแนะนำ
เรื่องของการเรียน การค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัย ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการมอบ
ความรู้ที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังได้ปลูกฝังแนวความคิดทางด้านวิศวกรรม และจริยธรรมที่มีส่วน
ช่วยส่งเสริมต่อการพัฒนาศักยภาพของข้าพเจ้า และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่ประโยชน์งานวิจัย
ตลอดจนการให้ความกรุณาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ขอขอบคุณบริษัทไอ
เอ็มเอ็มเอส จำกัด ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานประกอบการจัดทำ
วิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณช่วงเวลาที่ดี กำลังใจจากเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
นอกจากบุคคลผู้มีพระคุณดังที่กล่าวมาข้างต้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง
ทุกๆ ท่าน ที่ได้มอบกำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้านจนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้า
ขอมอบความดีทั้งปวงแด่ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาท
วิชาความรู้

นริศ ไกรสร

ธันวาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(25)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	89
สรุปและข้อเสนอแนะ	190
สรุป	190
ข้อเสนอแนะ	192
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	193
ภาคผนวก	196
ภาคผนวก ก ภาพแสดงความเสียหายของโครงสร้างสะพาน	197
ภาคผนวก ข รายการคำนวณ Rating Factor	200
ภาคผนวก ค การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	218
ภาคผนวก ง วิธีการออกแบบเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุ CFRP	229
ภาคผนวก จ การออกแบบเสริมกำลังด้านทานโมเมนต์ดัดของโครงสร้างสะพาน	
ส่วนพื้นด้วยวัสดุ CFRP	234
ภาคผนวก ฉ การติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง CFRP	251
ภาคผนวก ช ภาพเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับ	
ผลตอบสนองจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน	260

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ซ ภาพเปรียบเทียบความเครียดทางขวางการจราจรจากผลการวิเคราะห์ สะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลตอบสนองจากการทดสอบน้ำหนัก บรรทุกสะพาน	282
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	304

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระดับการให้คะแนนโครงสร้างของพื้นสะพานคอนกรีตตามหลักเกณฑ์ของ NBI	6
2	ระดับการให้คะแนนโครงสร้างของพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงตามหลักเกณฑ์ของ NBI	7
3	ความสัมพันธ์ระหว่าง NBI Condition Rating กับตัวคุณลดกำลังตามการเสื่อมสภาพ ϕ_c	11
4	รูปแบบของพื้นสะพานลักษณะต่างๆ	14
5	สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดของคานด้านใน	14
6	สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดของคานด้านริม	16
7	สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาค่าแรงเฉือนของคานด้านใน สำหรับ 1 ช่องจราจร	16
8	สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาค่าแรงเฉือนของคานด้านใน สำหรับ 1 ช่องจราจร	17
9	สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาค่าแรงเฉือนของคานด้านริม	17
10	การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงสูงสุดระหว่างผลการทดสอบสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	20
11	การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงสูงสุดระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับ AASHTO LRFD	20
12	รายละเอียดหน้าตัดของตัวอย่างคานทดสอบ	23
13	คุณสมบัติของวัสดุเสริมเส้นใยและโลหะบางชนิด	25
14	รายละเอียดและมิติของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งฝั่งซ้ายและฝั่งขวา	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	รายละเอียดและมีติของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง	54
16	ตัวประกอบค่าลดกำลังของระบบ FRP ที่มีผลจากสภาพแวดล้อม	57
17	คุณสมบัติ CFRP ชนิดแผ่นบาง	63
18	ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุของสะพานข้ามคลองสะพานยาว	65
19	รายละเอียดของตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับสะพานแบบ Slab Type ที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาดของสะพานสำหรับสะพานที่เสริมกำลังด้วย CFRP	72
20	ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	74
21	รายละเอียดของตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับสะพานแบบพื้นสำเร็จรูป มาวางเรียงกันที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาดของสะพาน	78
22	กำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบกำลังอัดในห้องปฏิบัติการ	91
23	กำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบด้วยวิธีวัดค่าการสะท้อนด้วยคลื่นกระแทก	95
24	กำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบด้วยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุด้วย เครื่องมือ Windsor Probe	98
25	สรุปผลการทดสอบหาลำกำลังอัดของคอนกรีต	100
26	กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม	102
27	ข้อมูลสรุปความเสียหายของโครงสร้างสะพาน	104
28	คะแนนระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน (Condition Rating)	105
29	ค่า RF ที่ระดับ Inventory (IN) และ Operating (OP) ของโครงสร้างสะพานส่วน พื้นก่อนการเสริมกำลัง	106
30	ปริมาณและรายละเอียดของการเสริมกำลังพื้นสะพานด้วย CFRP	108
31	ความถี่ธรรมชาติของสะพาน	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
32	ความเครียดสูงสุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิต สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	117
33	ความเครียดสูงสุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิต สำหรับสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง	117
34	อัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต (Dynamic Amplification Factor, DAF)	120
35	คุณสมบัติของคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element	123
36	การเปรียบเทียบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปโดย Shell Element กับหน้า ตัดจากแบบมาตรฐาน	127
37	คุณสมบัติของคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element	128
38	การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแบบพื้นฝังซ้าย	134
39	การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแบบพื้นฝังขวา	135
40	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝังซ้าย กรณี วางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบทางเท้า	142
41	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝังซ้าย กรณี วางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน	143
42	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝังซ้าย กรณี วางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก	144
43	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝังขวา กรณี วางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบทางเท้า	145
44	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝังขวา กรณี วางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน	146

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
45	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา กรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตึก	147
46	ลักษณะทางกายภาพของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง	148
47	การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง	150
48	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	157
49	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน	158
50	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตึก	159
51	การเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ฝั่งซ้าย	170
52	การเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ฝั่งขวา	171
53	การเปรียบเทียบค่าความเครียดของของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP	172
54	การพิจารณาค่า K_b	175
55	ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสบนน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน	178

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
56	ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน	179
57	ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน	180
58	ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน	181
59	ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน	182
60	ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน	182
ตารางผนวกที่		
ค1	ระยะทางเหล็กเสริมโดยประมาณ	228
ง1	ตัวประกอบค่าลดกำลังของระบบ FRP ที่มีผลจากวิธีติดตั้งเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน	230

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกทกจร HS20-44 (Design load)	9
2	แผนภูมิการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐาน LRFR	12
3	แปลนและหน้าตัดสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบ Box Girder	19
4	การเกิดปฏิกิริยาการบอเนชัน	21
5	รูปตัดตามยาวของตัวอย่างทดสอบ	23
6	การวิเคราะห์กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย	26
7	การเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยวัสดุเสริมกำลัง FRP	27
8	รูปแบบการติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง FRP สำหรับเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน	27
9	การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด	28
10	การเสริมกำลังพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย CFRP	29
11	การเปรียบเทียบระหว่างโมเมนต์กับค่าการโก่งตัวของพื้นสะพาน	30
12	รูปแบบการติดตั้งวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP)	31
13	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการโก่งตัว (Load-Deflection Curves)	31
14	การเปรียบเทียบค่าความเครียดของโครงสร้างพื้นสะพานก่อนและหลังจากการเสริมกำลัง	32
15	การเปรียบเทียบกำลังต้านทานของโครงสร้างที่รับได้	33
16	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าโก่งตัวของพื้นสะพาน	34
17	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าโก่งตัวของพื้นสะพาน	35
18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Tensile Strain) กับระยะยึดเหนี่ยว (Bonded Length)	36
19	รูปการแบ่งเอลิเมนต์ของวัตถุในรูปแบบ 3 มิติและ 2 มิติ	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	รูปแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างสะพานโดยโปรแกรม SAP2000	41
21	แบบจำลอง 3 มิติของแผ่นพื้นสะพานโดยโปรแกรม SAP2000	42
22	ปารับแรงเฉือน (Shear Key) ของพื้นสะพานสำเร็จรูปวางเรียงกัน	42
23	การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตตำแหน่งพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	46
24	การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตตำแหน่งคานขวาง	47
25	การทดสอบหาค่ากำลังอัดในห้องปฏิบัติการ	47
26	การวัดขนาดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเก็บ (Core Drilling) ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัด	48
27	การทดสอบโดยวิธีการวัดค่าการสะท้อนด้วยคลื่นกระแทก	49
28	อุปกรณ์ทดสอบการวัดกำลังต้านทานการทะลุวง	49
29	การทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตในสนามด้วยการวัดกำลังต้านทานการทะลุวง ณ ตำแหน่งพื้นสะพาน	50
30	การทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตในสนามด้วยการวัดกำลังต้านทานการทะลุวง ณ ตำแหน่งคานขวาง	50
31	การวัดความยาวของเข็ม (Probe) ที่พ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต	51
32	เหล็กเสริมที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโครงสร้างสะพาน	52
33	การกระจายหน่วยแรงของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังภายนอกโดยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย	60
34	โครงสร้างส่วนบนของสะพานข้ามคลองสะพานยาว	64
35	โครงสร้างส่วนล่างของสะพานข้ามคลองสะพานยาว	64
36	อุปกรณ์ Data Logger	66
37	รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชนิดทางเดิน	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกทุกกลางสะพาน	67
39	รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดขอบกันดก	67
40	การวางตำแหน่งรถบรรทุกไทยน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 2 คัน ที่ตำแหน่งกลางสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	68
41	ความเครียดตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว $L/2$ ของความยาวช่วงพาดสะพาน	68
42	การโค้งตัวตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว $L/2$ ของความยาวช่วงพาดสะพาน	69
43	ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดได้พื้นโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP	70
44	ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดได้พื้นโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการเสริมกำลังด้วย CFRP	71
45	โครงสร้างส่วนบนของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	73
46	โครงสร้างส่วนล่างของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	73
47	รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดทางเท้า 1	74
48	รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกทุกกลางสะพาน	75
49	รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดทางเท้า 2	75
50	การวางตำแหน่งรถบรรทุกไทยน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 2 คัน ที่ตำแหน่งกลางสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน	75
51	ความเครียดตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว $L/2$ ของช่วงพาดสะพาน	76
52	การโค้งตัวตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว $L/2$ ของช่วงพาดสะพาน	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
53 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดได้พื้นโครงสร้างสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน	77
54 การติดตั้ง Strain Gauge ตำแหน่ง CFRP	74
55 การติดตั้ง Displacement Transducer ตำแหน่งใต้พื้นสะพาน	80
56 การติดตั้ง Accelerometer ตำแหน่งใต้พื้นสะพาน	80
57 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตที่ระยะ L/4	81
58 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตที่ระยะ L/2	81
59 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตที่ระยะ 3L/4	82
60 การหยุดรถบรรทุกทดสอบโดยตามตำแหน่งที่กำหนดพื้นสะพาน	82
61 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต	83
62 ตัวอย่างการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต	83
63 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตด้วยความเร็วที่กำหนด	84
64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง (Acceleration, g) กับเวลา (Time, sec)	85
65 ลักษณะของ Solid Element	86
66 ลักษณะของ Shell Element	87
67 แบบจำลองสะพานที่มีการยึดรั้งบริเวณจุดรองรับด้วย Rotational Spring	88
68 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine	90
69 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแบบ Splitting Failure	93
70 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแบบ Shear and Splitting Failure	93
71 ลักษณะของค้อนกระแทก	94
72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับกับค่ากำลังอัดคอนกรีต	94
73 หัวหยั่งทดสอบ (Probe)	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและกำลังอัดของคอนกรีต	97
75	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตโดยวิธีที่แตกต่างกัน	101
76	หน้าตัดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP	107
77	หน้าตัดของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่เสริมกำลังด้วย CFRP	107
78	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา	111
79	การหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยวิธี FFT	111
80	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา	113
81	ความเครียดของพื้นสะพานตามทิศทางขวางการจราจร กรณีน้ำหนักบรรทุกจอด ชิดทางเท้า 1	114
82	ความเครียดของพื้นสะพานตามทิศทางขวางการจราจร กรณีน้ำหนักบรรทุกจอด กลางสะพาน	115
83	ความเครียดของพื้นสะพานตามทิศทางขวางการจราจร กรณีน้ำหนักบรรทุกจอด ชิดทางเท้า 2	116
84	ค่าการโก่งตัวของสะพานจากการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเชิงสถิต	119
85	ค่าการโก่งตัวของสะพานจากการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเชิงพลวัต	119
86	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	122
87	หน้าตัดของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง	123
88	หน้าตัดของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 2 ชั้น	124
89	หน้าตัดของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 3 ชั้น	124
90	หน้าตัดของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 4 ชั้น	124
91	หน้าตัดของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 8 ชั้น	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
92	ความเค้นใต้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Solid Element ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงพาดสะพาน (L/2)	125
93	ค่าโก่งตัวใต้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Solid Element ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงพาดสะพาน (L/2)	126
94	หน้าตัดของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element 1 ชั้น	127
95	หน้าตัดของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element 2 ชั้น	127
96	ความเค้นใต้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางการจราจรจากการขึ้นรูป Shell Element	128
97	ค่าโก่งตัวของพื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางการจราจรจากการขึ้นรูป Shell Element	129
98	การเปรียบเทียบความเค้นใต้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางการจราจรจากการขึ้นรูป Solid Element กับ Shell Element	130
99	การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของพื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางการจราจรจากการขึ้นรูป Solid Element 8 ชั้น กับ Shell Element 2 ชั้น	130
100	ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้นด้านบน	132
101	ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้นด้านล่าง	132
102	การสั่นไหวโหมด 1 จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้น	133
103	การวางตำแหน่งบรรทุกชิดขอบกันตลสำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว	136
104	การวางตำแหน่งบรรทุกกลางสะพานสำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว	137
105	การวางตำแหน่งบรรทุกชิดขอบกันตลสำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว	137
106	ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	138
107	ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน	139

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
108	ผลการเปรียบเทียบค่าการ โกงตัวเนวตั้งจากน้ำนักบรทุกชิดชอบกันตก	140
109	ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง ส่วนบนพื้น	148
110	ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงส่วน ใต้พื้น	149
111	การสั้นไหวโหมด 1 จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบ คอนกรีตอัดแรง	150
112	การวางตำแหน่งน้ำนักบรทุกชิดทางเท้า 1 สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	151
113	การวางตำแหน่งน้ำนักบรทุกกลางสะพานสำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	152
114	การวางตำแหน่งน้ำนักบรทุกชิดทางเท้า 2 สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	152
115	ผลการเปรียบเทียบค่าการ โกงตัวเนวตั้งจากการวางน้ำนักบรทุกชิดทางเท้า 1	153
116	ผลการเปรียบเทียบค่าการ โกงตัวเนวตั้งจากการวางน้ำนักบรทุกกลางสะพาน	154
117	ผลการเปรียบเทียบค่าการ โกงตัวเนวตั้งจากการวางน้ำนักบรทุกชิดทางเท้า 2	155
118	การเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำนักบรทุกสะพานกับการ วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายที่วาง น้ำนักบรทุกชิดทางเท้า	161
119	การเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำนักบรทุกสะพานกับการ วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายที่วาง น้ำนักบรทุกกลางสะพาน	161
120	การเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำนักบรทุกสะพานกับการ วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายที่วาง น้ำนักบรทุกชิดชอบกันตก	162

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
121	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1	163
122	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน	163
123	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2	164
124	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างโครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	165
125	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างโครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่วางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน	166
126	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างโครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก	166
127	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างโครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1	167

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
128	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่าง โครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ของสะพานข้ามคลองวัด เจ้าอามที่วางน้ำหนักรรทุกกลางสะพาน	168
129	ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่าง โครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ของสะพานข้ามคลองวัด เจ้าอามที่วางน้ำหนักรรทุกชิดทางเท้า 2	168
130	ค่าโมเมนต์สูงสุดจาก 1.33 เท่าของน้ำหนักรรทุก 1.3HS20-44 จำนวน 3 คัน สำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว	176
131	ค่าโมเมนต์สูงสุดจาก 1.33 เท่าของน้ำหนักรรทุก 1.3HS20-44 จำนวน 4 คัน สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	176
132	การวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์เอนเวลลอป	184
133	การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถรรทุกของสะพาน แบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร	184
134	การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถรรทุกของสะพาน แบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 8 เมตร	185
135	การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถรรทุกของสะพาน แบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 6 เมตร	185
136	การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถรรทุกของสะพาน แบบคอนกรีตอัดแรงที่มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 16 แผ่น	187
137	การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถรรทุกของสะพาน แบบคอนกรีตอัดแรงที่มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 19 แผ่น	188

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ผิวคอนกรีตหลุดล่อนใต้พื้นสะพาน บริเวณช่องระบายน้ำ	198
ก2 ผิวคอนกรีตหลุดล่อนใต้พื้นสะพานจนเห็นเหล็กเสริม บริเวณจุดรองรับพื้นสะพาน	198
ก3 รอยร้าวตามยาวบนผิวจราจร	198
ก4 คอนกรีตหลุดล่อนบนผิวจราจร	199
ก5 คอนกรีตหลุดล่อนบนผิวจราจรจนเห็นเหล็กเสริม	199
ก6 ผิวจราจรมีรอยแตกหลายงาและวัสดุผิวทางเสื่อมสภาพ	199
ค1 การตัดคอนกรีตโดยเลื่อยตัดทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง	219
ค2 การสกัดพื้นผิวคอนกรีตโดยใช้ค้อนกระแทกทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง	220
ค3 การสกัดพื้นผิวคอนกรีตโดยใช้ค้อนกระแทกทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง	220
ค4 การทำความสะอาดคอนกรีตและเหล็กเสริมทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง	221
ค5 ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	222
ค6 การสกัดคอนกรีตด้วยเครื่องสกัดคอนกรีตแบบกระแทก	223
ค7 การตัดคอนกรีตด้วยเลื่อยบริเวณที่มีความเสียหายเพื่อทำการซ่อมแซม	223
ค8 วิธีการซ่อมแซมโครงสร้างบริเวณเหนือหัวโดยการฉาบ	224
ค9 การบ่มวัสดุซ่อมแซมคอนกรีตด้วยวิธีใช้แผ่นพลาสติกคลุม	224
ค10 ลักษณะเหล็กเสริมที่ถูกการกัดกร่อนจากสนิม	225
ค11 ลักษณะโครงสร้างสะพานส่วนพื้นถูกการกัดกร่อนจากสนิมเหล็ก	226
ค12 การสกัดเปิดผิวคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมที่เกิดสนิม	227
ค13 การซ่อมแซมเหล็กเสริมคอนกรีตโดยการต่อทาบเหล็กเสริมใหม่	227
ง1 รูปแบบการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนคาน	230
ง2 ระยะและขนาดของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนหน้าตัดคานรูปตัวที	231

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ฉ1 การขัดคอนกรีตโดยใช้เครื่องขัดแบบจานหมุน	252
ฉ2 การฉาบ (Putty) ปิดผิวคอนกรีตที่มีรูขนาดเล็ก	253
ฉ3 การเตรียมปริมาณ CFRP ที่จะนำไปติดตั้ง	253
ฉ4 การกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้ง CFRP	254
ฉ5 ตัวอย่างของส่วนผสมเรซิน	254
ฉ6 ตัวอย่างเรซินที่ผสมเสร็จแล้ว	255
ฉ7 การผสมเรซินด้วยเครื่องกวนไฟฟ้า	255
ฉ8 การวัดความชื้นที่ผิวคอนกรีตก่อนการติดตั้ง CFRP ด้วยเครื่อง Moisture Meter	256
ฉ9 การลงเรซินนำก่อนการติด CFRP	256
ฉ10 การติดตั้ง CFRP ตามแนวยาวใต้โครงสร้างพื้นสะพาน	257
ฉ11 การรีดแผ่น CFRP เพื่อไล่ฟองอากาศ	257
ฉ12 การติดตั้ง CFRP ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ชั้น	258
ฉ13 ระยะเหลือมของการติดตั้ง FRP ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ชั้น	259
ช1 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทุกทิศทางเท้า	261
ช2 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน	261
ช3 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกันตก	261
ช4 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกทุกทิศทางเท้า	262
ช5 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน	262
ช6 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกันตก	262
ช7 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกทุกทิศทางเท้า	263
ช8 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	263
ช9 ปรับเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	263

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข10 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า	264
ข11 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	264
ข12 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	264
ข13 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	265
ข14 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้าย น้ำหนักกลางสะพาน	265
ข15 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้าย น้ำหนักชิดขอบกันตก	265
ข16 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	266
ข17 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	266
ข18 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	266
ข19 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า	267
ข20 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	267
ข21 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	267
ข22 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า	268
ข23 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	268
ข24 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	268
ข25 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า	269
ข26 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน	269
ข27 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	269
ข28 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า	270
ข29 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน	270
ข30 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	270
ข31 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า	271

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ช32 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	271
ช33 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	271
ช34 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	272
ช35 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	272
ช36 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	272
ช37 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	273
ช38 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	273
ช39 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	273
ช40 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	274
ช41 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวา น้ำหนักกลางสะพาน	274
ช42 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	274
ช43 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	275
ช44 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	275
ช45 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	275
ช46 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	276
ช47 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	276
ช48 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	276
ช49 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	277
ช50 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	277
ช51 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	277
ช52 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า	278
ช53 เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	278

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข54	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก 278
ข55	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 279
ข56	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 279
ข57	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2 279
ข58	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 280
ข59	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 280
ข60	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2 280
ข61	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 281
ข62	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 281
ข63	เปรียบเทียบการ โกงตัวสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2 281
ข1	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 283
ข2	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 283
ข3	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก 283
ข4	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 284
ข5	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 284
ข6	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก 284
ข7	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 285
ข8	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 285
ข9	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก 285
ข10	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 286
ข11	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกกลางสะพาน 286
ข12	เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก 286

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ช13 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	287
ช14 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักกลางสะพาน	287
ช15 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักชิดขอบกันตก	287
ช16 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	288
ช17 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักกลางสะพาน	288
ช18 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักชิดขอบกันตก	288
ช19 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	289
ช20 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	289
ช21 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	289
ช22 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	290
ช23 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	290
ช24 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก	290
ช25 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	291
ช26 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	291
ช27 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก	291
ช28 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	292
ช29 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	292
ช30 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก	292
ช31 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	293
ช32 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	293
ช33 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางรักฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก	293
ช34 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	294

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ช35 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	294
ช36 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตล	294
ช37 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	295
ช38 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูน้ำหนักกลางสะพาน	295
ช39 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตล	295
ช40 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	296
ช41 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูน้ำหนักกลางสะพาน	296
ช42 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตล	296
ช43 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	297
ช44 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	297
ช45 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลัดฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตล	297
ช46 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	298
ช47 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	298
ช48 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตล	298
ช49 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า	299
ช50 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน	299
ช51 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตล	299
ช52 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า	300
ช53 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน	300
ช54 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตล	300
ช55 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักชิดทางเท้า 1	301
ช56 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักกลางสะพาน	301

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ช57 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำนักชิดทางเท้า 2	301
ช58 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำนักบรรทุกชิดทางเท้า 1	302
ช59 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำนักบรรทุกกลางสะพาน	302
ช60 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำนักบรรทุกชิดทางเท้า 2	302
ช61 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำนักบรรทุกชิดทางเท้า 1	303
ช62 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำนักบรรทุกกลางสะพาน	303
ช63 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำนักบรรทุกชิดทางเท้า 2	303

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มม.	=	มิลลิเมตร
ซม.	=	เซนติเมตร
ม.	=	เมตร
กก.-ซม.	=	กิโลกรัม-เซนติเมตร
กก./ซม. ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
กก.-ม.	=	กิโลกรัม-เมตร
กก./ม. ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
kN	=	กิโลนิวตัน
kN-m	=	กิโลนิวตันเมตร
ksc	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
s	=	วินาที
CFRP	=	พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
FEM	=	Finite Element Method

การประเมินกำลังของสะพานคอนกรีตเสริมกำลังภายนอกด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย คาร์บอน

Performance Evaluation of Concrete Bridges Strengthened with CFRP Composites

คำนำ

สะพานคอนกรีตเป็นโครงสร้างที่สำคัญต่อการคมนาคมขนส่งทางบก ซึ่งจะต้องรองรับน้ำหนักการจราจรจากการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกฎหมายฉบับเดิมในปี พ.ศ. 2518 ได้กำหนดให้รถสิบล้อมีน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 21 ตัน ทั้งนี้ ปัจจุบันกฎหมายฉบับดังกล่าวได้รับการแก้ไขเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2548 โดยการเพิ่มน้ำหนักของรถบรรทุกจาก 21 ตัน เป็น 25 ตัน จากเหตุผลข้างต้นจึงต้องมีการเสริมกำลังด้านทานโครงสร้างสะพานเพื่อที่จะได้สามารถรองรับน้ำหนักการจราจรและน้ำหนักของรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้น

สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานครมีมากกว่า 1,000 สะพานและมีสะพานจำนวนมากที่อยู่ในสภาพเสื่อมโทรมเนื่องจากสภาพแวดล้อมและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ส่วนมากเป็นสะพานที่ได้ใช้งานมาแล้วประมาณ 20 ถึง 40 ปี เพื่อให้ทราบถึงสภาวะของโครงสร้างปัจจุบันจึงต้องมีการประเมินกำลังของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเป็นแนวทางในการซ่อมแซม (Repair) และการเสริมกำลัง (Strengthening) การประเมินกำลังของโครงสร้างสะพานทำได้โดยการวิเคราะห์โครงสร้างตามหลักวิศวกรรมโดยวิธีการหาค่า Rating Factor (RF) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR (2008) หากค่า RF มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 สะพานนั้นไม่ต้องการเสริมกำลัง แต่หากว่าสะพานนั้นมีค่า RF น้อยกว่า 1 สะพานนั้นต้องการจำกัดน้ำหนักบรรทุก (Load Posting) หรือเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน โดยในการออกแบบเสริมกำลังจะต้องให้ค่า RF มีค่ามากกว่า 1 และหลังจากการเสริมกำลังเป็นที่เรียบร้อยแล้วโครงสร้างจะต้องมีความสามารถในการรองรับน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้นตามที่ต้องการ

การเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ได้นำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาในหลายๆด้าน ได้แก่ งานเสริมกำลังของโครงสร้างทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานที่ต้องการวัสดุที่นำมาเสริมกำลังที่มีอัตราส่วนระหว่างกำลังต่อ

น้ำหนักที่สูง กล่าวคือสามารถรับแรงได้สูงและมีน้ำหนักเบา การเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP สำหรับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กได้นำมาใช้ในการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และกำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear Force) ของทั้งโครงสร้างหลัก (Superstructure) และโครงสร้างรอง (Substructure)

การศึกษาสมรรถนะ (Performance) ของ CFRP ในการเสริมกำลังโดยเปรียบเทียบการกระจายน้ำหนักบรรทุกจรรยาวิชาชีพทางวิชาการที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้าง (Bridge Load Test) ระหว่างสะพานที่มีการเสริมกำลังและไม่มีการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ซึ่งเป็นสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างที่เหมือนกัน อายุการใช้งานเท่ากัน เพียงแต่การให้คะแนนสภาพของโครงสร้าง (Condition Rating, CR) มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้เกิดความแตกต่างกันสำหรับค่า Rating Factor ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างในการรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบที่กำหนดซึ่งเป็นที่มาของการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ CFRP สำหรับการศึกษาพฤติกรรมทางด้านโครงสร้างของสะพานก่อนเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP งานวิจัยนี้ก็ได้วิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสามมิติ ทำการเปรียบเทียบให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ให้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพและพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการวิเคราะห์หาค่า Rating Factor เพื่อประเมินกำลังของสะพานคอนกรีตแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Slab Bridge) และสะพานคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Plank Girder Bridge) ทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ CFRP
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP หลังจากการติดตั้งเสริมกำลังด้านทานโมเมนต์ดัดของพื้นสะพาน
3. นำเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานสามมิติโดยใช้การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพาน
4. เพื่อศึกษาถึงการผลการวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักตามแนวขวางการจราจรโดยสมการตามมาตรฐานของ AASHTO และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรง

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการเสริมกำลังสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนของโครงสร้างหลัก โดยใช้ค่า RF ตามมาตรฐาน LRFR (Load and Resistance Factor Rating) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของสะพานสภาพปัจจุบันเทียบกับสะพานใหม่ที่ออกแบบตามมาตรฐาน LRFD (Load and Resistance Factor Design) โดยวัสดุที่เสริมกำลังจะใช้ CFRP เป็นหลัก ทั้งนี้การหาค่าความต้านทานของโครงสร้างสะพานหลังเสริมกำลังจะใช้วิธีการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานแบบ Diagnostic Load Test โดยรถบรรทุกไทยที่มีน้ำหนักยานพาหนะรวม น้ำหนักบรรทุก 25 ตันซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่ากับ 1.3HS20-44 เมื่อได้ผลการวิเคราะห์จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงแล้วจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามมิติโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า Rating Factor ของสะพานคอนกรีตทั้งแบบพื้นและแบบคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน AASHTO เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการประเมินการรับน้ำหนักทั้งก่อนและหลังการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน
2. ทราบถึงประสิทธิภาพและข้อจำกัดของการเสริมกำลังโครงสร้างที่เกิดการเสื่อมสภาพด้วยวัสดุ CFRP จากการเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพานหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP
3. ทราบถึงวิธีการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับผลจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพานทั้งแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบคอนกรีตอัดแรงเพื่อเป็นเกณฑ์เบื้องต้นในการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานทั้งสองลักษณะ
4. ทราบถึงพฤติกรรมการกระจายน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานที่มีการถ่ายแรงที่มีระบบของโครงสร้างแตกต่างกันคือสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่วางเรียงกัน โดยมีสักรับแรงเฉือนทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงที่วางในแผ่นถัดไป

การตรวจเอกสาร

1. การประเมินระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานด้วยค่าดัชนีชี้วัด (Condition Rating)

การประเมินระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานโดยทั่วไปจะใช้คะแนนค่า Condition Rating อ้างอิงถึงระดับความสมบูรณ์ของโครงสร้างสะพาน โดยพิจารณาจากการบรรยาย ลักษณะสภาพของ โครงสร้างที่มีระดับความเสียหายและการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับสะพานที่ พิจารณามาเทียบกับหลักเกณฑ์การให้คะแนนตามข้อกำหนดของแต่ละระบบมาตรฐานที่มีความ แตกต่างกันไปตามลักษณะสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งานของสะพาน สำหรับเกณฑ์การ ประเมินการเสื่อมสภาพสะพานในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ระดับการให้คะแนนพิจารณาตาม หลักเกณฑ์ของ National Bridge Inventory (NBI) ที่ได้แบ่งระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง ตั้งแต่ระดับ 0 จนถึงระดับ 9 ถ้าระดับของ CR มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าโครงสร้างไม่มีความปลอดภัย ในการใช้งานต้องซ่อมแซมและเสริมกำลังอย่างเร่งด่วน และเมื่อระดับของ CR มีค่าเท่ากับ 9 แสดง ว่าโครงสร้างมีสภาพเหมือนใหม่มีระดับความปลอดภัยในการใช้งานมาก

การประเมินระดับการเสื่อมสภาพของสะพานที่มีลักษณะพื้นสะพานแบบคอนกรีตเสริม เหล็กและพื้นสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงมีเกณฑ์การให้คะแนนดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นเกณฑ์แสดงระดับการเสื่อมสภาพของพื้นสะพานตามลักษณะของความรุนแรง สาเหตุ ตลอดจน จนถึงชนิดของความเสียหาย โดยที่ข้อมูลบางส่วนระบุขนาดและสัดส่วนของการเสื่อมสภาพต่อ พื้นที่ เช่นรอยแตกกว้าง และพื้นที่คอนกรีตที่เกิดการหลุดร่อน เพื่อความสะดวกต่อการแบ่งระดับ ของการเสื่อมสภาพ

ตารางที่ 1 ระดับการให้คะแนนโครงสร้างของพื้นสะพานคอนกรีตตามหลักเกณฑ์ของ NBI

CR	ระดับสภาพ	สภาพโครงสร้าง
9	สภาพดีเยี่ยม	สภาพของโครงสร้างสะพานเหมือนใหม่
8	สภาพดีมาก	เกิดความเสียหายกับโครงสร้างเพียงเล็กน้อย โครงสร้างไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม คอนกรีตไม่เกิดการหลุดร่อนและไม่อึดตัวด้วยน้ำ
7	สภาพดี	มีความเสียหายที่สามารถสังเกตเห็นได้แต่น้อย เช่น รอยแตกขนาดเส้นผม (Hairline Crack) พื้นสะพานไม่เกิดการเสื่อมสภาพและไม่เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีต โครงสร้างรองเกิดการเสื่อมสภาพ เช่น ทางเท้า รวกันตก รวสะพาน เป็นต้น
6	สภาพที่น่าพอใจ	เกิดรอยร้าวบนผิวพื้นสะพานพอสมควร เกิดการเสื่อมสภาพของขอบกันตก ทางเท้า รวสะพาน รอยต่อของพื้นสะพานอย่างกว้างขวาง
5	สภาพปานกลาง	เกิดรอยร้าวบนผิวพื้นสะพานและเกิดการหลุดร่อนประมาณร้อยละ 5 ของพื้นที่พื้นสะพาน คอนกรีตอึดตัวด้วยน้ำ และ/หรือ เกิดการเสื่อมสภาพ ประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 40 ของพื้นที่ ผิวของคอนกรีตบางส่วนเกิดการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม
4	สภาพเสียหาย	คอนกรีตอึดตัวด้วยน้ำ และ/หรือ เกิดการเสื่อมสภาพ มากกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่พื้นสะพาน เกิดความสูญเสียหน้าตัดของพื้นสะพาน คอนกรีตบางส่วน
3	สภาพเสียหายอย่างรุนแรง	คอนกรีตอึดตัวด้วยน้ำ และ/หรือ เกิดการเสื่อมสภาพ มากกว่าร้อยละ 60 ของพื้นที่พื้นสะพาน เกิดความสูญเสียหน้าตัดของพื้นสะพาน คอนกรีตอย่างกว้างขวาง (ต้องทำการซ่อมแซมอย่างเร่งด่วนหรือจำกัดน้ำหนักรบรรทุกสำหรับการใช้งานสะพาน)
2	สภาพวิกฤติ	พื้นสะพานอยู่ในสภาพทรุดโทรมอันเป็นเหตุทำให้เกิดการพังทลายได้ (ปิดการใช้งานของสะพานจนกว่าจะมีการซ่อมแซมพื้นสะพานเสร็จสมบูรณ์)
1	สภาพใกล้จะวิบัติ	สะพานมีความเสียหายและการวิบัติอย่างกว้างขวางไม่สามารถใช้งานสะพานได้ (ปิดการใช้งานของสะพานจนกว่าจะมีการซ่อมแซมหรือก่อสร้างพื้นสะพานเสร็จสมบูรณ์)
0	สภาพวิบัติ	โครงสร้างวิบัติ (ปิดการใช้งานของสะพานจนกว่าจะก่อสร้างสะพานเสร็จสมบูรณ์)

ที่มา : National Bridge Inventory (2001)

ตารางที่ 2 ระดับการให้คะแนนโครงสร้างของพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงตามหลักเกณฑ์ของ NBI

CR	ระดับสภาพ	สภาพโครงสร้าง
9	สภาพดีเยี่ยม	สภาพของโครงสร้างสะพานเหมือนใหม่
8	สภาพดีมาก	เกิดความเสียหายกับโครงสร้างเพียงเล็กน้อย
7	สภาพดี	มีความเสียหายที่สามารถสังเกตได้เล็กน้อย เช่น รอยแตกร้าว ขนาดกว้างไม่เกิน 0.20 มม. ไม่เกิดรอยเปื้อนของคราบสนิม
6	สภาพที่น่าพอใจ	โครงสร้างคอนกรีตรองเกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพ มีรอยแตกร้าวขนาดกว้างไม่เกิน 0.20 มม. ผิวคอนกรีตของโครงสร้างรองรับบางส่วนเกิดการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริมเล็กน้อย
5	สภาพปานกลาง	ผิวคอนกรีตของโครงสร้างบางส่วนเกิดการหลุดร่อนจนเห็นลวดอัดแรงเล็กน้อย โครงสร้างเกิดรอยร้าวซึ่งอาจจะเกิดรอยเปื้อนของคราบสนิมเล็กน้อย คอนกรีตของโครงสร้างหลักอาจเกิดรอยร้าวหรือหลุดร่อน
4	สภาพเสียหาย	โครงสร้างคอนกรีตหลักบางส่วนเกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพ ผิวคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริมหรือลวดอัดแรง
3	สภาพเสียหายอย่างรุนแรง	โครงสร้างของสะพานเกิดความเสียหายโดยคอนกรีตแยกจากเหล็กเสริมหรือลวดอัดแรง เกิดการสูญเสียหน้าตัดพื้นสะพาน
2	สภาพวิกฤติ	คอนกรีตและเหล็กเสริมของโครงสร้างบางส่วนเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง เกิดรอยร้าวบนองค้ออาคารตามแนวขวาง ผิวคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนจนเห็นลวดอัดแรง (มีการบ่งชี้ว่ากำลังของลวดอัดแรงลดลง)
1	สภาพใกล้จะวิบัติ	ชิ้นส่วนโครงสร้างบางส่วนเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต้องเปลี่ยนหรือก่อสร้างโครงสร้างใหม่ (ปิดการใช้งานของสะพานจนกว่าจะมีการเปลี่ยนหรือการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์)
0	สภาพวิบัติ	โครงสร้างวิบัติ (ปิดการใช้งานของสะพานจนกว่าจะก่อสร้างสะพานเสร็จสมบูรณ์)

ที่มา : National Bridge Inventory (2001)

2. การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน (Rating Factor)

มาตรฐาน AASHTO 2007 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008) ให้วิธีการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน โครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง เช่น พื้นสะพาน (Deck), คานขวาง (Cross Beam) และเสาตอม่อ (Pier) ในส่วนการซ่อมแซมและเสริมกำลังสะพานจำเป็นต้องอาศัยวิธีการดังกล่าวเพื่อเป็นค่าบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานในสภาวะปัจจุบันเทียบกับสะพานใหม่ที่ออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Load and Resistance Factor Design (2008)

ในปี ค.ศ.1998 AASHTO ได้มีการออกมาตรฐาน LRFD (Load and Resistance Factor Design) เพื่อใช้สำหรับการออกแบบสะพานและได้นำมาพิจารณาถึงสภาวะขีดจำกัด (Limit State) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การออกแบบสะพานมีระดับความน่าเชื่อถือด้านความปลอดภัยมากขึ้น การตรวจสอบสภาวะขีดจำกัดใช้สมการดังนี้

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (1)$$

เมื่อ η คือ ตัวคูณแก้ไขแรง (Load Modifier)

γ คือ ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Load Factor)

Q คือ ผลของแรงกระทำ (Force Effect)

ϕ คือ ตัวประกอบความต้านทานของโครงสร้าง (Resistance Factor)

R_n คือ ความต้านทานของโครงสร้าง (Nominal Resistance)

ในปี ค.ศ.2003 AASHTO ได้นำหลักการในการออกแบบมาตรฐาน LRFD ที่พิจารณาถึงสภาวะขีดจำกัด (Limit State) มาประยุกต์ใช้กับวิธีการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานคือมาตรฐาน LRFR (Load and Resistance Factor Rating) แม้หลักการออกแบบและการประเมินสภาพสะพานโดยรวมจะมีความคล้ายคลึงกัน แต่ก็มีข้อที่แตกต่างกันคือในการออกแบบ (LRFD) จะมีความไม่แน่นอนในด้านการพิจารณาแรงที่จะมากระทำต่อโครงสร้าง ส่วนการประเมินสภาพ (LRFR) จะมีความไม่แน่นอนในด้านการพิจารณากำลังต้านทานของโครงสร้างสะพานเนื่องจากโครงสร้างของสะพานเกิดการเสื่อมสภาพ

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการประเมินความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานตามมาตรฐาน LRFR มีด้วยกันสามแบบซึ่งพิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ดังนี้

1. น้ำหนักบรรทุกในการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบสะพานซึ่งมาตรฐาน AASHTO LRFD ใช้แบบจำลองน้ำหนักบรรทุก HL-93 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองขนาด 1.30 เท่าของรถบรรทุก HS20-44 ซึ่งมีขนาดน้ำหนักและระยะห่างของเพลาดังภาพที่ 1 มาใช้ในการประเมินความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน

2. น้ำหนักบรรทุกตามกฎหมาย (Legal Load Rating) ใช้แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO และน้ำหนักบรรทุกตามกฎหมายในแต่ละรัฐในอเมริกา

3. น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ (Permit Load Rating) ใช้แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้จากการใช้งานจริง



ภาพที่ 1 แบบจำลองน้ำหนักบรรทุก HS20-44 (Design load)

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

สมการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกเป็นการคำนวณหาความต้านทานของโครงสร้างที่
 คูณด้วยตัวคูณลดกำลังการเสื่อมสภาพโครงสร้าง (Condition Factor, ϕ_c) ตัวคูณลดกำลังของระบบ
 (System Factor, ϕ_s) และตัวคูณลดกำลังความต้านทานตามมาตรฐาน LRFD (Resistance Factor,
 ϕ) หักลบออกด้วยผลจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้าง (Dead Load, DC) แล้วนำมาหารด้วย
 ผลของน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ที่รวมกับน้ำหนักจากแรงกระแทก (Impact Load) สมการนี้
 สามารถประเมินกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดและกำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับการประเมินกำลังรับ
 น้ำหนักออกแบบมีระดับความปลอดภัย 2 ระดับคือ ระดับ Inventory (IN) เป็นการประเมิน
 โครงสร้างด้วยระดับความปลอดภัยเดียวกันกับที่ใช้ออกแบบ และระดับ Operating (OP) เป็นการ
 ประเมินโครงสร้างด้วยขนาดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ยอมให้ได้สำหรับจำนวนครั้งของการผ่าน
 โครงสร้างที่จำกัดซึ่งมีตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรที่มีค่าแตกต่างกันคือ 1.75 และ 1.35 ตามลำดับ
 วิธีประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกแสดงดังสมการที่ 2

$$RF = \frac{C - \gamma_{DC} DC - \gamma_{DW} DW \pm \gamma_P P}{\gamma_L LL (1 + IM)} \quad (2)$$

เมื่อ C คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักทั้งหมด (Capacity) หรือมีค่าเท่ากับ $\phi_c \phi_s \phi R_n$

ϕ_c คือ ตัวคูณลดกำลังตามการเสื่อมสภาพ (Condition Factor) มีค่า 0.85 ถึง 1.00

ϕ_s คือ ตัวคูณลดกำลังของระบบ (System Factor) มีค่า 0.85 ถึง 1.00

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังความต้านทานตามมาตรฐาน LRFD มีค่าเท่ากับ 0.90 เมื่อ
 โครงสร้างที่พิจารณาต้านทานโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และมีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อโครงสร้างที่
 พิจารณาต้านทานแรงเฉือน (Shear Force)

R_n คือ กำลังต้านทานของชิ้นส่วนโครงสร้างที่พิจารณา

γ_{DC} คือ ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้าง มีค่าเท่ากับ 1.25

DC คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้าง

γ_{DW} คือ ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่จากผิวพื้นสะพาน มีค่าเท่ากับ 1.50

DW คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่จากผิวพื้นสะพาน

γ_P คือ ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักสำหรับแรงถาวรนอกเหนือจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของ
 โครงสร้าง

P คือ แรงถาวรนอกเหนือจากบรรทุกคงที่ของโครงสร้าง

γ_L คือ ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร มีค่าเท่ากับ 1.75 สำหรับระดับความปลอดภัยแบบ Inventory (IN) และมีค่าเท่ากับ 1.35 สำหรับระดับความปลอดภัยแบบ Operating (OP)

LL คือ ผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

IM คือ ผลของแรงกระแทกจากน้ำหนักบรรทุกจร มีค่าเท่ากับร้อยละ 33 ของผลจากน้ำหนักบรรทุกจร

L คือ ความยาวช่วงพาดของสะพาน มีหน่วยเป็นฟุต

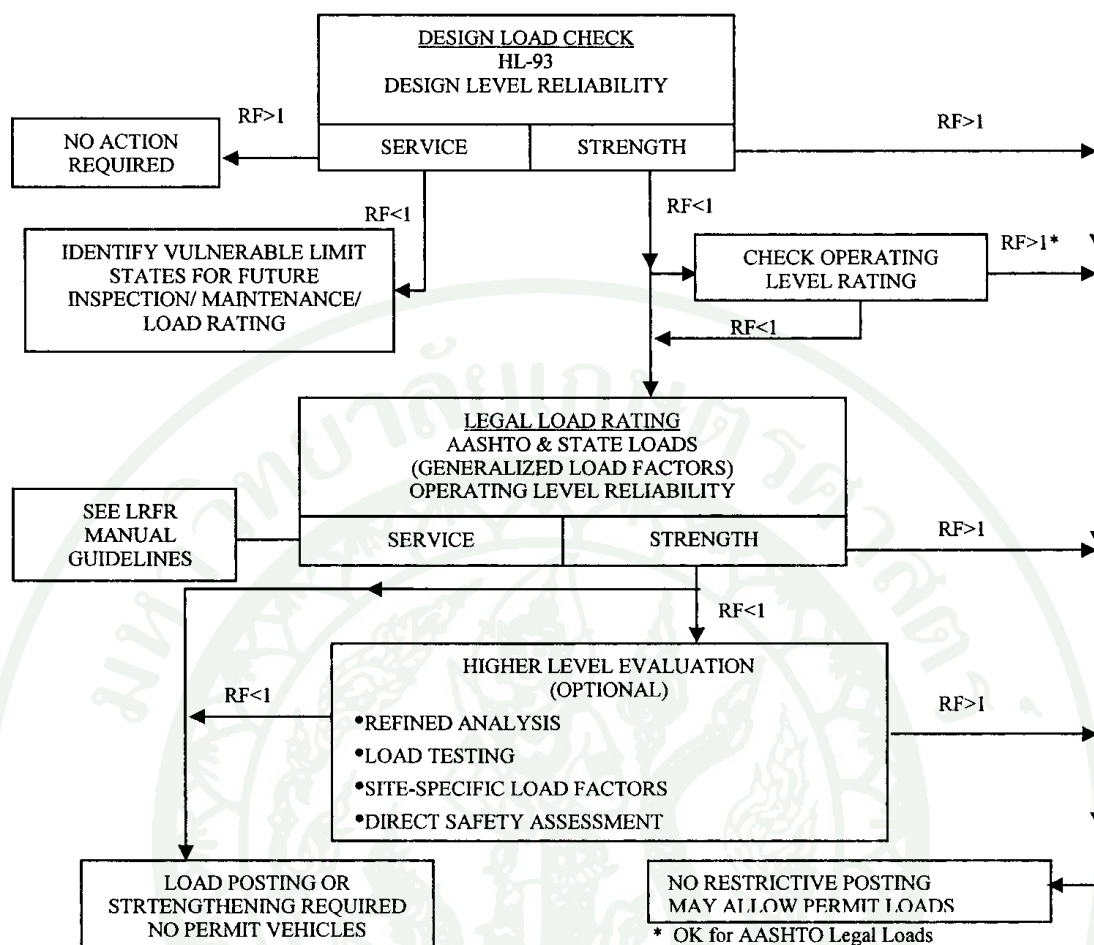
สำหรับตัวคูณลดกำลังโครงสร้างสะพานตามการเสื่อมสภาพ (ϕ_c) มีความสัมพันธ์กับระดับการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานตามมาตรฐาน NBI แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง NBI Condition Rating กับตัวคูณลดกำลังตามการเสื่อมสภาพ ϕ_c

NBI Condition Rating	สภาพโครงสร้าง	ϕ_c
มีค่าตั้งแต่ 6 จนถึง 9	ดี	1.00
5	ดีพอใช้	0.95
มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 4	ไม่ดี	0.85

ที่มา: AASHTO LRFR Manual for Bridge Evaluation (2008)

ขั้นตอนการประเมินแบบจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานตามมาตรฐาน LRFR แสดงดังภาพที่ 2 เมื่อทำการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานที่ระดับ Inventory (IN) แล้วค่า RF มากกว่า 1 แสดงว่าสะพานที่พิจารณามีความปลอดภัยในการใช้งาน ไม่ต้องการเสริมกำลัง หากค่า RF ที่ได้จากการประเมินมีค่าน้อยกว่า 1 ต้องตรวจสอบระดับ Operating (OP) เมื่อ RF มากกว่า 1 ก็ถือว่าโครงสร้างสะพานสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบได้ แต่อาจจะต้องมีการประเมินความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานในระดับน้ำหนักบรรทุกที่ขอมให้ (Permit Load Rating) หากค่า RF ยังน้อยกว่า 1 แสดงว่าโครงสร้างไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานสำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด ต้องมีการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานหรือจำกัดน้ำหนักบรรทุก (Load Posting)



ภาพที่ 2 แผนภูมิการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน LRFR

ที่มา: Minervino et al. (2004)

3.ค่าการกระจายน้ำหนักบรรทุกสำหรับโครงสร้างสะพาน

ค่าการกระจายน้ำหนักของล้อ (Equivalent Width, E) สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Slab Bridge) เป็นค่าที่เกิดจากการกระจายน้ำหนักล้อที่กระทำลงบนพื้นสะพานและส่งถ่ายแรงไปยังโครงสร้างอื่นๆ ทำให้ผลเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกถูกลดลง ทั้งนี้ AASHTO LRFD (2007) ได้กำหนดสมการหาค่าการกระจายน้ำหนักล้อ ตามแผ่นพื้นทางแนวยาวต่อช่องจราจร สำหรับแรงเฉือน และโมเมนต์คัต ดังนี้

สำหรับ 1 ช่องจราจร

$$E = 250 + 0.42(L_1 \times W_1)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

สำหรับ 2 ช่องจราจรขึ้นไป

$$E = 2,100 + 0.12(L_1 \times W_1)^{\frac{1}{2}} \leq \frac{W}{N_L} \quad (4)$$

เมื่อ E คือ ค่าการกระจายน้ำหนักของล้อ (Equivalent Width) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

L_1 คือ ความยาวของช่วงสะพาน (Span Length) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

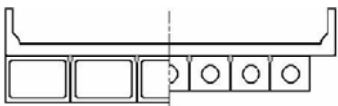
W_1 คือ ความกว้างปรับปรุงของพื้นสะพานจากขอบถึงขอบ (Modified edge-to-edge Width of the Bridge) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

W คือ ความกว้างเชิงกายภาพของพื้นสะพานจากขอบถึงขอบ (Physical edge-to-edge Width of the Bridge) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

N_L คือ จำนวนช่องจราจร

การกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกจร (Distribution Loads) สำหรับโครงสร้างพื้นที่มีลักษณะเป็น แผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน (Multi Beam Box Girder Bridge) ไม่สามารถใช้สมการการกระจายน้ำหนักของล้อ (Equivalent Width) ได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่ต่างกันรวมไปถึงพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงที่ต่างกันด้วย ทั้งนี้ AASHTO LRFD (2007) ได้กำหนดสมการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัวของแรง (Distribution Factors, DF) และได้แบ่งลักษณะของพื้นสะพานรวมไปถึงวิธีการคำนวณในส่วน of โครงสร้างรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนและได้แยกสมการในการหาค่าตัวประกอบการกระจายตัวของแรงตำแหน่งคานด้านริม (Exterior Beams) คานด้านใน (Interior Beams) ซึ่งต่างจากสมการของการคำนวณหาค่าการกระจายน้ำหนักของล้อ ที่สามารถใช้ได้ทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด สมการหาค่าตัวประกอบการกระจายของแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกจร (Distribution Factors, DF) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 9 ดังนี้

ตารางที่ 4 รูปแบบของพื้นสะพานลักษณะต่างๆ

No.	Supporting Components	Type of Deck	Typical Cross-Section
1	Precast Solid, Void or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	Cast-in-place Concrete Overlay	
2	Precast Concrete Channel Section with Shear Keys	Cast-in-place Concrete Overlay	

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

ตารางที่ 5 สมการตัวประกอบกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดของคานด้านใน (Interior Beams)

No.	Supporting Components	Distribution Factors	Range of Applicability
1	Precast Solid, Void or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	One Design Lane Loaded $k \left(\frac{b}{2.8L} \right)^{0.25} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.25}$ Where: $k = 2.5 \left(N_b \right)^{0.2} \geq 1.5$ Two or More Design Lanes Loaded $k \left(\frac{b}{7,600} \right)^{0.6} \left(\frac{b}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.06}$	$900 \leq b \leq 1,500$ $6,000 \leq L \leq 37,000$ $5 \leq N_b \leq 20$

ตารางที่ 5 (ต่อ)

No.	Supporting Components	Distribution Factors	Range of Applicability
2	Precast Concrete Channel Section with Shear Keys	Regardless of Number of Loaded Lanes: S/D Where: $C = K(W / L) \leq K$ $D = 300 \left[11.5 - N_L + 1.4N_L (1 - 0.2C)^2 \right]$ When: $C \leq 5$ $D = 300(11.5 - N_L)$ When $C > 5$ $K = \sqrt{\frac{(1 + \mu)I}{J}}$	Skew $\leq 45^\circ$ $N_L \leq 6$
For preliminary design, The following values of K may be used:			
Beam Type		K	
Nonvoided Rectangular Beams		0.7	
Rectangular Beams with Circular Voids:			
Box section Beams		1.0	
Channel Beams		2.2	
T-Beams		2.0	
Double T-Beams		2.0	

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

ตารางที่ 6 สมการตัวประกอบกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาโมเมนต์ค้ดของคานด้านริม (Exterior Beams)

No.	Supporting Components	One Design Lane Loaded	Two or More Design Lanes Loaded	Range of Applicability
1	Precast Solid, Void or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	$g = eg_{\text{interior}}$ $e = 1.125 + \frac{d}{9,100} \geq 1.0$	$g = eg_{\text{interior}}$ $e = 1.04 + \frac{d}{7,600} \geq 1.0$	$d_e \leq 600$
2	Precast Concrete Channel Section with Shear Keys	Lever Rule	Lever Rule	N/A

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

ตารางที่ 7 สมการตัวประกอบกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการพิจารณาแรงเฉือนของคานด้านใน (Interior Beams) สำหรับ 1 ช่องจราจร

No.	Supporting Components	One Design Lane Loaded	Range of Applicability
1	Precast Solid, Void or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	$0.70 \left(\frac{b}{L} \right)^{0.15} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.1}$	$900 \leq b \leq 1,500$ $6,000 \leq L \leq 37,000$ $5 \leq N_b \leq 20$ $1.0 \times 10^{10} \leq J \leq 2.5 \times 10^{10}$ $1.7 \times 10^{10} \leq I \leq 2.5 \times 10^{10}$
2	Precast Concrete Channel Section with Shear Keys	Lever Rule	N/A

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

ตารางที่ 8 สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการ
พิจารณาค่าแรงเฉือนของคานด้านในจำนวนช่องจราจรที่ ออกแบบตั้งแต่ 2 ช่องขึ้นไป

No.	Supporting Components	Two or More Design Lanes Loaded	Range of Applicability
1	Precast Solid, Void or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	$0.70 \left(\frac{b}{4,000} \right)^{0.4} \left(\frac{b}{L} \right)^{0.1} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.05} \left(\frac{b}{1,200} \right)$	$900 \leq b \leq 1,500$ $6,000 \leq L \leq 37,000$ $5 \leq N_b \leq 20$ $1.0 \times 10^{10} \leq J \leq 2.5 \times 10^{10}$ $1.7 \times 10^{10} \leq I \leq 2.5 \times 10^{10}$
2	Precast Concrete Channel Section with Shear Keys	Lever Rule	N/A

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

ตารางที่ 9 สมการตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกจรต่อ 1 ช่องจราจรสำหรับการ
พิจารณาค่าแรงเฉือนของคานด้านริม (Exterior Beams)

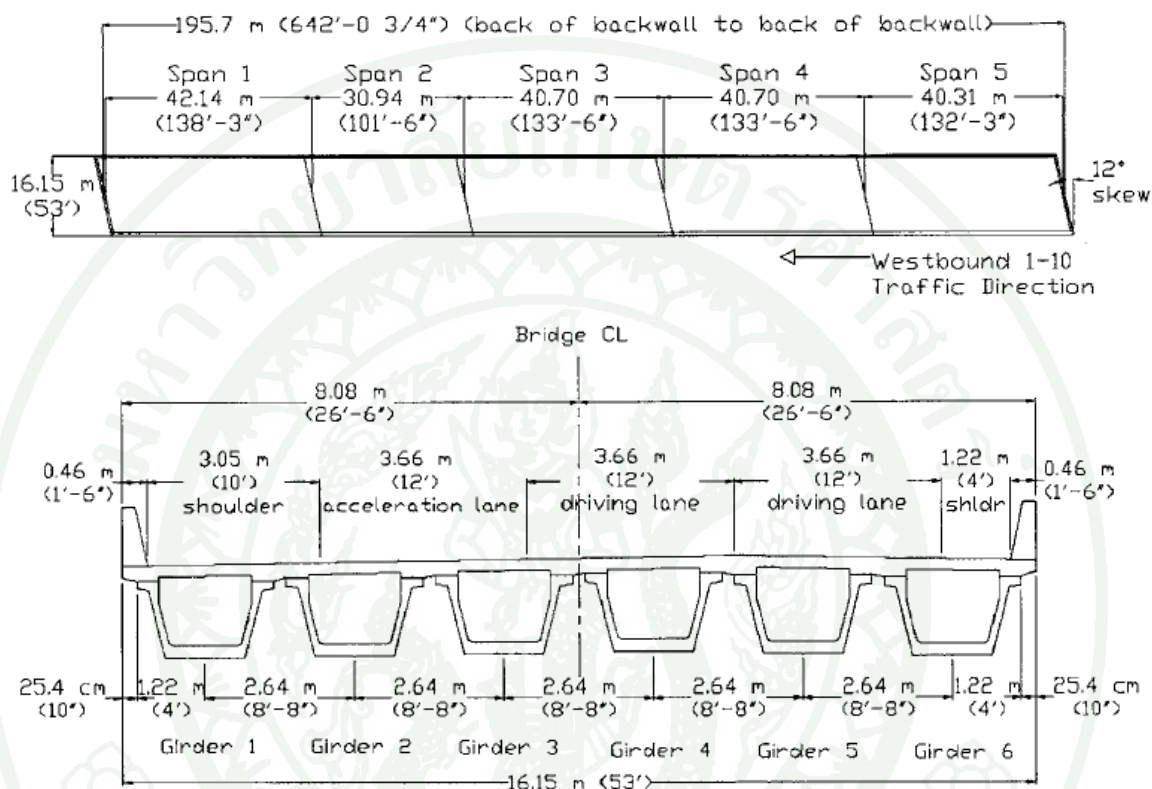
No.	Supporting Components	One Design Lane Loaded	Two or More Design Lanes Loaded	Range of Applicability
1	Precast Solid, Void or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	$g = e g_{\text{interior}}$ $e = 1.25 + \frac{d_e}{6,100} \geq 1.0$	$g = e g_{\text{interior}} \left(\frac{1200}{b} \right)$ $\frac{1,200}{b} \leq 1.0$ $e = 1 + \left(\frac{d_e + b - 610}{12,200} \right)^{0.5} \geq 1.0$	$d_e \leq 600$ $900 \leq b \leq 1,500$
2	Precast Concrete Channel Section with Shear Keys	Lever Rule	Lever Rule	N/A

ที่มา: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007)

- เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพื้นหรือคาน มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร
- b คือ ความกว้างของคาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- C คือ ตัวแปรของ Stiffness
- D คือ ความกว้างของการกระจายแรงต่อ 1 ช่องจราจร มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- d คือ ความลึกประสิทธิภาพของแผ่นพื้นหรือคาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- d_c คือ ระยะจากขอบนอกของแผ่นพื้นแผ่นริมถึงขอบทางเท้าด้านใน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- g คือ ตัวประกอบการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุก
- I_p คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่หน้าตัดเพลลา (Polar moment of inertia) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร⁴
- J คือ St. Venant's Torsional Inertia มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร⁴
- K_g คือ ความแกร่ง (Stiffness) ตามแนวยาว
- L คือ ความยาวช่วงของแผ่นพื้นสะพานหรือคาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- N_b คือ จำนวนของแผ่นพื้นหรือคาน
- N_c คือ จำนวนช่องในแผ่นพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง
- N_L คือ จำนวนช่องจราจรในการออกแบบ
- S คือ ระยะห่างของคานหรือแผ่นพื้น มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- t_0 คือ ความหนาของวัสดุทับหน้าโครงสร้าง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- t_s คือ ความหนาของพื้นคอนกรีต มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- W คือ ความกว้างของสะพานจากขอบถึงขอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- W_e คือ ความยาวของครึ่งหนึ่งของแผ่นพื้นบวกกับระยะของพื้นที่ยื่น มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
- θ คือ มุมเอียงตามแนวราบของสะพาน (Skew angle)

Hughs and Idriss (2006) ได้ศึกษาการประเมินค่าตัวประกอบการกระจายแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานคอนกรีตอัดแรงที่มีหน้าตัดคานแบบ Box Girder ค่าการกระจายของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกจรนำไปปรับเทียบแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ น้ำหนักบรรทุกจรออกแบบ HS20-44 จากมาตรฐานของ AASHTO เพื่อนำตัวประกอบการกระจายของแรงสูงสุดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับวิธีการ

คำนวณตามมาตรฐาน AASHTO สำหรับสะพานที่ศึกษามีความกว้าง 16.15 เมตร ความยาวทั้งหมด 195.70 เมตร โดยสะพานมีจำนวน 5 ช่วงสะพาน รายละเอียดของสะพานที่นำมาศึกษาแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนและหน้าตัดสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบ Box Girder

ที่มา: Hughs and Idriss (2006)

ค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานได้ถูกแปลงกลับมาเป็นค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงแล้วเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับผลการกระจายโมเมนต์คัตที่ตำแหน่งกลางสะพานและผลการกระจายแรงเฉือนที่ตำแหน่งแท่นรองรับสะพาน (Abutment) ผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายตัวสูงสุดทั้งโมเมนต์คัตและแรงเฉือนจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบสะพาน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 10 จากตารางการเปรียบเทียบพบว่าผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนสูงกว่าผลการทดสอบทั้งตำแหน่งคานช่วงกลางและคานช่วงริม ดังนั้นการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีความปลอดภัยกว่า (Conservative)

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงสูงสุดระหว่างผลการทดสอบ
สะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แรงกระจายที่พิจารณา	คานช่วงกลาง	คานช่วงริม
โมเมนต์ดัด	12.20 %	5.55 %
แรงเฉือน	4.92 %	8.78 %

ที่มา: Hughs and Idriss (2006)

การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงสูงสุดระหว่างวิธีการคำนวณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD กับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสะพานที่นำมาศึกษาพบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีความปลอดภัยกว่าวิธีการคำนวณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD มีเพียงค่าตัวประกอบจากการกระจายโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานช่วงกลางที่คำนวณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD มีความปลอดภัยกว่าการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ รายละเอียดการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 11 พบว่าค่าตัวประกอบการกระจายแรงสูงสุดจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการจาก AASHTO มีเพียงการกระจายโมเมนต์ดัดตำแหน่งคานช่วงกลางมีค่าความปลอดภัยจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีที่มีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงสูงสุดระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วย
ไฟไนต์เอลิเมนต์กับ AASHTO LRFD

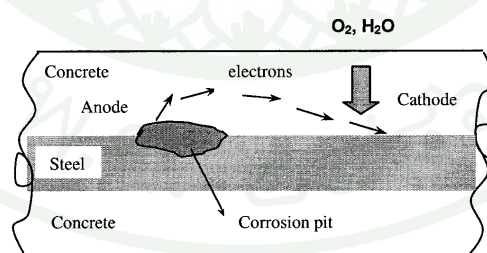
แรงกระจายที่พิจารณา	ค่าตัวประกอบจากการกระจายแรงสูงสุด		ความแตกต่าง (%)
	AASHTO LRFD	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	
คานช่วงกลาง			
โมเมนต์ดัด	0.555	0.565	-1.70
แรงเฉือน	0.890	0.791	12.60
คานช่วงริม			
โมเมนต์ดัด	0.966	0.550	75.70
แรงเฉือน	1.065	0.714	49.20

ที่มา: Hughs and Idriss (2006)

4. การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ประสิทธิภาพของระบบการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมต้องมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อให้การเสริมกำลังด้วยระบบ CFRP มีกำลังได้ตามที่ออกแบบ และมีพฤติกรรมเป็นไปตามจุดประสงค์ของการออกแบบ ดังนั้นคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มีความเสื่อมสภาพและมีความเสียหายเช่น คอนกรีตหลุดร่อน เป็นโพรง เหล็กเสริมและคอนกรีตเกิดการแยกชั้นและการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม สภาพของโครงสร้างเหล่านี้ต้องได้รับการซ่อมแซมให้มีสภาพที่สมบูรณ์ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ต่อไป

การเสื่อมสภาพและความเสียหายของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น อายุการใช้งานที่ยาวนานโดยที่ไม่มีการซ่อมบำรุง น้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่าข้อกำหนด อุบัติเหตุจากการจราจร และสภาพแวดล้อม เป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากโครงสร้างสะพานคอนกรีตต้องอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งบ่อยครั้งจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ซึ่งจะเริ่มเกิดที่บริเวณผิวคอนกรีตและค่อย ๆ คืบเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจนถึงเหล็กเสริม การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเริ่มจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอนกรีต โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นหลักทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยมีน้ำร่วมทำปฏิกิริยา แสดงดังสมการที่ 5 และภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

ที่มา: Lounis (2001)

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตมีค่าความเป็นด่างสูง โดยมีค่า pH อยู่ประมาณ 12 ถึง 13 คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมตามธรรมชาติ แต่การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นจะทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ค่า pH เหลือเพียงประมาณ 8 ถึง 9 ซึ่งหากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นมากเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มที่เคลือบอยู่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตถูกทำลายลงจนส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมในที่สุด

การเกิดสนิมทำให้เกิดการแตกร้าว (Crack) และการหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก (Spalling) เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดสนิมและจะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตหุ้มนั้นเกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น

Park and Yang (2004) ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ซ่อมแซมด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกันคือ โพลีเมอร์ซีเมนต์มอร์ตาร์ (Polymer Cement Mortar) กับ มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ประเภท 1 (Ordinary Portland Cement Mortar) เปรียบเทียบกับคานทดสอบที่มีความสมบูรณ์ โดยคานทดสอบมีจำนวน 8 ตัวอย่าง ทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (Four-Point Loading Test) ซึ่งมีขนาดหน้าตัดและความยาวที่มีขนาดเท่ากันคือ 0.15 x 0.25 x 2.20 เมตร โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 2 เมตร เหล็กเสริมบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. จำนวน 2 เส้น สำหรับเหล็กเสริมล่างมีขนาดที่แตกต่างกันคือ 16 มม. และ 22 มม. ตามลำดับ ตำแหน่งของการซ่อมแซมคานคือวัดระยะจากใต้ท้องคานขึ้นไป 8 ซม. ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่เหนือจากระดับเหล็กเสริมล่าง เพื่อเป็นการจำลองการซ่อมแซมในสภาวะที่คอนกรีตแยกชั้นจากเหล็กเสริม (Delamination) และคอนกรีตเกิดการหลุดร่อน (Spalling) รายละเอียดของหน้าตัดและรูปตัดตามยาวของตัวอย่างทดสอบแสดงตามตารางที่ 12 และภาพที่ 5 ตามลำดับ

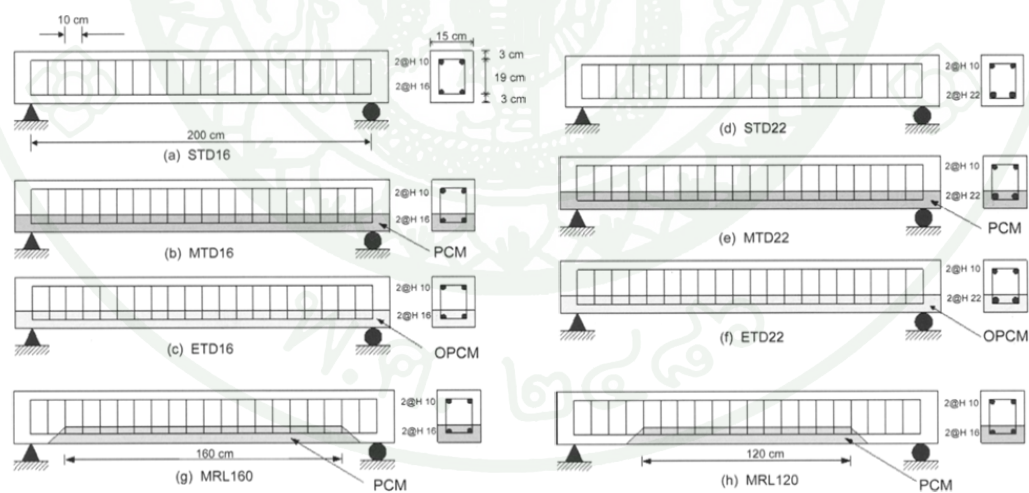
ตารางที่ 12 รายละเอียดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ

ลำดับ	ตัวอย่างทดสอบ	เหล็กเสริมล่าง	เหล็กเสริมบน	เหล็กปลอก	หมายเหตุ
1	STD16				Control Beam
2	MTD16	2-DB16	2-DB10	RB6	PCM
3	ETD16				OPCM
4	STD22				Control Beam
5	MTD22	2-DB22	2-DB10	RB6	PCM
6	ETD22				OPCM
7	MRL160	2-DB16	2-DB10	RB6	PCM
8	MRL120				PCM

หมายเหตุ : OPCM คือ Ordinary Portland Cement Mortar

PCM คือ Polymer Cement Mortar

ที่มา: Park and Yang (2004)



ภาพที่ 5 รูปตัดตามยาวของตัวอย่างทดสอบ

ที่มา: Park and Yang (2004)

สัญลักษณ์ของตัวอย่างคานทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ STD16, MTD16 และ ETD16 คือ ตัวอย่างคานควบคุม คานคอนกรีตซ่อมแซมด้วยโพลีเมอร์ซีเมนต์มอร์ต้า และคานคอนกรีตซ่อมแซมด้วยมอร์ต้าจากปูนซีเมนต์ประเภท 1 โดยมีขนาดเหล็กเสริมล่าง 16 มม. จำนวน 2 เส้นตามลำดับ สัญลักษณ์ของตัวอย่างคานทดสอบ STD22, MTD22 และ ETD22 คือ ตัวอย่างคานควบคุม คานคอนกรีตซ่อมแซมด้วยโพลีเมอร์ซีเมนต์มอร์ต้า และคานคอนกรีตซ่อมแซมด้วยมอร์ต้าจากปูนซีเมนต์ประเภท 1 โดยมีขนาดเหล็กเสริมล่าง 22 มม. จำนวน 2 เส้นตามลำดับ สำหรับสัญลักษณ์ของตัวอย่างคานทดสอบ MRL160 และ MRL120 คือ คานคอนกรีตที่ซ่อมแซมด้วยโพลีเมอร์ซีเมนต์มอร์ต้า โดยมีขนาดเหล็กเสริมล่าง 16 มม. จำนวน 2 เส้น ความยาวของการซ่อมเท่ากับ 1.60 เมตร และ 1.20 เมตร ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างทดสอบอื่นมีการซ่อมแซมตลอดช่วงความยาว

จากผลการทดสอบพบว่า MTD16 และ ETD16 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการซ่อมแซม รับแรงประลัยได้ 96 กิโลนิวตันและ 92 กิโลนิวตัน ตามลำดับ โดยคิดเทียบกับคานควบคุม STD16 ที่รับแรงประลัย 101 กิโลนิวตัน เท่ากับร้อยละ 95 และร้อยละ 91 ของการรับแรงประลัยของคานควบคุมที่เสริมเหล็กล่างขนาด 16 มม. สำหรับผลการทดสอบของตัวอย่าง MTD22 และ ETD22 รับแรงประลัย 135 กิโลนิวตันและ 121 กิโลนิวตัน ตามลำดับ โดยคิดเทียบกับคานควบคุม STD22 ที่รับแรงประลัย 162 กิโลนิวตัน เท่ากับร้อยละ 83 และร้อยละ 75 ของการรับแรงประลัยของคานควบคุมที่เสริมเหล็กล่างขนาด 22 มม. และผลการทดสอบของตัวอย่าง MRL160 และ MRL120 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการซ่อมแซมบางส่วนคิดเป็นร้อยละ 73 และร้อยละ 55 ของความยาวคานตามลำดับ รับแรงประลัย 101 กิโลนิวตันและ 104 กิโลนิวตัน ตามลำดับ โดยคิดเทียบกับคานควบคุม STD22 ที่รับแรงประลัย 101 กิโลนิวตัน เท่ากับร้อยละ 100 และร้อยละ 103 ของการรับแรงประลัยของคานควบคุมที่เสริมเหล็กล่างขนาด 16 มม. จากผลการทดสอบนี้พอจะสรุปได้ว่าการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพด้วยวัสดุโพลีเมอร์ซีเมนต์มอร์ต้าและมอร์ต้าจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 รับแรงประลัยที่น่าพอใจเมื่อเทียบกับผลการทดสอบของตัวอย่างคานควบคุมซึ่งผลอยู่ในช่วงร้อยละ 73 ถึง ร้อยละ 103

5. การเสริมกำลังโครงสร้างภายนอกด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน

การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุ CFRP ปัจจุบันได้นำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาหลายด้าน เช่นการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังโครงสร้าง ซึ่งคุณสมบัติที่ได้เปรียบของวัสดุเสริมกำลัง CFRP เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุหรือวิธีการในการเสริมกำลังแบบอื่น คือ มีน้ำหนักเบา กำลังรับแรงดึงสูง (ในทิศทางตามยาวของเส้นใยคาร์บอน) เมื่อเทียบกับเหล็ก ใช้เวลาในการ

ติดตั้งน้อย และทนต่อการกัดกร่อนจากสภาวะสิ่งแวดล้อมได้ดี คุณสมบัติของวัสดุเสริมเส้นใยแสดงดังตารางที่ 13 ซึ่งเป็นตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุเสริมเส้นใยต่างๆ เมื่อเทียบกับโลหะบางชนิด

ตารางที่ 13 คุณสมบัติของวัสดุเสริมเส้นใยและโลหะบางชนิด

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	กำลังรับน้ำหนักทิศทางเดียว		โมดูลัสแรงดึงในทิศทางเดียว (GPA)
		กำลังรับแรงดึง (MPa)	กำลังรับแรงอัด (MPa)	
เส้นใยคาร์บอน	1.55	1,482	1,227	145
เส้นใยแก้ว	1.99	1,751	496	59
เส้นใยอะรามิด	1.38	1,310	290	83
อลูมิเนียม	2.76	572		69
ไทเทเนียม	4.42	1,103		114
เหล็ก	8.00	1,241 – 1,379		207

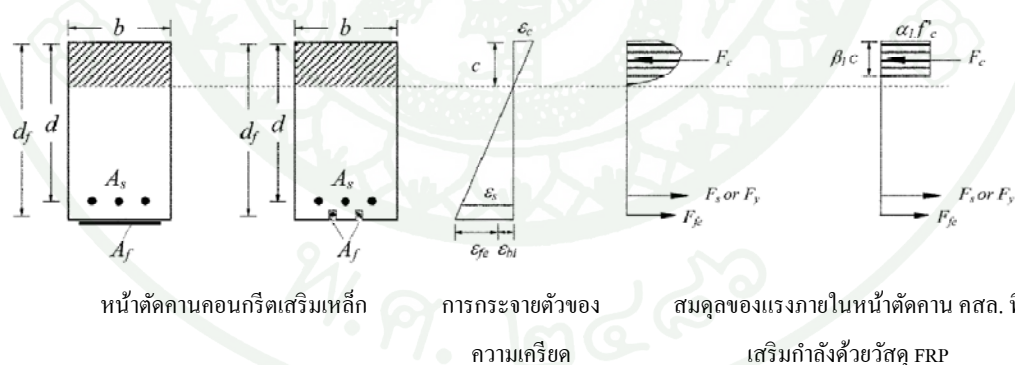
ที่มา: มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (มยพ.1508-51)

มาตรฐานในการติดตั้งวัสดุ CFRP มีอยู่ 3 วิธี คือ 1) แบบขึ้นรูปเปียก (Wet Lay - Up) การขึ้นรูปลักษณะนี้นิยมใช้กันมาก การติดตั้งวัสดุ CFRP จะขึ้นรูป ณ สถานที่ก่อสร้างแล้วทาเรซินขณะที่จัดวางเส้นใยและปล่อยให้เรซินได้รับการบ่มสมบูรณ์ ณ สถานที่ก่อสร้าง 2) แบบบ่มสำเร็จ (Precured) การขึ้นรูปลักษณะนี้จะขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไว้ล่วงหน้าโดยจะทาเรซินบนเส้นใยและทำการบ่มที่สมบูรณ์เรียบร้อยแล้วจึงนำไปติดตั้งที่สถานที่ก่อสร้าง 3) แบบฝังใกล้ผิว (Near Surface Mounted) ติดตั้งวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยลักษณะนี้จะทำการกรีดผิวคอนกรีตให้เป็นร่องแล้วจึงติดตั้งวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยลงไปร่อง ทั้งนี้ผู้ออกแบบสามารถเลือกวิธีในการติดตั้งตามสภาพโครงสร้างและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม

การเสริมกำลังคานหรือพื้นโดยการติดตั้งวัสดุ FRP เข้ากับท้องคานหรือท้องพื้น (Soffit) เพื่อเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด การติดตั้งจะติดตามแนวของเหล็กเสริมหลักเพื่อเพิ่มแรงดึงได้ โครงสร้างคานหรือพื้น

การออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ FRP ทำโดยอาศัยแนวทางการออกแบบที่เสนอโดยมาตรฐาน ACI 440.2R-08 (American Concrete Institute) วิธีการวิเคราะห์หน้าตัดโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จะมีหลักการที่คล้ายคลึงกับการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลัง (Strength Design Method, SDM) สำหรับลักษณะของการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีต (Equivalent Concrete Stress Distribution) และการยืดหดตัว (Strain Distribution) ของหน้าตัดออกแบบ แสดงดังภาพที่ 6 สมมุติฐานเบื้องต้นของการคำนวณวิเคราะห์และออกแบบหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP มีดังต่อไปนี้

1. หารูปตัดยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการรับแรงดัด นั่นคือการกระจายของหน่วยการยืดและหดตัวในคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน
2. ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตต้องไม่เกิน 0.003 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร
3. ไม่คิดกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต
4. วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP) มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จนถึงจุดวิบัติ (Failure)
5. ไม่มีการหลุดร่อนของวัสดุ FRP ออกจากผิวคอนกรีต
6. การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลัง FRP เป็นไปอย่างสมบูรณ์

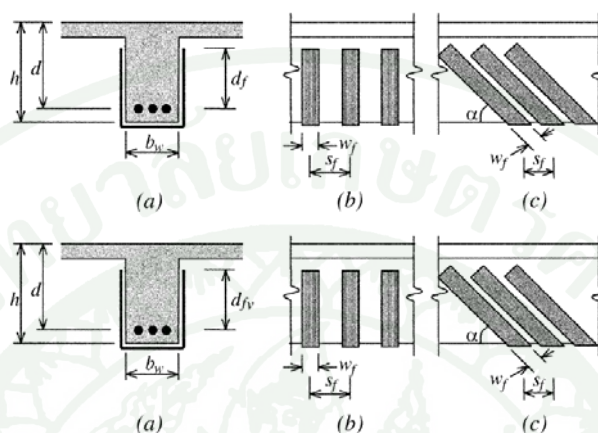


ภาพที่ 6 การวิเคราะห์กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

ที่มา: ACI 440.2R-08 (2008)

การเสริมกำลังต้านทานการรับแรงเฉือนของคานหรือพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นรูปตัวทีติดตั้งวัสดุ FRP ตามแนวเหล็กปลอกและติดเป็นระยะตามข้อกำหนดโดยที่รูปแบบการติดตั้ง FRP ที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนมากที่สุดคือการพัน FRP รอบคาน (Completely Wrapped) แต่

รูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปเพื่อเลี่ยงความยากลำบากในการติดตั้งจะมีวิธีติดตั้งแบบเป็นรูปตัวยู (U-Wrapped) และติด FRP ด้านข้าง 2 ด้าน (2-Opposite-Sides Schemes) แสดงดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8 โดยทั้งสามวิธีนี้มีตัวคุณลดกำลังที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 7 การเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือนโดยวัสดุเสริมกำลัง FRP

ที่มา: ACI 440.2R-08 (2008)

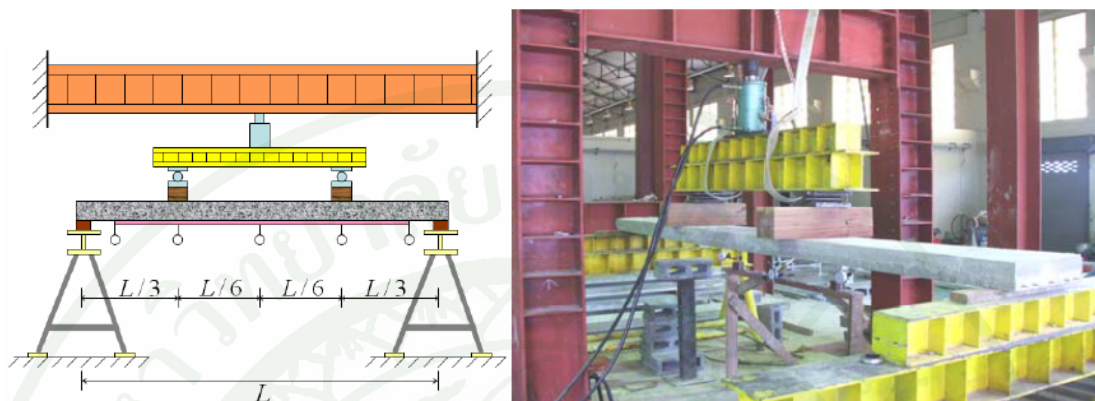


ภาพที่ 8 รูปแบบการติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง FRP สำหรับเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือน

ที่มา: ACI 440.2R-08 (2008)

สิทธิชัย และ นริศ (2549) ได้ศึกษาอัตราส่วนกำลังด้านทานที่เพิ่มขึ้นของแรงกระทำในสถานะการใช้งานของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ตัวอย่างทดสอบสำหรับการศึกษานี้มีจำนวน 20 ตัวอย่าง ทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (Four Point Loading) โดยมีความยาวประสิทธิผลระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 2.8 เมตร และ 3.8 เมตร สำหรับพื้นที่ที่มีความยาว 3 เมตร และ 4 เมตร ตามลำดับ ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 9 ตัวแปรที่ใช้ในการ

ทดสอบประกอบด้วยความยาวช่วงของพื้น พื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP และความยาวของแผ่น CFRP



ภาพที่ 9 การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด

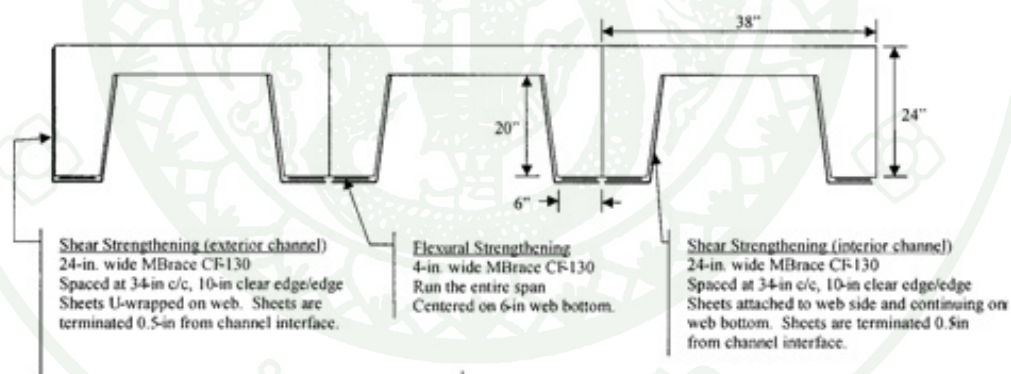
ที่มา: สิทธิชัย และ นริศ (2549)

ตัวอย่างพื้นทดสอบแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ที่มีปริมาณที่แตกต่างกัน และความยาวของแผ่นพื้นทดสอบที่มีความแตกต่างกันคือ 3 เมตร และ 4 เมตร ตามลำดับ โดยที่ตัวอย่างพื้น G1 คือแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังเป็นพื้นควบคุม (Control Slab) แรงที่ใช้ในการทดสอบใช้ Hydraulic Pump แบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้ากับ Hydraulic Jack ขนาด 30 ตัน จุดสิ้นสุดของการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี คือ เมื่อพื้นเกิดการวิบัติโดยสมบูรณ์ไม่สามารถรับแรงกระทำเพิ่มได้ หรือเมื่อเกิดการโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางความยาวของพื้นทดสอบมีค่าประมาณ $L/100$ ซึ่งมีค่าเป็น 2.4 เท่าของการโก่งตัวที่ยอมให้สำหรับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้าง

จากผลการทดสอบพบว่ากลุ่มตัวอย่างการทดสอบที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่มีความยาวพื้น 3.80 เมตร มีค่า $P_{L/240}$ เพิ่มขึ้นมากกว่าพื้นที่ที่มีความยาว 2.80 เมตร ประมาณ 1.80 ถึง 2.0 เท่า แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP มีประสิทธิภาพมากสำหรับพื้นที่ที่มีความยาวมากขึ้น (ค่า $P_{L/240}$ หมายถึง ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำที่สภาวะใช้งาน เมื่อพื้นมีการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงความยาวเท่ากับ $L/240$) ดังนั้นจากการทดสอบสรุปได้ว่า ขนาดหน้าตัดของวัสดุเสริม

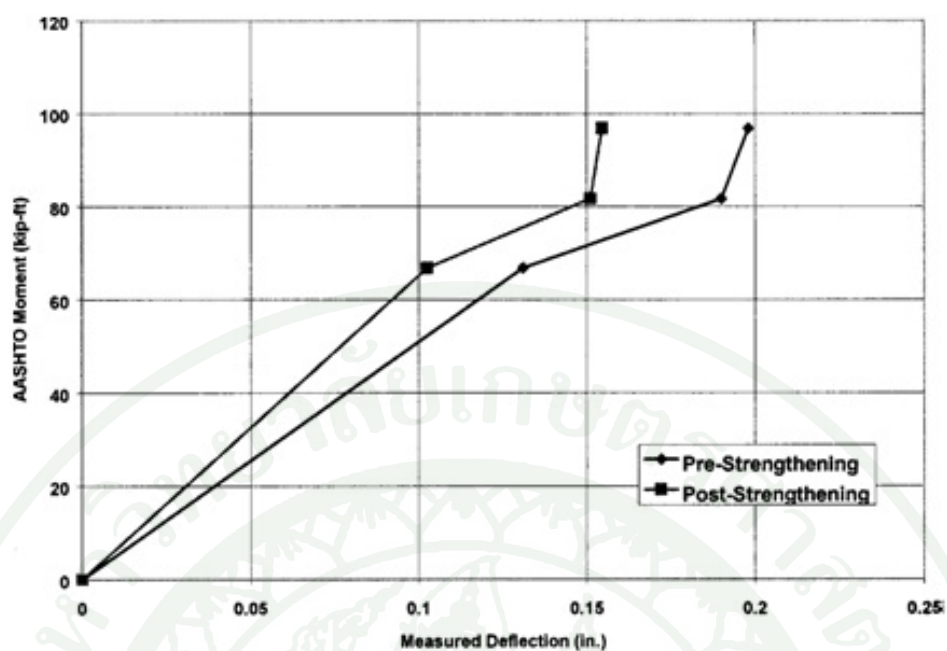
กำลัง CFRP มีผลต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น และความยาวของแผ่นพื้นทดสอบมีผลต่อประสิทธิภาพจากการเสริมกำลังภายนอกด้วยระบบ FRP

Schiebel *et al.* (2002) ได้ทำการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดโดยติดตั้งวัสดุ CFRP ขนาดกว้าง 4 นิ้วหนา 0.165 มม. ตำแหน่งได้แผ่นพื้นรูปตัวยูคว่ำและเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของพื้นสะพานโดยติดตั้งวัสดุ CFRP ขนาดกว้าง 24 นิ้วหนา 0.165 มม. ตำแหน่งขอบด้านนอก (Exterior Channel) และขอบด้านใน (Interior Channel) ของแผ่นพื้นรูปตัวยูคว่ำ แสดงดังภาพที่ 10 โดยทำการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานโดยรถบรรทุกมาตรฐาน AASHTO HS20 ทั้งก่อนการเสริมกำลังและหลังการเสริมกำลังเพื่อต้องการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้าง พบว่าการโก่งตัวที่มากที่สุดของโครงสร้างหลังการเสริมกำลังลดลงประมาณ 33% แสดงดังภาพที่ 11 และโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกจริงหลังจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP น้อยกว่าก่อนการเสริมกำลังประมาณ 40% ผลการทดสอบบ่งชี้ได้ว่าโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP สามารถลดการโก่งตัวและเพิ่มกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด



ภาพที่ 10 การเสริมกำลังพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย CFRP

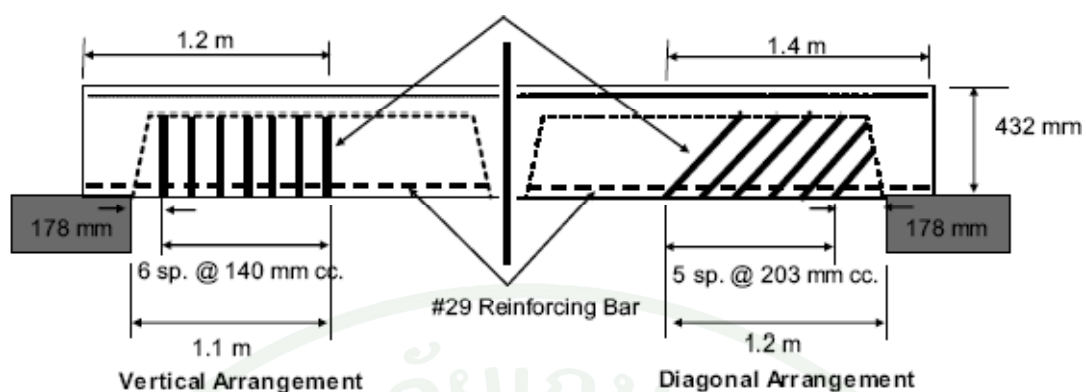
ที่มา: Schiebel *et al.* (2002)



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบระหว่างโมเมนต์กับค่าการโก่งตัวของพื้นสะพาน

ที่มา: Schiebel *et al.* (2002)

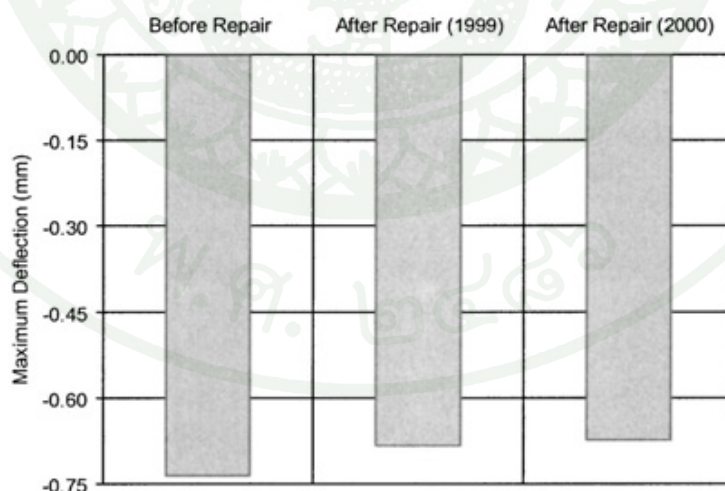
Durham *et al.* (2009) ได้ทำการเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือนพื้นสะพานสำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นรูปตัวยูซึ่งออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกจร AASHTO H15 โดยรูปแบบการติดตั้งวัสดุ FRP เป็นแบบด้านข้าง 2 ด้าน (2-Opposite-Sides Schemes) และได้ติดตั้งวัสดุ FRP เป็นแบบแนวตั้ง (Vertical Arrangement) และแบบแนวเอียง (Diagonal Arrangement) รูปแบบตัวอย่างการทดสอบได้แสดงดังภาพที่ 12 การทดสอบทำโดยกดพื้นสะพานที่มีการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP เปรียบเทียบกับพื้นสะพานที่ไม่ได้เสริมกำลังไปจนถึงพื้นสะพานเกิดการวิบัติ จากการทดสอบพบว่าความเหนียว (Ductility) ของพื้นสะพานที่เสริมกำลังด้วย FRP เพื่อต้านทานแรงเฉือนมีมากกว่าพื้นสะพานที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย FRP เนื่องจากค่าโก่งตัวในช่วงก่อนการวิบัติ (Deflection Ductility) ของพื้นที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP เพื่อต้านทานแรงเฉือนมีมากกว่า สำหรับการเสริมกำลังรับแรงเฉือนโดย FRP ที่ติดตั้งแนวตั้งและแนวเอียงจากการทดสอบนี้ผลการทดสอบไม่มีความแตกต่างกันมาก



ภาพที่ 12 รูปแบบการติดตั้งวัสดุ FRP

ที่มา: Durham *et al.* (2009)

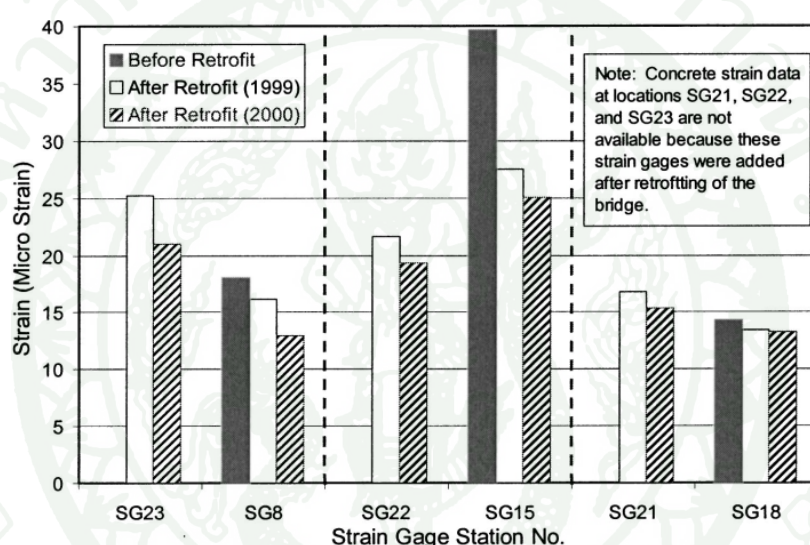
Shahrooz and Boy (2004) ได้ทำการเสริมกำลังพื้นสะพานที่มีจำนวนช่วงสะพาน 3 ช่วง มีจุดรองรับเป็นแบบอย่างง่าย (Simple Support) เพื่อหาผลตอบสนองของโครงสร้างที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่นแข็งหนา 1.33 มม. ที่มีรูปแบบและเทคนิคที่แตกต่างกันรวมถึงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโครงสร้างที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ในช่วงระยะเวลาหลังจากการใช้งาน 1 ปี กับช่วงเวลาหลังจากเสริมกำลังทันที



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบการโก่งตัวของพื้นสะพานก่อนและเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

ที่มา: Shahrooz and Boy (2004)

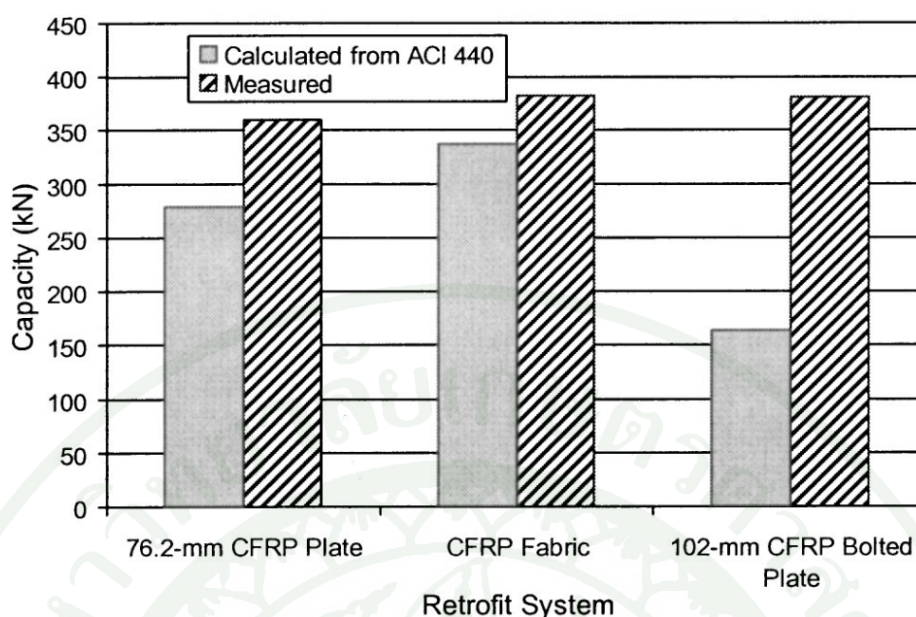
จากการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานโดยรถบรรทุกมาตรฐาน ODOT (Ohio Department of Transportation) จำนวน 2 คัน ที่มีน้ำหนักประมาณ 132 KN ต่อคัน ระยะห่างระหว่างเพลาน้ำถึงเพลาลัง 356 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างล้อ 203 เซนติเมตร โดยทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานทั้งก่อนเสริมกำลังและหลังจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP พบว่าการโก่งตัวลดน้อยลงหลังจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ทั้งช่วงหลังจากเสริมกำลังทันที และหลังจากการใช้งาน 1 ปี ดังภาพที่ 13 เป็นภาพที่แสดงการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวที่ระยะเวลาต่างๆ รวมไปถึงความเครียดที่ได้วัดจากการทดสอบมีค่าน้อยลงหลังจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของโครงสร้างพื้นสะพานก่อนและหลังจากการเสริมกำลัง

ที่มา: Shahrooz and Boy (2004)

จากงานวิจัยนี้พบว่ากำลังต้านทานของโครงสร้างที่รับได้จริง (Actual Capacity) มีกำลังต้านทานมากกว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 (2008) ซึ่งแสดงว่าสมการจาก ACI 440.2R-08 (2008) มีความปลอดภัย (Conservative) สำหรับการคำนวณออกแบบเสริมกำลัง ดังภาพที่ 15 เป็นภาพที่แสดงกำลังต้านทานของโครงสร้างที่คำนวณจากสมการเทียบกับกำลังต้านทานของโครงสร้างที่รับได้จริง (Actual Capacity) ที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน



ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบกำลังต้านทานของโครงสร้างที่รับได้ (Capacity)

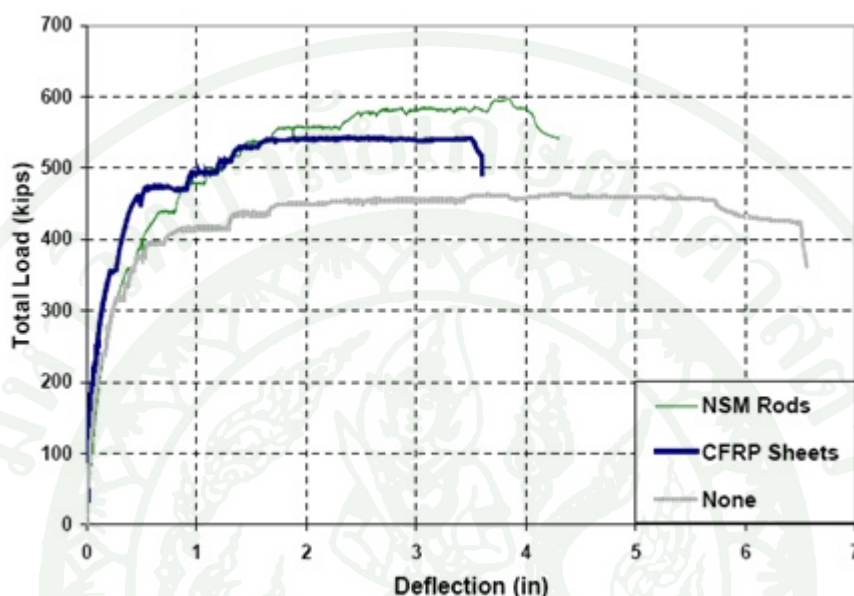
ที่มา: Shahrooz and Boy (2004)

Alkhrdaji *et al.* (1999) ได้ทำการเสริมกำลังสะพานด้วยวัสดุ CFRP ที่มีลักษณะต่างกัน โดยทดสอบกับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Slab Type ที่มีจำนวนช่วงสะพาน 3 ช่วง (3 Spans) สะพานช่วงแรกได้มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบฝังใกล้ผิว (Near Surface Mounted) สะพานช่วงที่สองได้มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบขึ้นรูปเปียก (Wet Lay - Up) ส่วนสะพานช่วงที่สามไม่ได้มีการเสริมกำลัง ทั้งนี้การเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ทั้งสองแบบได้คำนวณออกแบบรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดจากบรรทัดมาตรฐาน AASHTO HS20-44 เพิ่มขึ้นอีก 30%

การทดสอบโครงสร้างสะพานนี้ทดสอบแบบสถิตจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP แบบฝังใกล้ผิว (NSM) จะเกิดการฉีกขาด (Rupture) ของแผ่น CFRP บางส่วนบริเวณตำแหน่งรอยร้าวที่มีความกว้างมาก ส่วนลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบขึ้นรูปเปียก (Wet Lay - Up) จะเกิดการฉีกขาดของแผ่น CFRP ร่วมกับการหลุดลอก (Peeling) ของแผ่น CFRP ออกจากโครงสร้าง

จากงานวิจัยนี้พบว่า การเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ทั้งแบบฝังใกล้ผิว (NSM) และแบบขึ้นรูปเปียก (Wet Lay - Up) เมื่อนำมาทดสอบแบบสถิตจนถึงระดับโครงสร้างเกิดการวิบัติ

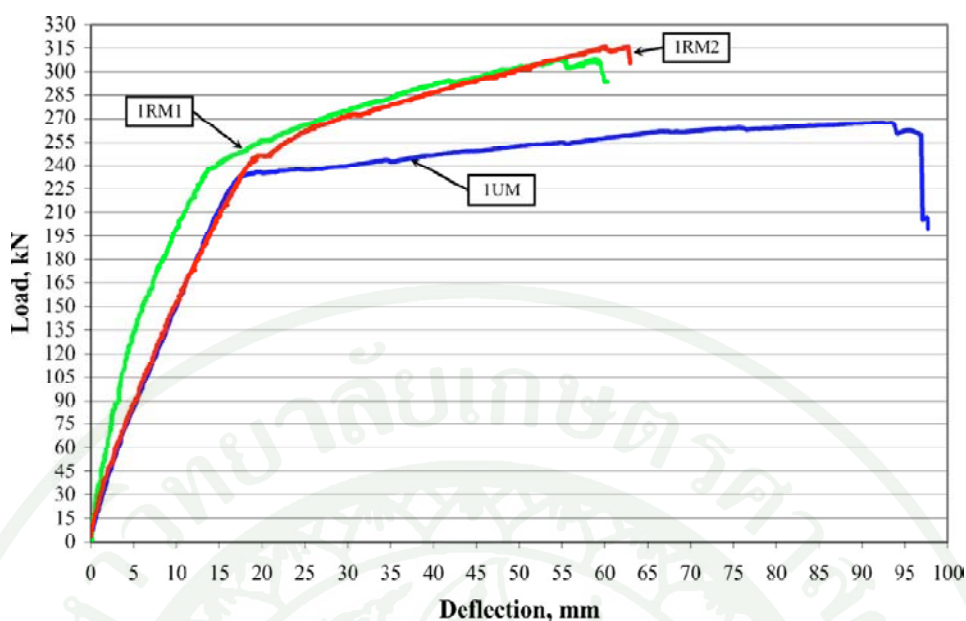
(Ultimate Load Test) จะเกิดการโก่งตัวและความเครียดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าโก่งตัวของพื้นสะพาน

ที่มา: Alkhrdaji *et al.* (1999)

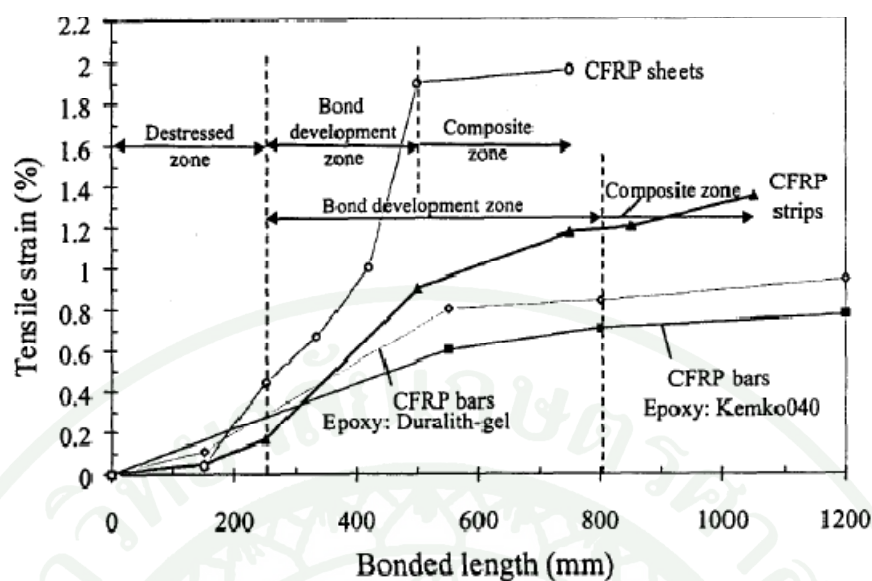
Petrou *et al.* (2008) ได้ตัดโครงสร้างพื้นสะพานที่ได้ใช้งานมาทำการทดสอบหาค่าการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติเพื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างสะพานเดิมกับโครงสร้างสะพานเดิมแล้วเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่นแข็ง โดยมีพื้นสะพานแบบเสริมเหล็กทางเดียวจำนวน 3 ตัวอย่าง เสริมกำลังเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัดด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่นแข็ง 2 ตัวอย่าง คือ 1RM1 และ 1RM2 และไม่ได้เสริมกำลัง 1 ตัวอย่าง คือ 1UM เมื่อทำการทดสอบแล้วนำค่าแรงกดกับค่าการโก่งตัวมาแสดงความสัมพันธ์ดังภาพที่ 17 พบว่าตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่นแข็งมีความต้านทานกำลังอัดประลัย (Ultimate Strength) มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง 14.8% และ 18.1% รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย CFRP แบบแผ่นแข็งในงานวิจัยนี้เกิดจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวกัน (Debonding) ระหว่าง CFRP กับโครงสร้าง โดยการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวเริ่มจากช่วงกลางของแผ่นพื้นตัวอย่าง



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าโก่งตัวของพื้นสะพาน

ที่มา: Petrou *et al.* (2008)

Rizkalla and Hassan (2001) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความยาวประสิทธิภาพ (Development Length) ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ CFRP ที่ต่างชนิดกัน โดยใช้ตัวอย่างคานรูปตัวทีช่วงความยาว 2.5 เมตร จำนวน 24 ตัวอย่าง เสริมกำลังด้วย CFRP ที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ 1) แบบฝังใกล้ผิว โดยวัสดุ CFRP bars 2) แบบฝังใกล้ผิวโดยวัสดุ CFRP Strips 3) แบบขึ้นรูปเปียกโดยวัสดุ CFRP Sheets ทดสอบโดยวิธีสถิตจนตัวอย่างทดสอบวิบัติผลที่ได้จากการทดสอบนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะยึดเหนี่ยว ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Tensile Strain) กับระยะยึดเหนี่ยว (Bonded Length)

ที่มา: Rizkalla and Hassan (2001)

จากงานวิจัยนี้ได้ความยาวประสิทธิภาพของ CFRP Bar สำหรับแผ่นหนา 10 มิลลิเมตร ยาวไม่น้อยกว่า 800 มิลลิเมตร สำหรับแบบฝังใกล้ผิว (NSM) โดย CFRP Strips ยาวไม่น้อยกว่า 850 มิลลิเมตร และสำหรับแบบขึ้นรูปเปียก (Wet Lay-Up) โดย CFRP Sheets ยาวไม่น้อยกว่า 500 มิลลิเมตร

6. การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพาน

การทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน (Bridge Load Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกทดสอบ รวมทั้งเป็นการทดสอบเพื่อประเมินความแข็งแรงและประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำไปใช้ในการปรับสภาพแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างสะพาน เพื่อให้พฤติกรรมของโครงสร้างในแบบจำลองมีความสอดคล้องกับโครงสร้างสะพานจริง ซึ่งนำแบบจำลองที่ได้ปรับไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานต่อไป

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานจำแนกออกมาเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิต (Static Load Test) เป็นการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปเชิงสถิตของโครงสร้างสะพาน เช่น การโก่งตัวของโครงสร้าง และหน่วยความเครียดในโครงสร้างเนื่องจากการรับน้ำหนักของรถบรรทุกทดสอบที่หยุดนิ่งตามตำแหน่งที่กำหนดบนสะพาน

วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิต มี 2 วิธี คือ

1.1 การทดสอบแบบ Diagnostic Load Test คือ การตรวจวัดผลการตอบสนองที่จุดต่างๆ ของโครงสร้าง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กำหนดไว้ในเบื้องต้น เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

1.2 การทดสอบแบบ Proof Load Test คือ การพิจารณาถึงขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจนถึงระดับการวิบัติ (Ultimate) ของโครงสร้างสะพานที่เกิดขึ้นจริง กล่าวคือเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยสูงสุดที่สะพานสามารถรับได้ก่อนที่พฤติกรรมโครงสร้างสะพานจะเลยช่วง Elastic Limit

2. การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัต (Dynamic Load Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าการตอบสนองของโครงสร้างสะพานเนื่องจากรับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่บนสะพานด้วยความเร็วที่กำหนด ในแต่ละความเร็วที่วิ่งผ่านบนสะพานจะทำการตรวจวัดและบันทึกค่าต่างๆที่เกิดขึ้นซึ่งได้แก่ ค่าความเครียด ค่าการโก่งตัวในแนวดิ่ง (Vertical Displacement) และค่าความเร่งในแนวดิ่ง (Vertical Acceleration) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัตจะนำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต (Dynamic Amplification Factor, DAF) และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

2.1 ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานสามารถวิเคราะห์ได้จากการสั่นไหวแบบอิสระ (Free Vibration) ของตัวโครงสร้างเองหากมีแรงกระทำหรือมีแรงภายนอกมากระตุ้นโครงสร้างด้วยความถี่ที่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจะทำให้โครงสร้างสะพานมีการตอบสนองที่สูงกว่าปกติอย่างมากจนทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อโครงสร้างอาจก่อให้เกิดอันตรายและความเสียหายได้ โดยทั่วไปแล้วรถบรรทุกทุกหนักจะมีความถี่การสั่นไหวอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 Hz ดังนั้นโครงสร้างสะพานที่มีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างจากช่วงดังกล่าว ก็จะมีแนวโน้มที่จะไม่เกิดปัญหาเนื่องจากการการสั่นพ้องของโครงสร้างสะพาน ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างคำนวณได้โดยอาศัยกระบวนการ Fast Fourier Transformation (FFT) โดยแปลงข้อมูลความเร่งที่บันทึกได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ที่อยู่ในรูปประวัติเวลา (Time History) แล้วตัดข้อมูลในช่วงของการสั่นไหวอิสระมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณความถี่ (Frequency domain) โดยอาศัยสมการที่ 6 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในกระบวนการของวิธี FFT โดยความถี่ (Frequency) ที่มีแอมพลิจูด (Amplitude) สูงที่สุดคือค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{X}(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (6)$$

เมื่อ k คือ 0, -1, 1, -2, 2, -3, 3, ...

2.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต (Dynamic Amplification Factor, DAF)

ผลการตอบสนองของสะพานได้แก่ ความเครียดและการโก่งตัวที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ค่า DAF เป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานในการออกแบบเพราะเป็นค่าที่บอกถึงผลการตอบสนองของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นในสภาวะพลวัตนอกเหนือจากแรงกระทำแบบสถิต โดยที่ DAF คำนวณได้จากสมการที่ 7

$$DAF = \left(\frac{R_{Static} + R_{Dynamic}}{R_{Static}} \right) \times 100 \quad (7)$$

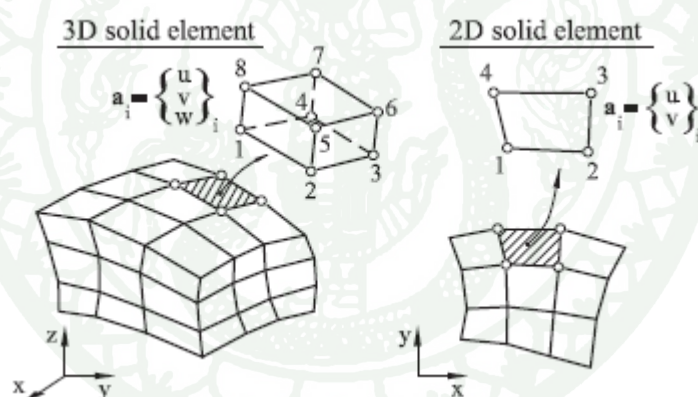
เมื่อ DAF คือ อัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต

R_{STATIC} คือ ผลการตอบสนองของพฤติกรรมเชิงสถิต

$R_{DYNAMIC}$ คือ ผลการตอบสนองของพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์

7. การจำลองโครงสร้างสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ไขปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นการแบ่งขอบเขตของโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (Elements) โดยที่แต่ละชิ้นส่วนย่อยจะมีจุดต่อ (Nodes) เชื่อมกันซึ่งจุดต่อแต่ละจุดจะมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ จำเป็นจะต้องสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) แล้วนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่หาได้มาประกอบรวมกันจะได้เป็นระบบสมการรวม (System of Simultaneous Equations) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งระบบ ในภาพที่ 19 เป็นการแบ่งเอลิเมนต์ 2 และ 3 มิติ



ภาพที่ 19 รูปการแบ่งเอลิเมนต์ของวัตถุในรูปแบบ 3 มิติและ 2 มิติ

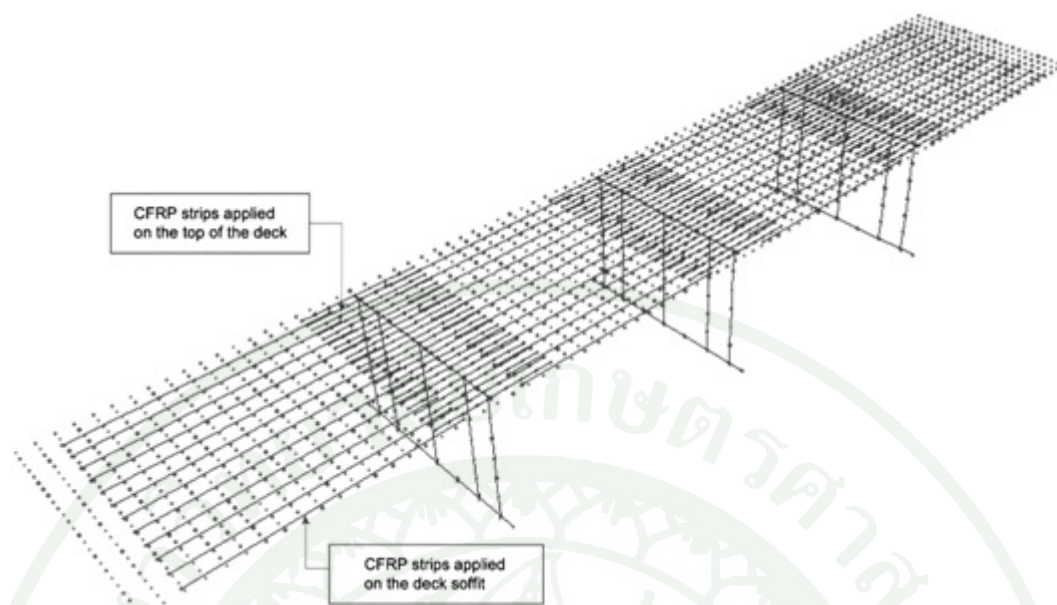
ที่มา: Oñate (2009)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยการจำลองแบบ 3 มิติ (Finite Element Analysis, FEA) โดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประมวลผลเพื่อหาผลการตอบสนองของโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักบรรทุก การจำลองโครงสร้างในโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะต้องสร้างขึ้นมาจากข้อมูลขนาดมิติที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดสะพานจริงมากที่สุดโดยได้มาจากการสำรวจภาคสนามอย่างละเอียด และสิ่งที่สำคัญในการจำลองโครงสร้างของสะพานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์คือ สภาพโครงสร้างของสะพานหลังจากการใช้งานที่อาจมีการเสื่อมสภาพหรือกำลังรับแรงของ

โครงสร้างที่ลดลงไปจากเดิม ทำให้พฤติกรรมจริงแตกต่างจากการจำลองโครงสร้างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้น จึงต้องมีการปรับค่าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete, f_c') ซึ่งได้มาจากผลการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานโดยรถบรรทุกและการทดสอบวัสดุที่ได้ตัวอย่างมาจากโครงสร้างของสะพานเดิม

เทคนิคการจำลองโครงสร้างแบบ 3 มิติ (Finite Element Simulation) เพื่อที่จะให้มีผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงจะขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปและลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้แทนองค์อาคารต่างๆของแบบจำลองให้สอดคล้องและเหมาะสมกันเพื่อซึ่งจะทำให้มีความถูกต้องมากขึ้น

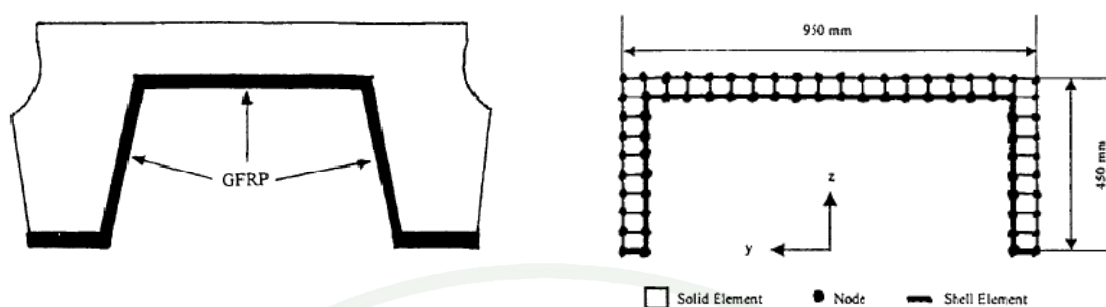
Zanardo *et al.* (2007) ได้ทำการเสริมกำลังสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุ CFRP สำหรับสะพานที่ต้องรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการจราจร การเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP เสริมกำลังทั้งโมเมนต์บวกซึ่งติดวัสดุ CFRP ที่บริเวณผิวพื้นใต้สะพานและโมเมนต์ลบซึ่งติดวัสดุ CFRP ที่บริเวณด้านบนผิวของพื้นสะพาน วิธีการจำลองโครงสร้างสะพานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ได้ใช้โปรแกรม SAP2000 การขึ้นรูปของโครงสร้างส่วนต่างๆของสะพานมีดังนี้คือ พื้นสะพานขึ้นรูปแบบ Shell Element คานขวางและเสาตอม่อสะพานขึ้นรูปแบบ Frame Element ในส่วนของวัสดุ CFRP ขึ้นรูปแบบ Frame Element ตำแหน่งของ CFRP ที่จำลองจะอยู่ที่ตำแหน่งท้องผิวพื้นสะพาน และตำแหน่งบนผิวพื้นสะพานแล้วเชื่อมต่อจุด (Node) ของพื้นสะพาน (Shell Element) กับ CFRP (Frame Element) เชื่อมต่อแบบยึดรั้ง (Link Constraint) เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสถานะแบบวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) มากที่สุด ตัวอย่างดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 รูปแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างสะพานโดยโปรแกรม SAP2000

ที่มา: Zanardo *et al.* (2007)

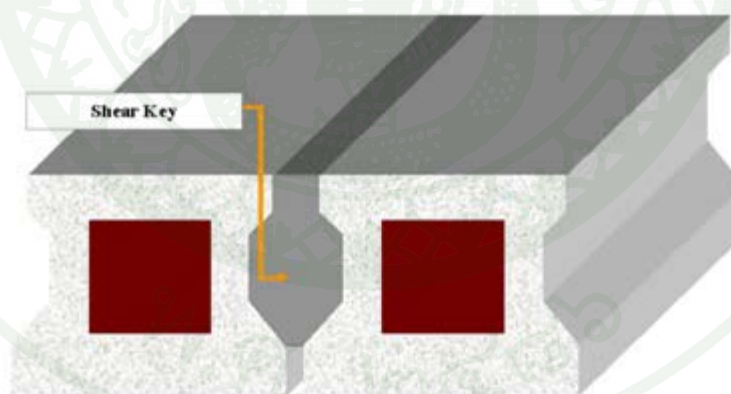
Ross *et al.* (2004) ได้นำแผ่นพื้นสะพานรูปตัวยูกว่า (Channel Beam Bridge Girders) มาจากสะพานที่มีการเสื่อมสภาพมาเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) แล้วทดสอบโดยวิธีรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Load Test) นำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังเพื่อต้องการทราบถึงประสิทธิภาพของวัสดุ GFRP ในด้านต่างๆ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างพื้นสะพานแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม SAP2000 ขึ้นรูปเฉพาะส่วนแผ่นพื้นสะพาน โดยส่วนที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตใช้ Solid Element ขึ้นรูปส่วนวัสดุ GFRP ใช้ Shell Element ขึ้นรูป การจำลองตัวอย่างแบบ 3 มิติ มีความจำเป็นต่อการประเมินผลกระทบของวัสดุ GFRP ที่มีต่อตัวอย่างสำหรับการทดสอบอื่นๆ ที่ไม่ได้ทดสอบในห้องทดลอง ตัวอย่างการขึ้นรูปแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 21 โดยการจำลองตัวอย่างแบบ 3 มิติ จะนำค่าที่ได้จากการทดสอบจากห้องทดสอบมาปรับแก้เพื่อให้แบบจำลองนี้มีความใกล้เคียงกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบมากที่สุด



ภาพที่ 21 แบบจำลอง 3 มิติของแผ่นพื้นสะพาน โดยโปรแกรม SAP2000

ที่มา: Ross *et al.* (2004)

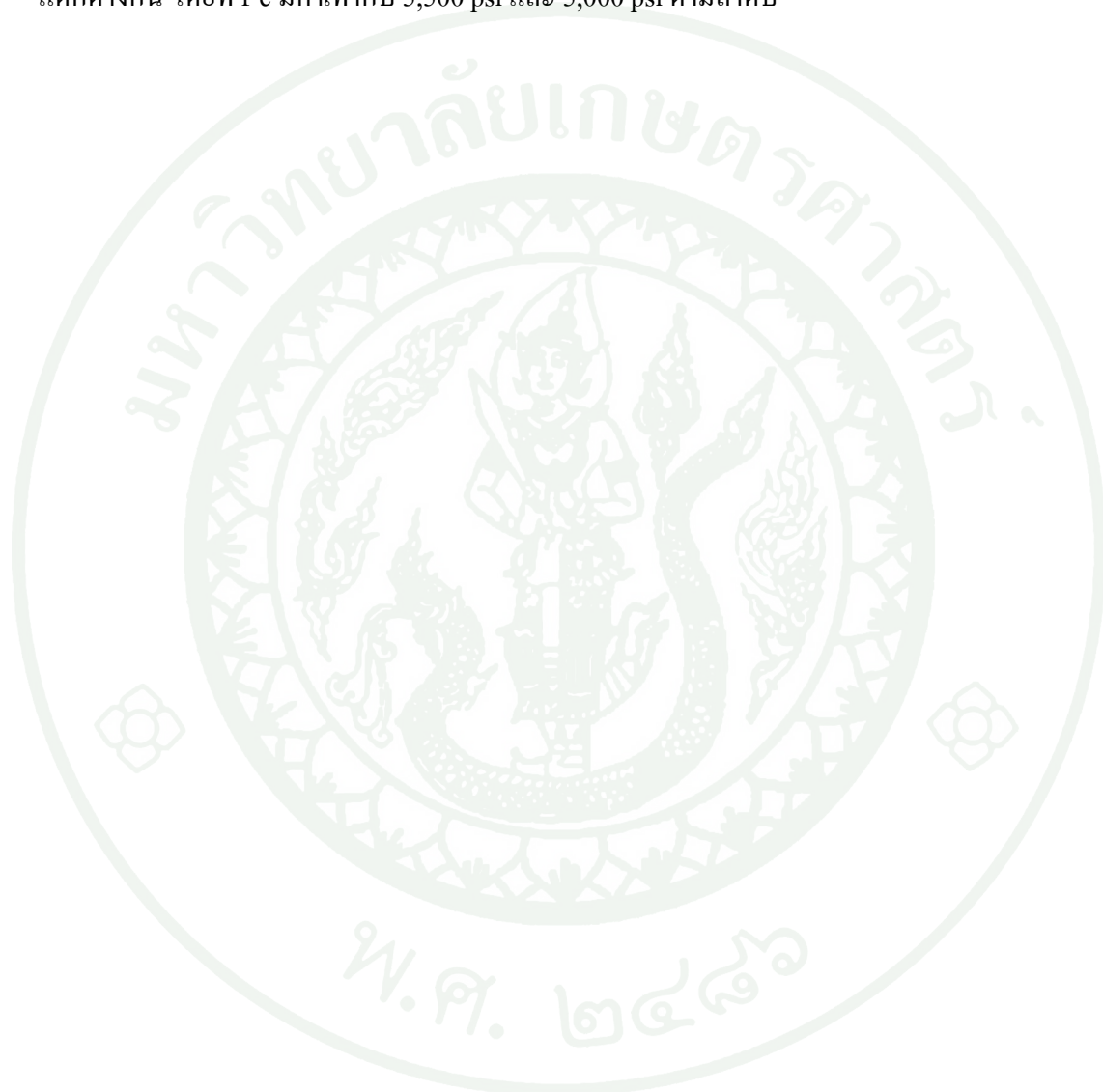
Sharpe (2007) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับบารับแรงเฉือน (Shear Key) ในโครงสร้างพื้นสะพานที่มีลักษณะเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน (Multi Beam Box Girder Bridge) แสดงดังภาพที่ 22 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างแผ่นพื้นสะพานโดยมีบารับแรงเฉือนเป็นรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นสะพานสำเร็จรูปที่นำมาวางเรียงกัน การจำลองโครงสร้างพื้นสะพานและบารับแรงเฉือนนี้ได้จำลองโครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ANSYS (ANSYS 2005)



ภาพที่ 22 บารับแรงเฉือน (Shear Key) ของพื้นสะพานสำเร็จรูปวางเรียงกัน

ที่มา: Sharpe (2007)

รายละเอียดในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของพื้นสะพานแบบสำเร็จรูปใช้ Solid Element ขึ้นรูป บำรับแรงเฉือนขึ้นรูปโดยใช้ Solid Element และจุดต่อ (Node) เป็นจุดต่อแบบแข็งเกร็ง (Rigidity Connection) สำหรับการระบุคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) ได้กำหนดให้ค่าหน่วยแรงอัด (Compressive Strength, f_c) ของโครงสร้างพื้นสำเร็จรูปและ Shear Key มีค่าที่แตกต่างกัน โดยที่ f_c มีค่าเท่ากับ 5,500 psi และ 5,000 psi ตามลำดับ



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- 1) Strain Gauge สำหรับวัดความเค้นดคอนกรีต
- 2) Strain Gauge สำหรับวัดความเค้นดเหล็ก
- 3) Accelerometer
- 4) Displacement Transducer
- 5) Data Logger
- 6) Rebound Hammer
- 7) Windsor Probe
- 8) เครื่องคอมพิวเตอร์
- 9) เครื่องมือเก็บตัวอย่างคอนกรีต
- 10) อุปกรณ์สำหรับช่วยวัด เช่น ตลับเมตร ไม้บรรทัด เป็นต้น
- 11) อุปกรณ์สำหรับการบันทึก เช่น กล้องถ่ายรูป ปากกา ดินสอ เป็นต้น

วิธีการ

การดำเนินการวิจัยเพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยคาร์บอน มีการแบ่งขั้นตอนเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

- 1) ทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา
- 2) การทดสอบภาคสนามเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพาน
- 3) ประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานก่อนการเสริมกำลังตามมาตรฐาน LRFR
- 4) การออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างส่วนพื้นสะพานด้วยวัสดุ CFRP
- 5) การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างสะพาน
- 6) การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพาน
- 7) การเปรียบเทียบผลการทดสอบโครงสร้างสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองโครงสร้างสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา

การทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา มีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลที่มีการศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุ CFRP รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประเมินกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก และการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. การทดสอบภาคสนามเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพาน

การทดสอบภาคสนามเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพานได้ทำการทดสอบสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กมีทั้งสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Slab Type) และสะพานแบบแผ่นพื้นสำเร็จรูประบบคานหลายตัววางเรียงเป็นแผ่นพื้น (Multi Beam Box Girder Bridge) ในการดำเนินงานแบ่งการทดสอบดังนี้

2.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

วิธีการที่จะทราบถึงความแข็งแรงของคอนกรีตจากโครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) การทดสอบแบบทำลาย 2) การทดสอบแบบไม่ทำลาย และ 3) การทดสอบแบบกึ่งทำลาย

2.1.1 การทดสอบแบบทำลายทำได้โดยการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างซึ่งตัวอย่างที่เจาะเก็บมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว สำหรับตำแหน่งในการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตกรณีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กดำเนินการในตำแหน่งที่สะดวกต่อการเจาะ ซึ่งอยู่ใกล้กับทางเดินเพื่อไม่เป็นการกีดขวางการจราจรและในช่วงที่เจาะเก็บตัวอย่างจะต้องหลีกเลี่ยงตำแหน่งที่มีการเสริมเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 23 กรณีพื้นสะพานเป็นระบบคอนกรีตอัดแรง ตำแหน่งในการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจะเจาะเก็บในตำแหน่งคานขวางแทนพื้นเพื่อหลีกเลี่ยงตำแหน่งลวดอัดแรงบริเวณพื้นสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 24 เมื่อได้ตัวอย่างคอนกรีตจากการเจาะเก็บจากโครงสร้างทั้งในตำแหน่งพื้นสะพานและคานขวางแล้วนำไปทดสอบหาลังอัด (Compressive Strength) ในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน ASTM C39 - 93a ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 23 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตตำแหน่งพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

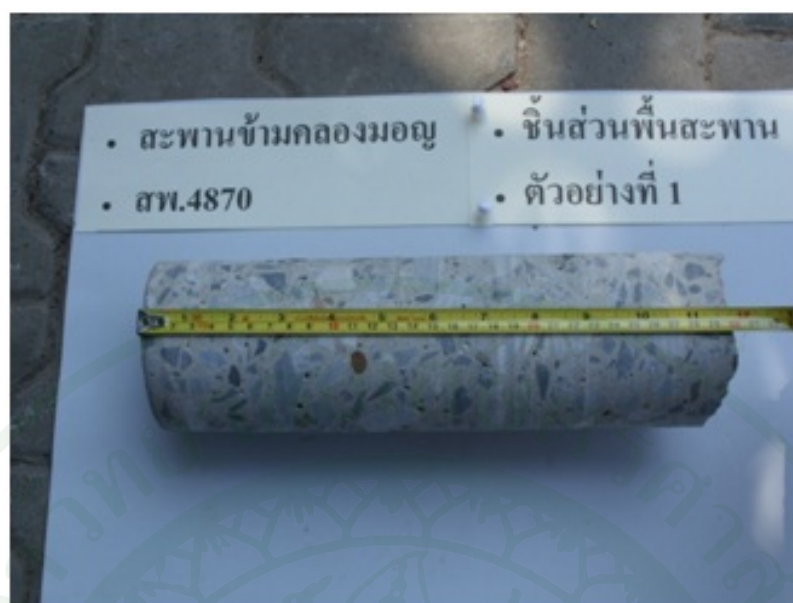


ภาพที่ 24 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตตำแหน่งกานขวาง



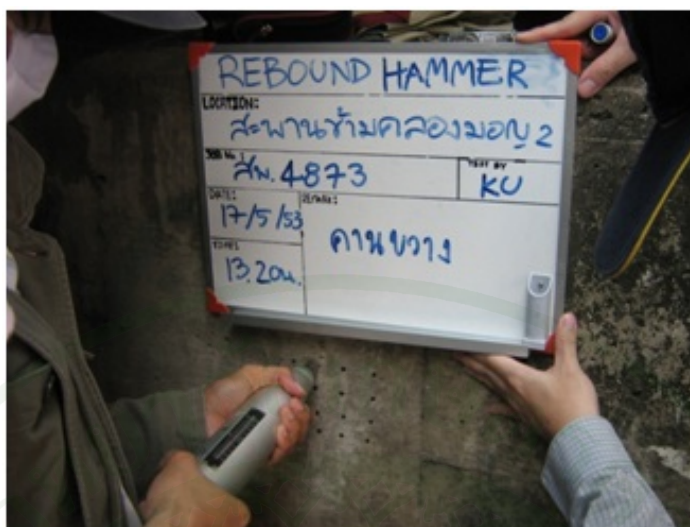
ภาพที่ 25 การทดสอบหาค่าลึงอัด (Compressive Strength) ในห้องปฏิบัติการ

ก่อนที่จะทำการทดสอบหาค่าลึงอัดจากจากห้องปฏิบัติการตัวอย่างคอนกรีตจะต้องได้รับการวัดขนาดความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเพื่อนำไปคำนวณหาค่าลึงอัดของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การวัดขนาดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเก็บ (Core Drilling) ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัด

2.1.2 การทดสอบแบบไม่ทำลายได้มีการทดสอบโดยวิธีการวัดค่าการสะท้อนด้วยค้อนกระทบ (Rebound Hammer) หลักการทำงานของวิธีการตรวจสอบในสนาม มีดังนี้ คือเตรียมค้อนกระทบให้อยู่ในสภาวะพร้อมทดสอบ หลังจากนั้นกดเครื่องมือตั้งฉากกับผิวคอนกรีต อ่านค่าสะท้อนกลับจากเครื่องมือ ภายหลังจากได้ค่าสะท้อนแล้วให้นำค่าสะท้อนที่ได้กลับไปเปรียบเทียบกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับกับค่ากำลังอัดคอนกรีต ข้อดีของการใช้ค้อนกระทบคือเป็นวิธีที่ง่าย และทำได้รวดเร็วสำหรับการทดสอบกำลังของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย แต่การทดสอบด้วยวิธีนี้จะได้ผลการทดสอบที่ไม่ค่อยแม่นยำ เนื่องจากคอนกรีตมีส่วนประกอบของ หิน ปูน และทราย และการวัดค่าการสะท้อนเป็นการวัดคุณสมบัติของจุดเล็กๆ บนผิวคอนกรีต ดังนั้นหากการทดสอบตรงจุดที่มีหินอยู่จะทำให้ได้ค่าสะท้อนกลับสูงและหากว่าตำแหน่งทดสอบบริเวณเดียวกันเป็นตำแหน่งทรายจะได้ค่าสะท้อนกลับที่ต่ำลง ด้วยเหตุนี้การวัดค่าสะท้อนกลับวัดค่าอย่างน้อย 16 ครั้ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ตัวอย่างการทดสอบแสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การทดสอบโดยวิธีการวัดค่าการสะท้อนด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer)

2.1.3 การทดสอบแบบกึ่งทำลายได้มีการทดสอบโดยวิธีการวัดกำลังต้านทานการทะลวง ส่วนมากจะใช้ Windsor Probe ยิ่งเข็มเหล็กกำลังสูงเข้าไปในเนื้อคอนกรีต รูปอุปกรณ์ทดสอบการวัดกำลังต้านทานการทะลวงแสดงดังภาพที่ 28 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของโครงสร้างแต่ละชุดจะทำการวัดอย่างน้อย 3 จุด โดยจะต้องวางตำแหน่งและทิศทางของ Windsor Probe ให้ตั้งฉากกับผิวโครงสร้างที่จะทำการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 29 เป็นการทดสอบตำแหน่งพื้นสะพาน และภาพที่ 30 เป็นการทดสอบตำแหน่งคานขวาง



ภาพที่ 28 อุปกรณ์ทดสอบการวัดกำลังต้านทานการทะลวง (Windsor Probe)



ภาพที่ 29 การทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตในสนามด้วยการวัดกำลังต้านทานการทะลวง ณ ตำแหน่งพื้นสะพาน



ภาพที่ 30 การทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตในสนามด้วยการวัดกำลังต้านทานการทะลวง ณ ตำแหน่งคานขวาง

การหาค่ากำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบโดยวิธีการวัดกำลังต้านทานการทะลวงจะทำได้โดยการวัดความยาวของเข็ม (Probe) ที่โผล่พ้นจากผิวคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 31 เมื่อทราบความยาวของเข็มที่โผล่จากผิวคอนกรีตแล้วนำไปแปลงเป็นกำลังอัดคอนกรีตด้วยเส้นกราฟเปรียบเทียบจากผู้ผลิต การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 803 (CRD-C59)



ภาพที่ 31 การวัดความยาวของเข็ม (Probe) ที่พ้นจากผิวหน้าของคอนกรีต

2.2 การทดสอบหาค่าลึงครากของเหล็กเสริม (Yield Strength)

การหาค่าลึงครากของเหล็กเสริมเป็นการทดสอบเหล็กเสริมซึ่งต้องการทราบถึงค่าลึงครากของเหล็กเสริมที่แท้จริง เพื่อให้มีความมั่นใจว่าค่าลึงครากของเหล็กเสริมที่มีอยู่เดิมนั้นไม่ต่ำกว่าค่าลึงครากของเหล็กเสริมที่ใช้ในการคำนวณการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของพื้นสะพานและการคำนวณออกแบบเสริมกำลังพื้นสะพาน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ระบุตำแหน่งของโครงสร้างที่ต้องเก็บตัวอย่างเหล็กเสริมคือราวสะพานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 32 เกรดของเหล็กเสริมที่ระบุคือเกรด SD30 ซึ่งต้องมีค่าลึงครากไม่ต่ำกว่า 3,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 32 เหล็กเสริมที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโครงสร้างสะพาน

ข้อมูลการสำรวจสะพานภาคสนามสำหรับงานวิจัยเพื่อป้อนข้อมูลเบื้องต้นในการขึ้นรูปของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพาน และเพื่อทราบถึงรายละเอียดต่างๆของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Slab Type) และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Plank Girder) แสดงในตารางที่ 14 และ 15 ตามลำดับ



ตารางที่ 14 รายละเอียดและมิติของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งฝั่งซ้ายและฝั่งขวา

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความหนา พื้น สะพาน (ม.)	ความหนา พื้นทาง เท้า (ม.)	จำนวน ช่วง สะพาน	ความยาว ช่วงพาด สะพาน (ม.)	ความยาว รวมของ สะพาน (ม.)	ความ กว้าง สะพาน (ม.)	จำนวน ช่อง จราจร	จำนวน ทางเท้า	ความกว้าง ช่องทางเท้า (ม.)
1	สะพานข้ามคลองเตย	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	0.35	0.25	3	6 + 6 + 6	18	9.90	3	1	2.00
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	0.53	0.25	1	10	10	9.90	3	1	2.00
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	0.53	0.25	3	6 + 8 + 6	20	14.30	4	2	1.50

ตารางที่ 15 รายละเอียดและมิติของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความหนา พื้น สะพาน (ม.)	ความหนา พื้นทาง เท้า (ม.)	จำนวน ช่วง สะพาน	ความยาว ช่วงพาด สะพาน (ม.)	ความยาว รวมของ สะพาน (ม.)	ความ กว้าง สะพาน (ม.)	จำนวน ช่อง จราจร	จำนวน ทางเท้า	ความกว้าง ช่องทางเท้า (ม.)
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	0.40	0.25	1	10	10	14.00	4	2	1.50 & 1.00
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	0.40	0.25	9	(6.5+10+10 +10)× 2+12	85	15.00	4	2	2.00

3. การประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนการเสริมกำลัง ตามมาตรฐาน LRFR

การประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างพื้นสะพานคอนกรีตก่อนการเสริมกำลังเพื่อให้ทราบถึงความจำเป็นในงานเสริมกำลังโครงสร้างในส่วนพื้นสะพานที่รับน้ำหนักบรรทุกจรว่าสะพานใดที่ต้องการเสริมกำลัง ซึ่งระบุได้จากค่า RF หากค่า RF มีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่าโครงสร้างที่พิจารณาไม่มีความปลอดภัยในการใช้งาน และหากค่า RF มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่าโครงสร้างที่พิจารณามีความปลอดภัยในการใช้งาน สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการประเมินค่า RF ของสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างพื้น 2 แบบคือ สะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กมีจำนวน 10 สะพาน และสะพานที่มีแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน มีจำนวน 2 สะพาน

แบบจำลองรถบรรทุกที่นำมาใช้ในการประเมินคือ รถบรรทุกขนาด 1.3 เท่าของ HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO มีจำนวน 3 เพลา ซึ่งเพลาด้านหน้ามีน้ำหนัก 8 กิโลปอนด์ (3,629 กิโลกรัม) ส่วนเพลากลางและเพลาด้านหลังมีน้ำหนัก 32 กิโลปอนด์ (14,515 กิโลกรัม) เท่ากัน โดยมีระยะห่างจากเพลาน้ำถึงเพลากลาง 14 ฟุต (4.27 เมตร) และระยะห่างจากเพลากลางถึงเพลาลัง 14 ฟุต (4.27 เมตร) ถึง 30 ฟุต (9.14 เมตร) สำหรับระยะห่างจากเพลากลางถึงเพลาลังที่มีระยะที่แปรผัน เพื่อให้ปรับระยะเพลาลังให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดหรือแรงเฉือนที่มีค่าสูงที่สุด

4. การออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างส่วนพื้นสะพานด้วย CFRP

การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) ประเภท Fiber Reinforced Plastic (FRP) ในปัจจุบันเป็นที่รู้จักและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศเนื่องจากเป็นวัสดุเสริมกำลังที่มีน้ำหนักเบาแต่มีกำลังรับแรงดึงสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเสริมกำลังประเภทอื่น ทั้งยังใช้เวลาในการติดตั้งน้อย ดังนั้นวัสดุ FRP จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับเป็นวัสดุในการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน เนื่องจากไม่ต้องการปิดการใช้งานสะพานเพื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน

การออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุ FRP ได้อาศัยวิธีการออกแบบที่เสนอโดย มาตรฐาน ACI ของประเทศสหรัฐอเมริกา (ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures) โดยมีขั้นตอนการออกแบบคล้ายคลึงกับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพียงแต่มีการเพิ่ม

คุณสมบัติของวัสดุ FRP และสภาพการใช้งานของโครงสร้างที่พิจารณา การวิเคราะห์และออกแบบ มีข้อพิจารณาดังต่อไปนี้

ขีดจำกัดการเสริมกำลัง (Strengthening Limits) เป็นข้อกำหนดเพื่อเป็นการป้องกันการพังทลายของโครงสร้างที่มีการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP ซึ่งมีการพิจารณาจากสมการที่ 8 กล่าวคือ กำลังต้านทานของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผูกกับตัวประกอบความต้านทานแล้วต้องมียกมาหรือเท่ากับ 1.1 เท่าของผลจากน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับ 0.75 เท่าของผลจากน้ำหนักบรรทุกจรที่ได้มีการเพิ่มน้ำหนักเดิมจากการใช้งาน

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{new} \quad (8)$$

เมื่อ $(\phi R_n)_{existing}$ คือ กำลังต้านทานของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผูกกับตัวประกอบความต้านทานแล้ว

S_{DL} คือ ผลจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

S_{LL} คือ ผลจากน้ำหนักบรรทุกจร

การลดกำลังของระบบการเสริมกำลัง FRP จากสภาพแวดล้อมจากมาตรฐาน ACI ได้มีการแนะนำให้ใช้ตัวประกอบลดกำลังของระบบ FRP ที่มีผลจากสภาพแวดล้อม (Environmental Reduction Factor for FRP Systems, C_E) โดยมีการจำแนกสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันและประเภทของเส้นใยที่มีลักษณะที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ตัวประกอบค่าลดกำลังของระบบ FRP ที่มีผลจากสภาพแวดล้อม

Exposure Conditions	Fiber Type	Environmental Reduction
		Factor, C_E
Interior Exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior Exposure	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive Environment	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

ที่มา: ACI 440.2R-08 (2008)

คุณสมบัติของวัสดุในการออกแบบ สำหรับการออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย (Ultimate Tensile Strength) มาตรฐาน ACI 440.2R-08 ได้มีการแนะนำให้ใช้สมการลดกำลังของคุณสมบัติ FRP โดยลดค่ากำลังดึงประลัยออกแบบของ FRP (Design Ultimate Tensile Strength of FRP) และ ค่าความเครียดแตกหักออกแบบของ FRP (Design Rupture Strain of FRP) จากสภาพแวดล้อมของ โครงสร้างที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP พิจารณาจากสมการที่ 9 และ 10

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (9)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (10)$$

เมื่อ f_{fu} คือ หน่วยแรงดึงประลัยออกแบบของ FRP

f_{fu}^* คือ หน่วยแรงดึงประลัยของ FRP ที่ผู้ผลิตระบุ

ε_{fu} คือ ความเครียดแตกหักออกแบบของ FRP

ε_{fu}^* คือ ความเครียดแตกหักของ FRP ที่ผู้ผลิตระบุ

C_E คือ ตัวประกอบลดกำลังของระบบ FRP ที่มีผลจากสภาพแวดล้อม

การออกแบบเสริมกำลังสะพานด้วยวัสดุเสริมเส้นใยภายนอก FRP สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงดัด (Flexural Strengthening) จากพื้นสะพานซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

สถานะของคอนกรีตของโครงสร้างสำหรับการเสริมกำลังต้านทานแรงดัดได้มีข้อสมมุติฐานจากมาตรฐาน ACI 440.2R-08 กล่าวว่า หน้าตัดของคอนกรีตในขณะที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP จะอยู่ในสถานะหน้าตัดแตกร้าว (Cracked Section) และน้ำหนักที่นำมาคำนวณในสมการเพื่อหาค่าความเครียดขณะติดตั้งมีเพียงผลจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ แสดงดังสมการที่ 11

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} \quad (11)$$

เมื่อ M_{DL} คือ โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

ε_{bi} คือ ความเครียดของคอนกรีตขณะติดตั้ง FRP

d_f คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP

d คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

I_{cr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแตกร้าว

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ค่าความเครียดสำหรับการออกแบบของ FRP เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการคำนวณออกแบบในสถานะจำกัดด้านกำลัง (Ultimate Limit State) เนื่องจากวัสดุ FRP มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นจนถึงจุดวิบัติ ดังนั้นค่าความเครียดของ FRP จึงเป็นค่าควบคุมสำหรับการออกแบบการเสริมกำลังด้วย FRP ดังแสดงในสมการที่ 12 กล่าวคือ ความเครียดประสิทธิผลของ FRP (ε_{fe}) ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความเครียดของการยึดเหนี่ยวจากระบบเสริมกำลังด้วย FRP (ε_{fd})

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (12)$$

โดยที่

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.90 \varepsilon_{fu} \quad \text{สำหรับหน่วย SI}$$

(13)

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.90 \varepsilon_{fu} \quad \text{สำหรับหน่วย นิ้ว - ปอนด์}$$

เมื่อ ε_{fe} คือ ความเครียดประสิทธิผลของ FRP

ε_{cu} คือ ความเครียดประลัยของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 0.003

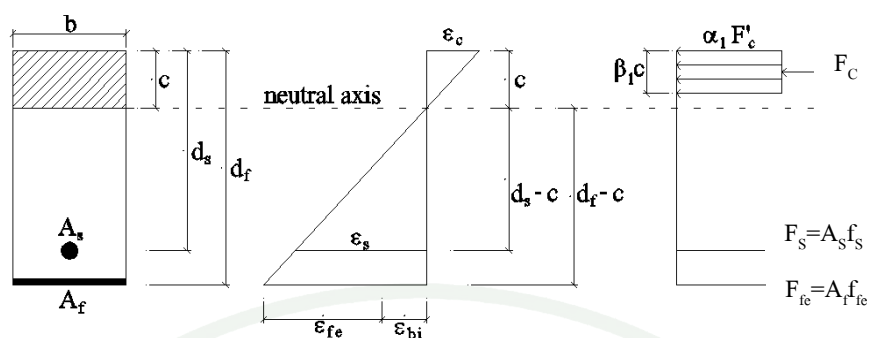
ε_{fd} คือ ความเครียดของการยึดเหนี่ยวจากระบบเสริมกำลังด้วย FRP

n คือ จำนวนชั้นของการเสริมกำลังด้วย FRP

E_f คือ โมดูลัสแรงดึงของวัสดุ FRP

t_f คือ ความหนาของวัสดุ FRP ต่อ 1 แผ่น

เนื่องจากการออกแบบเสริมกำลัง โครงสร้างด้วยวัสดุ FRP ได้ยอมให้เกิดการวิบัติโดยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP Failure Control) ดังนั้นค่าความเครียดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าความเครียดประลัย (ε_{cu}) เนื่องจากเมื่อโครงสร้างที่ได้มีการเสริมกำลังด้วย FRP เริ่มเกิดการวิบัติ วัสดุ FRP จะต้องวิบัติก่อนที่คอนกรีตจะแตกร้าว (Concrete Crushing) การคำนวณหาค่าความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมในสภาวะนี้ได้สามารถคำนวณได้จากสามเหลี่ยมคล้ายของแผนภาพความเครียด (Strain Diagram) แสดงดังภาพที่ 33 และแสดงอยู่ในรูปของสมการที่ 14 และสมการที่ 15 ตามลำดับ



หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การกระจายความเครียดของหน้าตัดคาน

การกระจายหน่วยแรงของหน้าตัดคาน

คสล.ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP

คสล.ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP

ภาพที่ 33 การกระจายหน่วยแรงของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังภายนอกโดยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

สำหรับการหาค่า c (Depth of the Neutral Axis) ในช่วงแรกให้สมมติค่าโดยทางมาตรฐาน ACI แนะนำให้ประมาณค่า $c = 0.20d$ แล้วค่อยมาปรับค่า c โดยวิธีสมดุลของหน้าตัด

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (14)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d_s - c}{d_f - c} \right) \quad (15)$$

เมื่อ ε_c คือ ค่าความเครียดของคอนกรีต

ε_s คือ ค่าความเครียดของเหล็กเสริม

c คือ ระยะจากผิวบนหน้าตัดคอนกรีตถึงแกนสะเทิน

ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ของ FRP สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด (Stress - Strain Relationship) จากวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย FRP และในทำนองเดียวกัน การคำนวณค่าหน่วยแรงของเหล็กเสริมสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมโดยที่หน่วยแรงของเหล็กต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าหน่วยแรงครากเหล็กเสริม แสดงดังสมการที่ 16 และ 17

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (16)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (17)$$

เมื่อ f_{fe} คือ หน่วยแรงประสิทธิผลของ FRP

f_s คือ หน่วยแรงของเหล็กเสริม

f_y คือ หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม

คำนวณหาแรงภายในและตรวจสอบหน่วยแรงสมดุลของหน้าตัดที่ได้จากการสมมติค่า c ได้จากสมการที่ 18

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (18)$$

การกำหนดรูปแบบการวิบัติเป็นคอนกรีตแตกร้าวก่อนเหล็กเสริมคราก ค่า β_1 และ α_1 คำนวณได้บล็อกลูกหน่วยแรงของคอนกรีตเทียบเท่าจากทฤษฎีของ Whitney (Whitney Stress Block) โดยที่ α_1 เท่ากับ 0.85 และ β_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับ f'_c มีค่าระหว่าง 2,500 ถึง 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับ f'_c ที่มีค่ามากกว่า 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วค่า β_1 จะลดลงเป็นสัดส่วน ซึ่งจะลดทุก 0.05 เมื่อ f'_c เพิ่มขึ้น 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

การกำหนดรูปแบบการวิบัติที่เกิดจาก FRP ค่า β_1 และ α_1 คำนวณได้จากสมการที่ 19 และสมการที่ 20

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c^2} \quad (20)$$

โดยที่ค่า ε'_c มีค่าประมาณ 0.002 หรือคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$\varepsilon'_c = \frac{1.7 f'_c}{E_c} \quad (21)$$

การคำนวณค่ากำลังต้านทานโมเมนต์คัตของหน้าตัดคานที่เสริมกำลังภายนอกด้วย FRP พิจารณาจากการกระจายหน่วยแรงของหน้าตัดคานแสดงดังภาพที่ 33 และแสดงอยู่ในรูปของ สมการที่ 22

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + \psi_f M_{nf}) \geq M_u \quad (22)$$

โดยที่

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d_s - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (23)$$

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (24)$$

เมื่อ M_{ns} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์คัตจากเหล็กเสริม

M_{nf} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์คัตจาก FRP

M_u คือ โมเมนต์คัตประลัย

ϕ คือ ตัวประกอบลดกำลังของโครงสร้างรับแรงคัตมีค่าเท่ากับ 0.90

ψ_f คือ ตัวประกอบลดกำลังของ FRP สำหรับเสริมกำลังโมเมนต์คัตมีค่าเท่ากับ

0.85

การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานส่วนพื้นด้วย CFRP สำหรับงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งโดยวิธีแบบ ขึ้นรูปเปียก (Wet Lay Up) โดยที่ลักษณะของแผ่น CFRP นี้เป็นแบบแผ่นบางมีคุณสมบัติดังตารางที่

ตารางที่ 17 คุณสมบัติ CFRP ชนิดแผ่นบาง

ข้อมูลทางเทคนิค		หน่วย
Elastic Modulus	240	kN/mm ²
Tensile Strength	3,800	N/mm ²
Fibre Weight (Main Direction)	300	g/m ²
Weight per Unit Area of Sheet	330	g/m ²
Density	1.7	g/cm ³
Elongation at Rupture	1.55	%
Thickness	0.176	mm
Width	300	mm

ที่มา: บริษัท Pentagram International จำกัด (2006)

5. การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน

การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทดสอบแบบวิธี Diagnostic Load Test ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง เช่น การโก่งตัวและความเครียดของโครงสร้าง สำหรับการวางตำแหน่งรถบรรทุกในการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต ได้กำหนดไว้ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ ชิดขอบแต่ละด้านเพื่อดูผลของทางเท้าและราวกันตกที่มีต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพาน และที่ตำแหน่งวิกฤติกลางสะพาน การวางตำแหน่งล้อรถบรรทุกได้กำหนดระยะตามมาตรฐาน AASHTO คือ ระยะระหว่างขอบทางเดินหรือขอบกันตกถึงกึ่งกลางของล้อรถบรรทุกเพลาลัง เท่ากับ 60 cm และระยะห่างระหว่างกึ่งกลางล้อรถบรรทุกที่อยู่ติดกันมีระยะห่างไม่ต่ำกว่า 120 cm สำหรับระยะหยุดรถตามความยาวสะพานมีอยู่ 3 ตำแหน่ง คือ 1/4 1/2 และ 3/4 ของความยาวช่วงพาดสะพาน 2) การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต เป็นการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างสะพานส่วนพื้นที่เกิดจากน้ำหนักของรถบรรทุกเคลื่อนที่เป็นน้ำหนักกระดานไปและกลับด้วยความเร็วคงที่คือ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่ไม่ต้องพิจารณาผลจากแรงกระแทก ความเร็ว 30 และความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่รถบรรทุกทดสอบจำนวน 2 คันวิ่งได้อย่างปลอดภัยบนสะพาน

สำหรับตัวอย่างในการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ สะพานข้ามคลองสะพานยาวซึ่งมีจำนวนสะพานอยู่ 2 แห่ง คือ แห่งซ้าย (ฝั่งไปบางพลัด) ใช้สัญลักษณ์แทนคือ ฝั่ง LT และฝั่งขวา (ฝั่งไปสะพานพระราม 7) ใช้สัญลักษณ์แทนคือ ฝั่ง RT แสดงดังภาพที่ 34 และ 35 ตามลำดับ โดยมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 18



ภาพที่ 34 โครงสร้างส่วนบนของสะพานข้ามคลองสะพานยาว



ภาพที่ 35 โครงสร้างส่วนล่างของสะพานข้ามคลองสะพานยาว

ตารางที่ 18 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุของสะพานข้ามคลองสะพานยาว

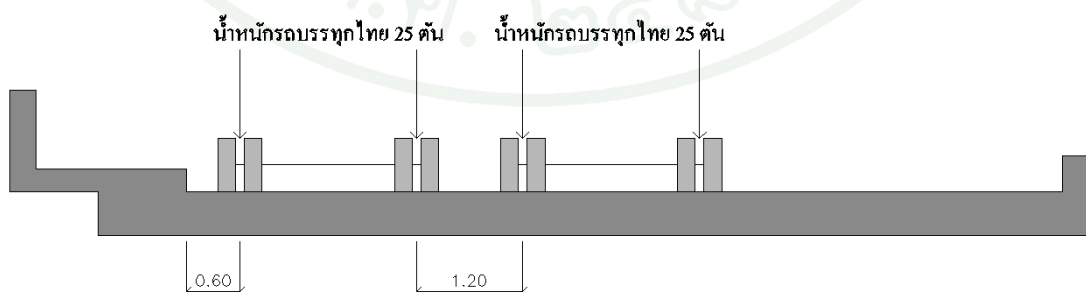
ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุ	ขนาด	หน่วย	หมายเหตุ
ความยาวช่วงพาดสะพาน	10.00	ม.	
ความกว้างพื้นสะพาน	9.90	ม.	
จำนวนช่องจราจร	3	ช่อง	
ความหนาพื้นสะพาน	53.00	ซม.	
ความกว้างช่องทางเท้า	2.00	ม.	
ความหนาทางเท้า	25	ซม.	
กำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก	334	กก./ซม. ²	
กำลังรากลของเหล็กเสริม เกรด SD 30	3,937	กก./ซม. ²	
Condition Rating ฝั่ง LT	4	-	
Condition Rating ฝั่ง RT	5	-	
Rating Factor ฝั่ง LT (Inventory)	0.78	-	
Rating Factor ฝั่ง RT (Inventory)	0.94	-	

อุปกรณ์ตรวจวัดติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างสะพานมีหน้าที่สำหรับตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้าง เช่น การโก่งตัวของโครงสร้างการยืดหดตัวของโครงสร้าง (Elongation) มาเป็นค่าในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งไปยังอุปกรณ์แปลงผลเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลพฤติกรรมมีดังนี้ Strain Gauge สำหรับตรวจวัดความเครียด, Accelerometer สำหรับตรวจวัดค่าความเร่งจากการสั่นไหวของพื้นสะพาน, Displacement Transducer สำหรับตรวจวัดการโก่งตัวของโครงสร้าง, Data Logger สำหรับรวมสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัด และคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 36

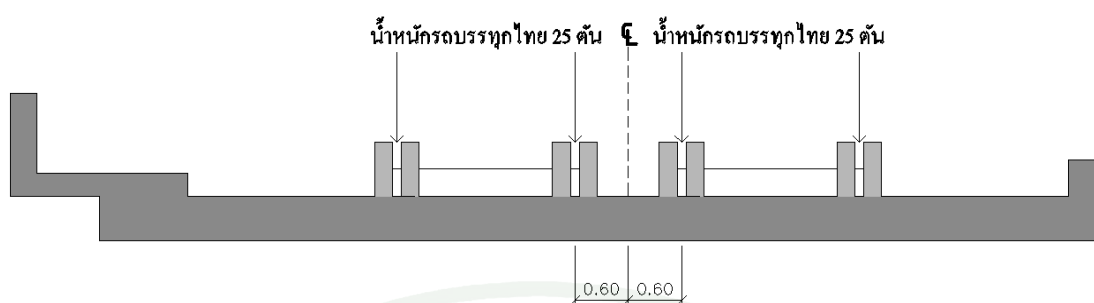


ภาพที่ 36 อุปกรณ์ Data Logger

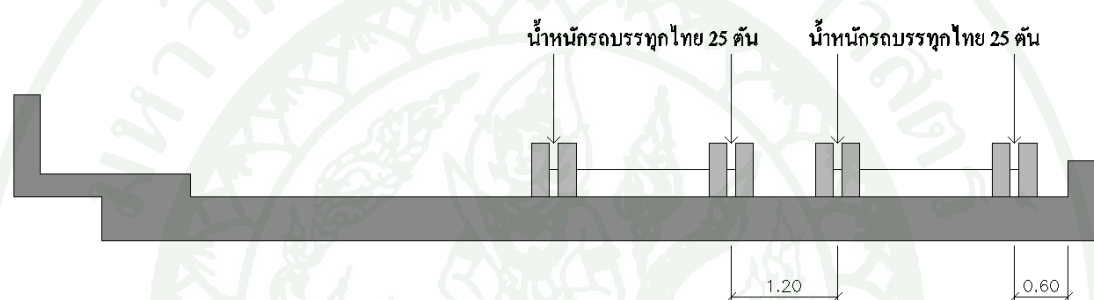
การวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกในที่นี่ได้กำหนดไว้ 3 แบบด้วยกันคือ 1) วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดทางเดิน 2) วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน 3) วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตลิ่ง สำหรับการวางตำแหน่งล้อบรรทุกได้กำหนดระยะตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2007) คือ ระยะระหว่างขอบทางเดินหรือขอบกันตลิ่งถึงกึ่งกลางล้อบรรทุกเพลาลัง เท่ากับ 60 เซนติเมตร และตำแหน่งระยะห่างระหว่างรถบรรทุกคือกึ่งกลางล้อบรรทุกถึงกึ่งกลางล้อบรรทุกอีกคันมีระยะไม่ต่ำกว่า 1.20 เมตร แสดงดังภาพที่ 37 ถึง 39 ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบจะใช้น้ำหนักบรรทุกไทยที่มีน้ำหนักรวมทั้งหมดยประมาณ 25 ตัน



ภาพที่ 37 รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดทางเดิน

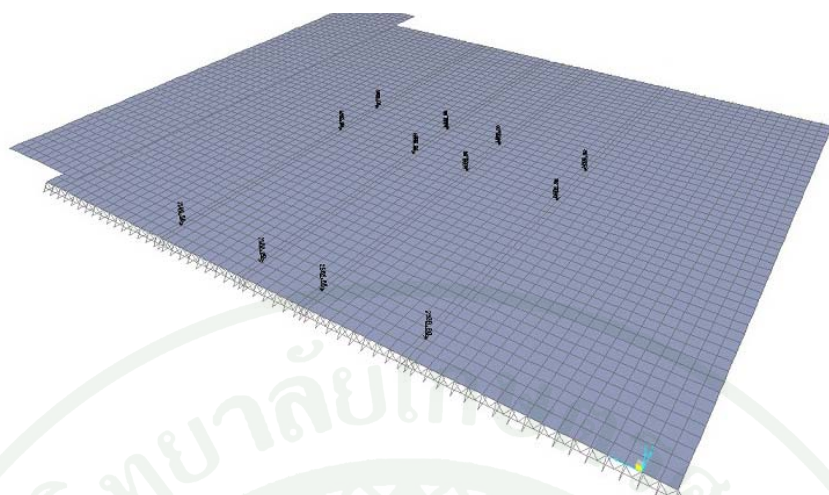


ภาพที่ 38 รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน



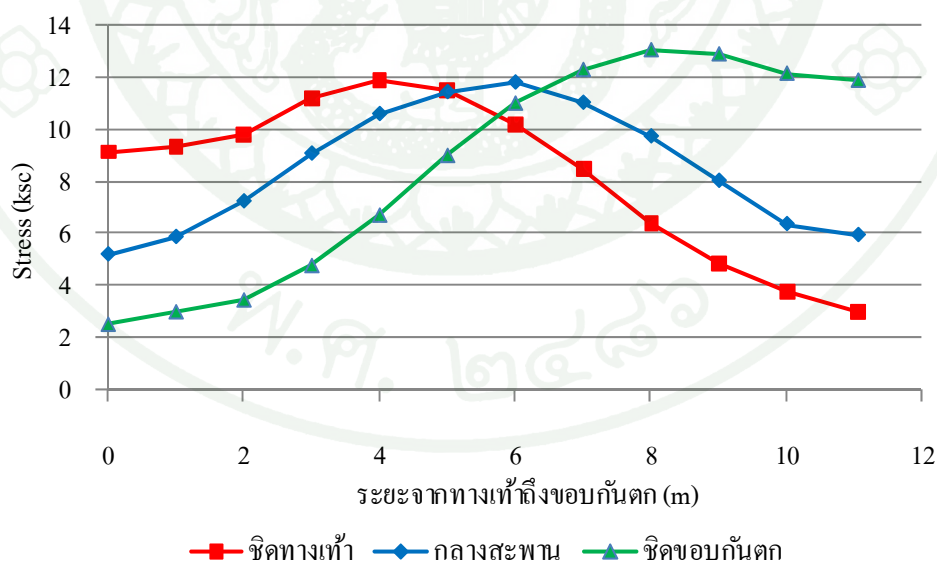
ภาพที่ 39 รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกันตก

การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมต่างๆของโครงสร้างสะพาน พิจารณาจากค่าความเครียดสูงสุด ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ได้จากการจำลองโครงสร้างสะพานโดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากการสำรวจขนาดหน้าตัดต่างๆของโครงสร้างอย่างง่ายด้วยโปรแกรม SAP2000 แล้วทำการวางตำแหน่งรถบรรทุกไทยที่มีน้ำหนัก 25 ตัน ทั้ง 3 รูปแบบดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ คือ วางตำแหน่งรถบรรทุกชิดทางเดิน กลางสะพาน และชิดขอบกันตก แสดงดังภาพที่ 40

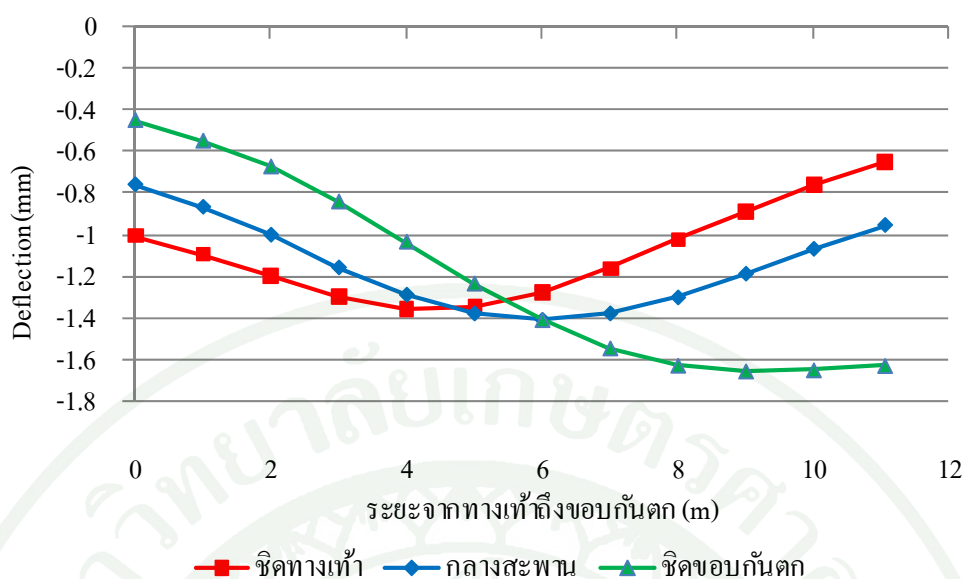


ภาพที่ 40 การวางตำแหน่งรถบรรทุกไทยน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 2 คัน ที่ตำแหน่งกลางสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างแบบพื้นด้วยโปรแกรม SAP 2000 นำมาพล็อตค่าความเครียดและค่าการโก่งตัวตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว L/2 เพื่อมาพิจารณาตำแหน่งสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด แสดงดังภาพที่ 41 และ 42

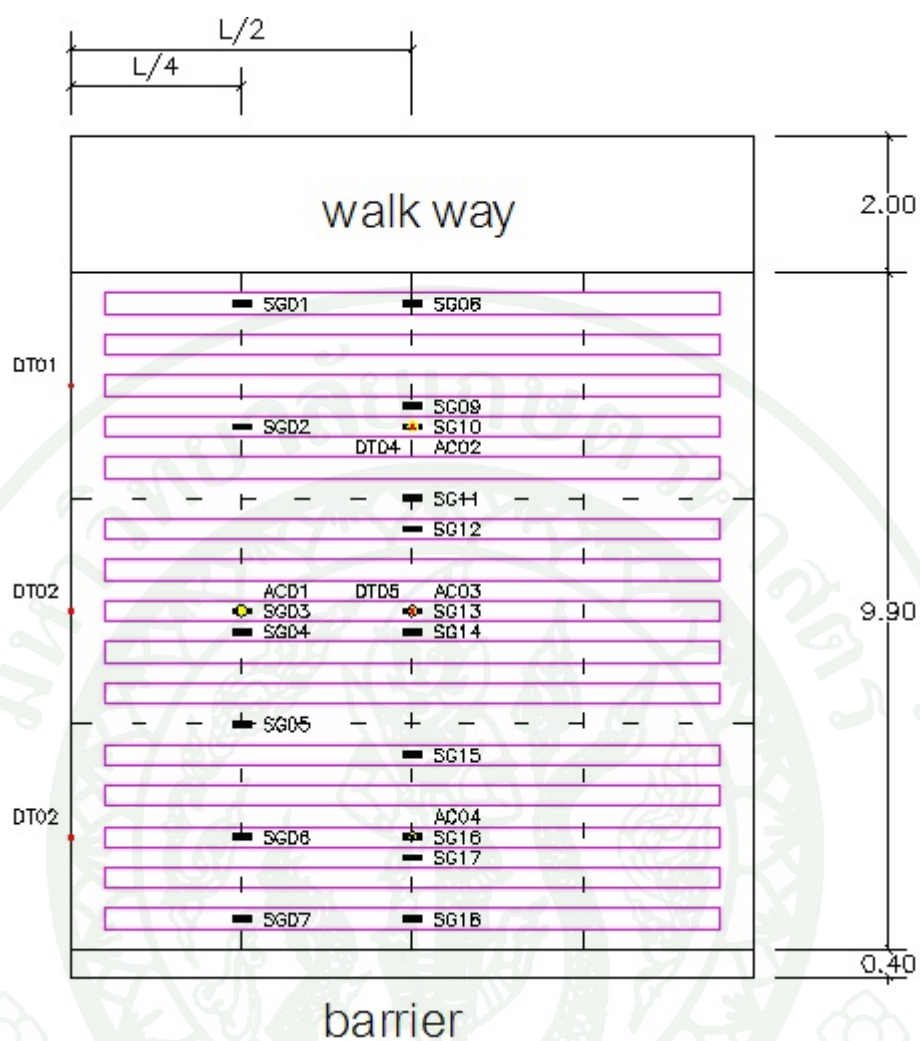


ภาพที่ 41 ความเครียดตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว L/2 ของความยาวช่วงพาดสะพาน

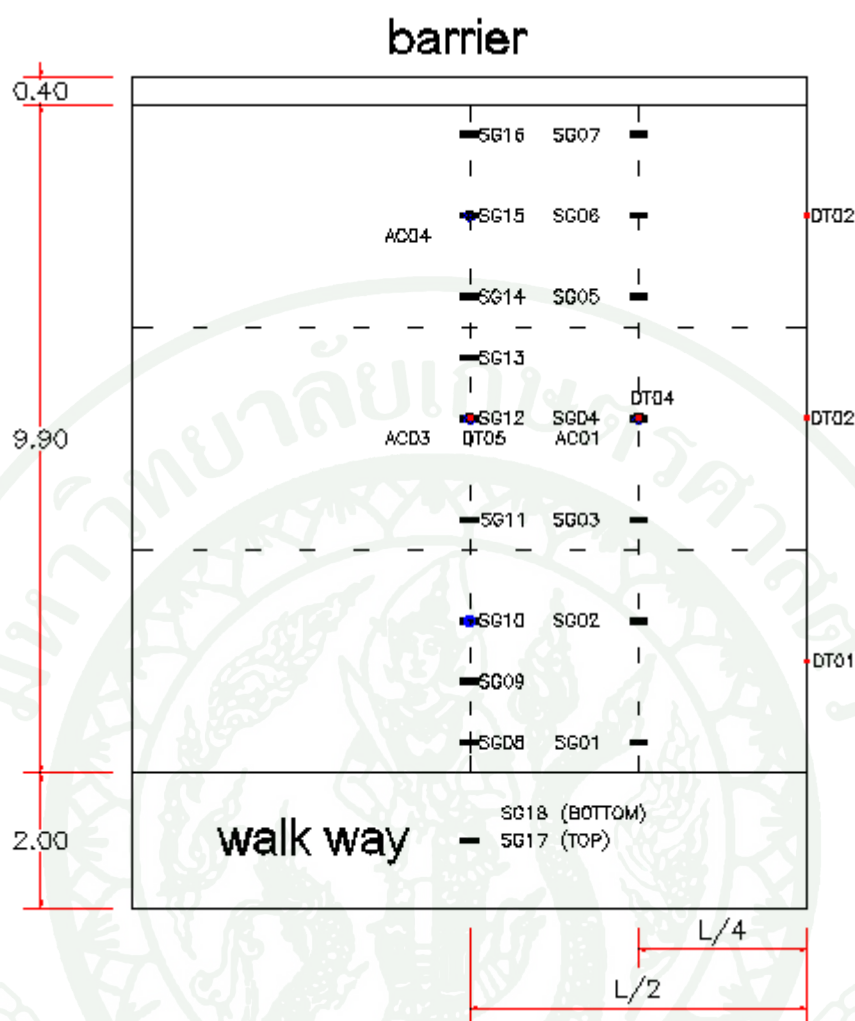


ภาพที่ 42 การโค้งตัวตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่ความยาว $L/2$ ของความยาวช่วงพาดสะพาน

จากผลการวิเคราะห์การวางน้ำหนักบรรทุกในแต่ละตำแหน่งบนโครงสร้างส่วนพื้นสะพานโดยวิธีการจำลองโครงสร้างสะพานเบื้องต้นสามารถกำหนดตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ดังภาพที่ 43 และ 44 ซึ่งแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ตามลำดับ ในภาพแสดงอักษรย่อแทนอุปกรณ์ตรวจวัดดังนี้ SG หมายถึง Strain Gauge, DT หมายถึง Displacement Transducer และ AC หมายถึง Accelerometer



ภาพที่ 43 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดได้พื้น โครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP



ภาพที่ 44 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดได้พื้นโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

รายละเอียดของตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับสะพานที่มีโครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 19 สำหรับอุปกรณ์วัดความเครียดที่ไม่ได้แสดงในตารางเป็นตำแหน่งของการติดตั้งเพื่อให้เป็นแนวโน้มของการกระจายตัวของความเครียดตามทิศทางขวางการจราจร

ตารางที่ 19 รายละเอียดของตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับสะพานแบบ Slab Type ที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาดของสะพานสำหรับสะพานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

อุปกรณ์ตรวจวัด	ตำแหน่งติดตั้ง	รายละเอียดการติดตั้ง	สัญลักษณ์
Strain Gauge	ระยะห่างจากทางเท้า 0.45 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจากการวางตำแหน่งรอบบรรทุกตำแหน่งชิดทางเท้า	SG08
	ระยะห่างจากทางเท้า 4.95 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจากการวางตำแหน่งรอบบรรทุกตำแหน่งกลางสะพาน	SG13
	ระยะห่างจากขอบกันตก 0.45 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจากการวางตำแหน่งรอบบรรทุกตำแหน่งชิดขอบกันตก	SG18
	ระยะห่างจากทางเท้า 4.95 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวจากการวางตำแหน่งรอบบรรทุกตำแหน่งกลางสะพาน	DT05
	ระยะห่างจากทางเท้า 2.25 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดจากการวางตำแหน่งรอบบรรทุกตำแหน่งชิดทางเท้า	DT04
Displacement Transducer	ระยะห่างจากทางเท้า 2.25 เมตร	สำหรับวัดความเร่งของโครงสร้างสะพานตามแนวดิ่งในแต่ละช่องการจราจร	AC02, AC03 และ AC04
Accelerometer	ระยะห่างจากทางเท้า 2.25 เมตร 4.95 เมตร และ 8.25 เมตร		

สำหรับตัวอย่างในการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน คือ สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามซึ่งมีทางเท้าอยู่ 2 ด้าน แตกต่างจากสะพานโครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีทางเท้าเพียงด้านเดียว แสดงดังภาพที่ 45 และภาพที่ 46 โดยมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังตารางที่



ภาพที่ 45 โครงสร้างส่วนบนของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

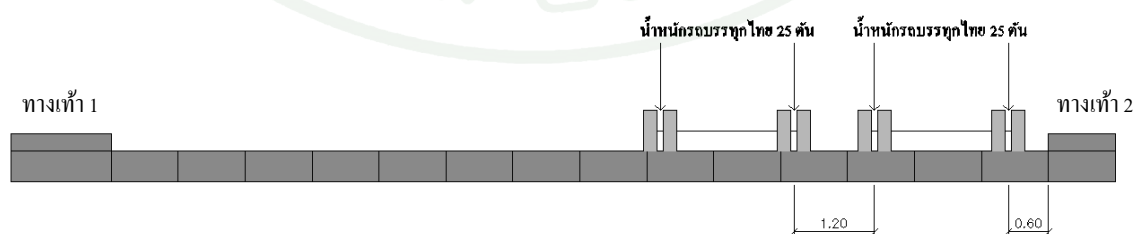


ภาพที่ 46 โครงสร้างส่วนล่างของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

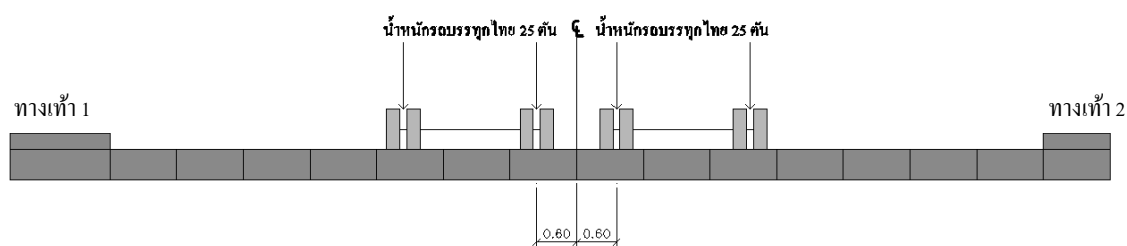
ตารางที่ 20 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติวัสดุ	ขนาด	หน่วย	หมายเหตุ
ความยาวช่วงพาดสะพาน	10.00	ม.	
ความกว้างพื้นสะพาน	14.00	ม.	
จำนวนช่องจราจร	4	ช่อง	
ความหนาแผ่นพื้นสะพานสำเร็จรูป	35	ซม.	
ความหนาคอนกรีตเทพื้นหน้า (Topping)	10	ซม.	
ความกว้างช่องทางเท้า 1	1.50	ม.	
ความกว้างช่องทางเท้า 2	1.00	ม.	
ความหนาทางเดิน	25	ซม.	
กำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก	258	กก./ซม. ²	
กำลังครากของเหล็กเสริม เกรด SD 30	2,951	กก./ซม. ²	
Condition Rating	5	-	
Rating Factor (Inventory)	0.89	-	

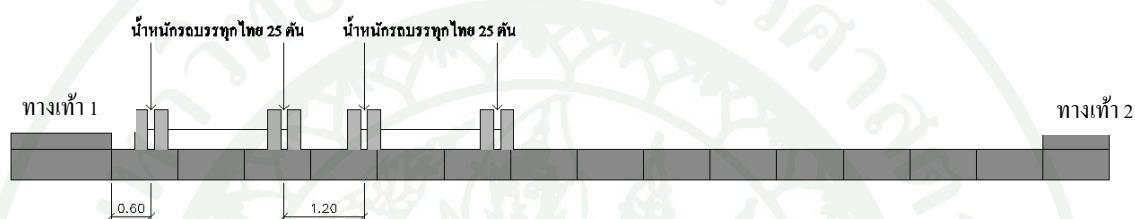
การวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกสำหรับสะพานที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน มีลักษณะการวางตำแหน่งรถบรรทุก 3 แบบเช่นเดียวกับสะพาน โครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ วางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดทางเท้าทั้งสองด้านและวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกกลางสะพาน รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกแสดงดังภาพที่ 47 ถึง 49 ตามลำดับ และน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบจะใช้น้ำหนักรถบรรทุกไทยที่มีน้ำหนักรวมทั้งหมดประมาณ 25 ตัน เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 47 รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดทางเท้า 1

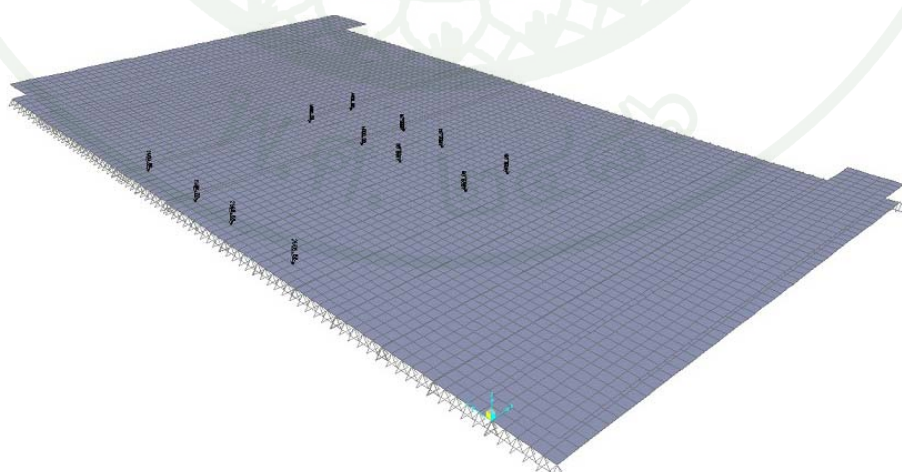


ภาพที่ 48 รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกกลางสะพาน



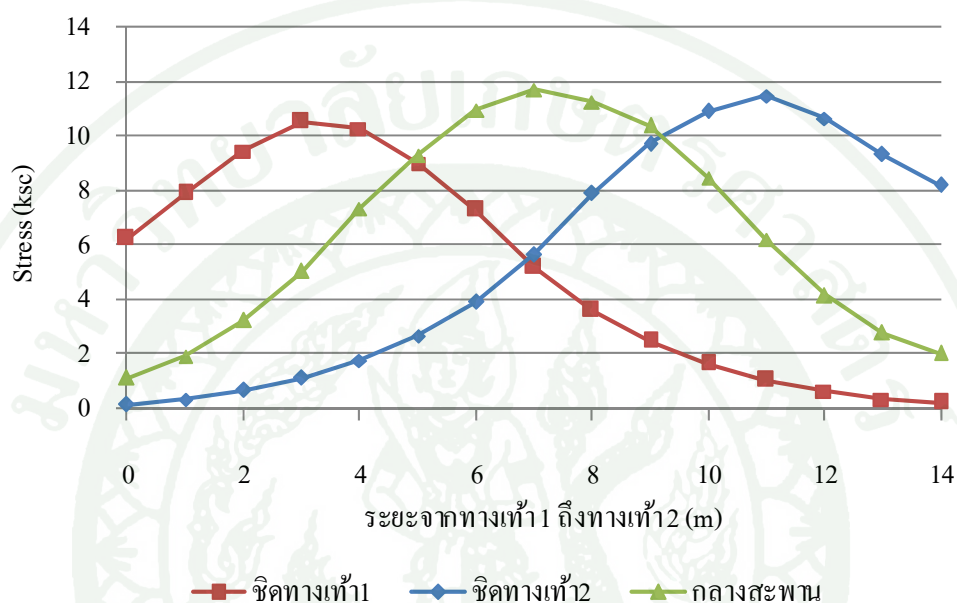
ภาพที่ 49 รูปตัดสะพานตามขวางแสดงการวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดทางเท้า 2

การกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดได้จากการจำลองโครงสร้างสะพานจากการพิจารณาผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000 เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สะพาน โครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงดังภาพที่ 50 และน้ำหนักของรถบรรทุกที่นำมาวิเคราะห์คือ รถบรรทุกไทยหนัก 25 ตัน

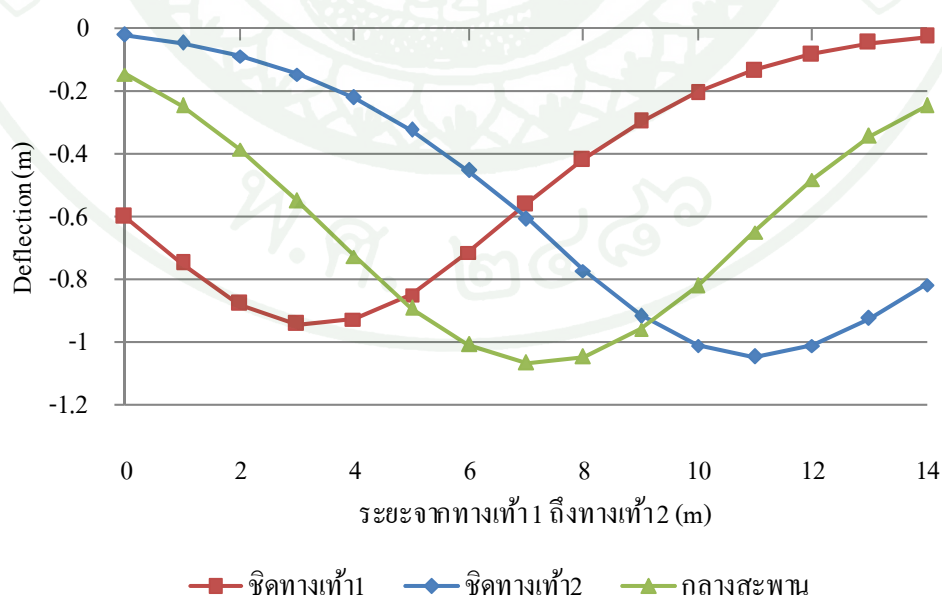


ภาพที่ 50 การวางตำแหน่งรถบรรทุกไทยน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 2 คัน ที่ตำแหน่งกลางสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน ด้วยโปรแกรม SAP2000 นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดและค่าการโก่งตัว ตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่มีความยาว $L/2$ เพื่อมาพิจารณาดำเนินงานสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด แสดงดังภาพที่ 51 และ 52 ตามลำดับ

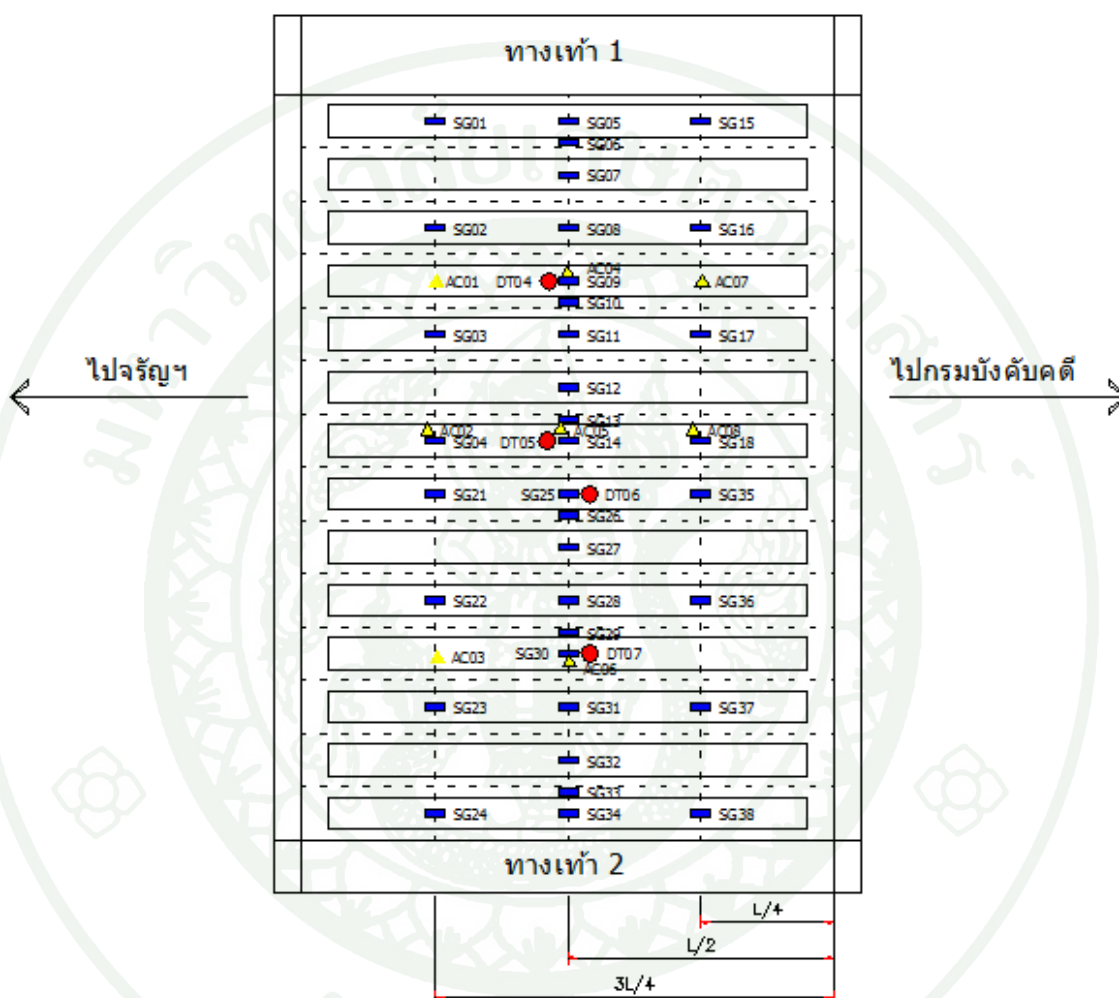


ภาพที่ 51 ความเครียดตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่มีความยาว $L/2$ ของช่วงพาดสะพาน



ภาพที่ 52 การโก่งตัวตามแนวขวางทิศทางการจราจรที่มีความยาว $L/2$ ของช่วงพาดสะพาน

จากผลการวิเคราะห์การวางน้ำหนักบรรทุกในแต่ละตำแหน่งบนโครงสร้างส่วนพื้นสะพาน โดยวิธีการจำลองโครงสร้างสะพานเบื้องต้นสามารถกำหนดตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดได้พื้น โครงสร้างสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาวาสที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน

รายละเอียดของตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างเป็น แผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกันที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 21 สำหรับอุปกรณ์วัดความเครียดที่ไม่ได้ แสดงในตารางเป็นตำแหน่งของการติดตั้งเพื่อให้เป็นเส้นแสดงแนวโน้มของการกระจายตัวของ ความเครียดตามทิศทางขวางการจราจร

ตารางที่ 21 รายละเอียดของตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับสะพานแบบพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกันที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาด

อุปกรณ์ตรวจวัด	ตำแหน่งติดตั้ง	รายละเอียดการติดตั้ง	สัญลักษณ์
Strain Gauge	กึ่งกลางแผ่นพื้นสำเร็จรูปทุกแผ่น	เพื่อวัดค่าความเครียดของแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP และสำหรับวัดค่าการกระจายตัวของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นตามทิศทางขวางการจราจร	SG05, SG07, SG08, SG09, SG11, SG12, SG14, SG25, SG27, SG28, SG30, SG31, SG32, SG34
	ระยะห่างจากทางเท้า 1 3.50 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดจากการวางตำแหน่งรถบรรทุกทุกตำแหน่งชิดทางเท้า 1	DT04
Displacement Transducer	ระยะห่างจากทางเท้า 1 6.50 เมตร และ 7.50 เมตร	เป็นตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวจากการวางตำแหน่งรถบรรทุกทุกตำแหน่งกลางสะพาน	DT05 และ DT06
	ระยะห่างจากทางเท้า 2 3.50 เมตร	เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดจากการวางตำแหน่งรถบรรทุกทุกตำแหน่งชิดทางเท้า 2	DT07
Accelerometer	ระยะห่างจากทางเท้า 1 3.50 เมตร, 6.50 เมตร และ 10.50 เมตร	สำหรับวัดความเร่งของโครงสร้างสะพานตามแนวดิ่งในแต่ละช่องการจราจร	AC04, AC05 และ AC06

ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อวัดค่าพฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก มีดังต่อไปนี้

การติดตั้ง Strain Gauge บนผิวของคอนกรีตจะต้องทำให้ตำแหน่งที่จะทำการติดนั้นมีความเรียบโดยการขัดด้วยหินขัดคอนกรีตหรือใช้กระดาษทรายขัดเมื่อผิวคอนกรีตเรียบดีจึงทำความสะอาดโดยใช้แปรงปัดแล้วเช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) สำหรับทิศทางของการติดตั้ง Strain Gauge จะติดตั้งตามทิศทางการจราจร (ตามแนวยานของการติดวัสดุ CFRP)

สำหรับกรณีติดตั้ง Strain Gauge บนผิวของวัสดุ CFRP วิธีการคล้ายกับการติดบนผิวคอนกรีตขั้นตอนการเตรียมผิวนั้นทำโดยใช้กระดาษทรายขัดตรงตำแหน่งที่จะติด Strain Gauge การขัดจะต้องทำการขัดตามทิศทางของเส้นใย CFRP โดยขัดบางๆเพียงให้ผิวเรียบ แล้วจึงทำตามวิธีการเดียวกันกับการติด Strain Gauge บนผิวคอนกรีต ตัวอย่างการติดตั้ง Strain Gauge บนผิว CFRP แสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 การติดตั้ง Strain Gauge ตำแหน่ง CFRP

Displacement Transducer สำหรับวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของโครงสร้างพื้นสะพาน การติดตั้งทำโดยฝังไม้หรือวัสดุที่มีความแข็งแรงสำหรับยึดอุปกรณ์ตรงตำแหน่งที่จะตรวจวัดและตีโครงสำหรับยึดเหนี่ยวกันป้องกันการโยกเอียง ไม้หรือวัสดุอื่นๆที่เป็นตัวยึดจะต้องมีความแข็งแรงสามารถที่จะต้านทานแรงน้ำไหลในลำคลองได้ เมื่อทำโครงยึดเสร็จแล้วจึงนำอุปกรณ์ Displacement Transducer มายึดติดกับแท่งยึดและตรวจสอบระดับด้วยเครื่องมือวัดระดับน้ำแล้วนำเทปพันให้ยึดติดกับแท่งยึด แสดงดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 การติดตั้ง Displacement Transducer ตำแหน่งใต้พื้นสะพาน

ขั้นตอนการติดตั้ง Accelerometer มีวิธีการคล้ายคลึงกับขั้นตอนการติดตั้ง Strain Gauge ดังนี้คือ จะต้องทำให้ตำแหน่งที่จะทำการติดนั้นมีความเรียบโดยการขัดด้วยหินขัดคอนกรีตหรือใช้กระดาษทรายขัดแล้วทำความสะอาดผิวโดยใช้แปรงปัดและเช็ดทำความสะอาดผิวจนแน่ใจว่าไม่มีฝุ่นเกาะแล้วจึงนำ Accelerometer มาทากาวติดกับตำแหน่งที่กำหนด แสดงดังภาพที่ 56

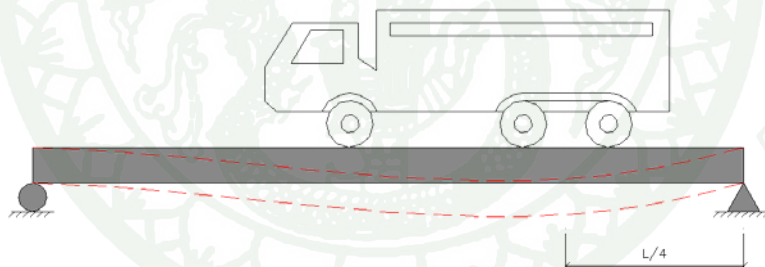


ภาพที่ 56 การติดตั้ง Accelerometer ตำแหน่งใต้พื้นสะพาน

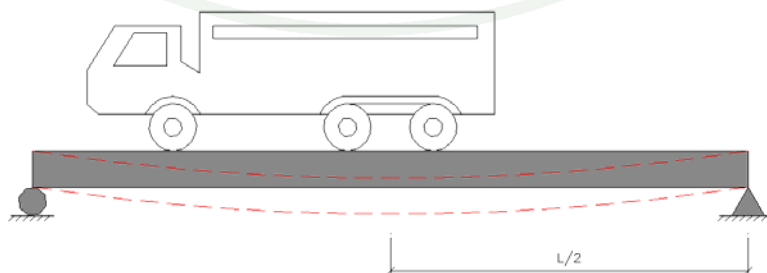
การทดสอบโครงสร้างสะพานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกจริงโดยวิธี Diagnostic Load Test เป็นการหาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักของรถบรรทุกที่มีน้ำหนักที่เหมาะสมที่เพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดสามารถวัดค่าได้ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่ประมาณ 25 ตัน

การทดสอบแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่จะนำไปวิเคราะห์และปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ค่าการโก่งตัวของโครงสร้าง ค่าความเครียดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบ สำหรับการทดสอบอีกแบบคือ การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่จะนำไปวิเคราะห์และปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ

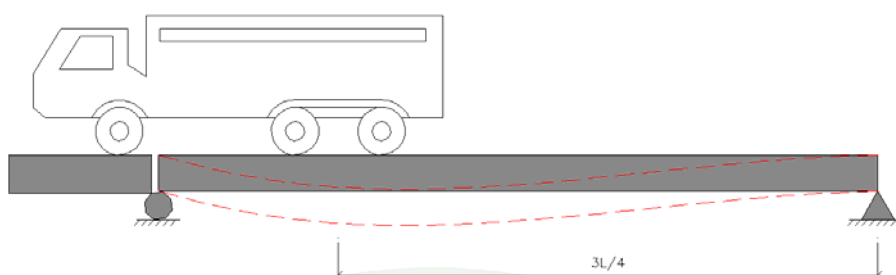
วิธีการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตเป็นการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างสะพานส่วนพื้นที่เกิดจากน้ำหนักของรถบรรทุกที่หยุดนิ่งตามระยะที่กำหนดคือช่วง $L/4$ $L/2$ และ $3L/4$ แสดงดังภาพที่ 57 ถึง 59



ภาพที่ 57 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตที่ระยะ $L/4$



ภาพที่ 58 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตที่ระยะ $L/2$



ภาพที่ 59 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตที่ระยะ $3L/4$

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักประมาณ 25 ตัน จำนวน 2 คันมาทำการทดสอบ ก่อนการตรวจวัดจะต้องกำหนดระยะที่รถบรรทุกจอดแล้วทำเครื่องหมายไว้บนพื้นจราจร นำรถบรรทุกมาหยุดนิ่งโดยให้กึ่งกลางของเพลาลังตรงกับตำแหน่งที่ได้ทำเครื่องหมายไว้บนพื้นสะพาน แสดงดังภาพที่ 60 เมื่อรถบรรทุกทั้ง 2 คันอยู่ที่ตำแหน่งตามที่กำหนดอย่างถูกต้องแล้วให้หยุดนิ่งอยู่บนพื้นสะพาน แสดงดังภาพที่ 61 จนกว่าค่าการโก่งตัวและค่าความเครียดที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์นิ่งสักพักจึงเลื่อนรถบรรทุกไปตำแหน่งทดสอบจุดต่อไป

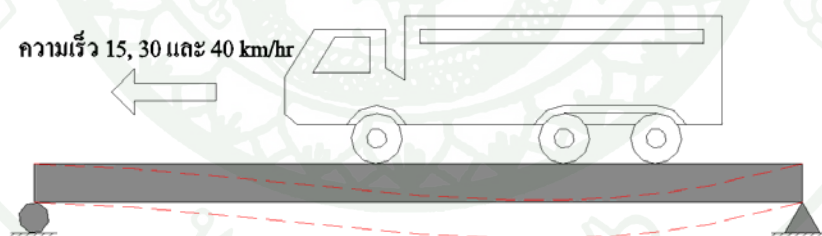


ภาพที่ 60 การหยุดรถบรรทุกทดสอบโดยตามตำแหน่งที่กำหนดพื้นสะพาน



ภาพที่ 61 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต

วิธีการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตเป็นการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างสะพานส่วนพื้นที่เกิดจากน้ำหนักของรถบรรทุกเคลื่อนที่ไปและกลับด้วยความเร็ว 15, 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 ตัวอย่างการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต

สำหรับรูปแบบของการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตกำหนดใช้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักประมาณ 25 ตัน จำนวน 2 คัน วิ่งเป็นหน้ากระดานด้วยความเร็วเท่ากัน แสดงดังภาพที่ 63 โดยมีรูปแบบตำแหน่งการวิ่งคือ ชิดขอบทางเท้า กลางสะพาน และชิดขอบกันตก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 37 ถึง 39 สำหรับสะพานโครงสร้างแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และภาพที่ 47 ถึง 49 สำหรับสะพานที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงมาวางเรียงกัน

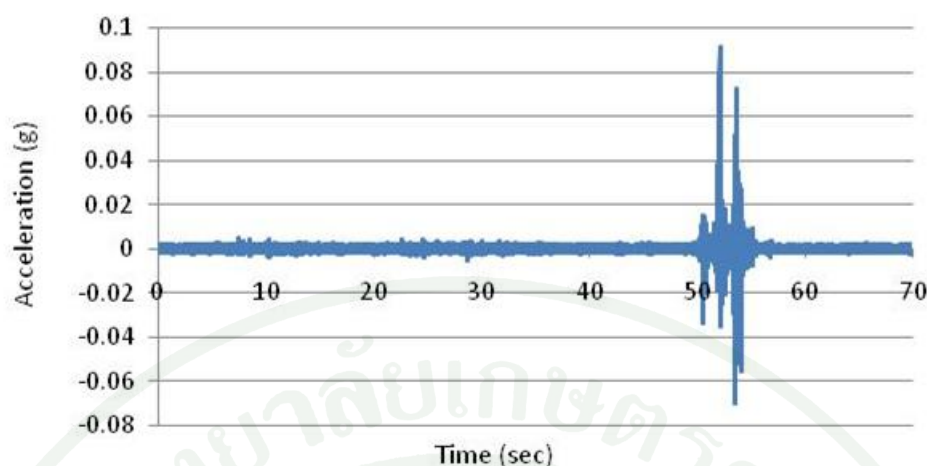


ภาพที่ 63 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตด้วยความเร็วที่กำหนด

6. การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพาน

จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานโดยวิธีการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต ผลการทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain Gauge) จะถูกบันทึกไว้ที่ความถี่ 100 Hz หมายถึงใน 1 วินาทีจะเก็บข้อมูลได้ 100 ค่า ผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดมีหน่วยเป็น microstrain กับเวลามีหน่วยเป็นวินาที สำหรับผลการทดสอบที่ได้จากการวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Displacement Transducer) จะถูกบันทึกไว้ที่ความถี่ 100 Hz เช่นกัน

จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานโดยวิธีการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต ผลการทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์วัดความเร่งตามแนวดิ่งของพื้นสะพาน (Accelerometer) จะถูกบันทึกไว้ที่ความถี่ 300 Hz ผลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งมีหน่วยเป็นเมตร/วินาที² กับเวลามีหน่วยเป็นวินาที ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 64 ซึ่งผลจากการตรวจวัดการสั่นไหวตามแนวดิ่งของโครงสร้างพื้นสะพานนั้นสามารถนำไปหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้



ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง (Acceleration, g) กับเวลา (Time, sec)

ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานคือจำนวนรอบของการสั่นไหวอย่างอิสระ (Free Vibration) ตามแนวตั้งด้วยตัวเองของสะพานในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็น Hertz (1 รอบ/วินาที) ค่าความถี่ธรรมชาติสามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรง (Stiffness) ของโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับสะพานที่มีขนาดและลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกันคือเมื่อค่าความถี่ธรรมชาติมีค่ามากแสดงว่าสะพานที่พิจารณานั้นมีความแข็งแรงมากกว่าสะพานที่มีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า

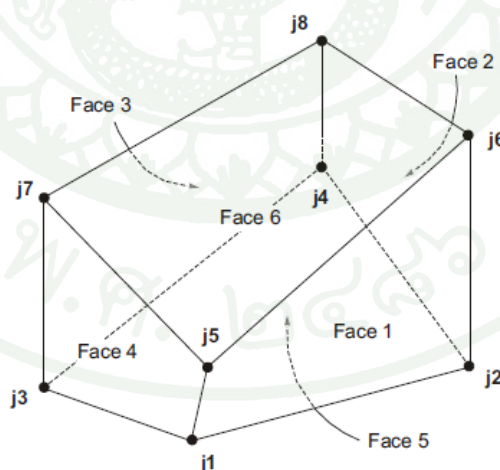
การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานหาจากได้ผลข้อมูลการตรวจวัดซึ่งอยู่ในรูปของประวัติเวลา (Time History) ของข้อมูลต่างๆ โดยพิจารณาการสั่นไหวในช่วงการสั่นแบบอิสระ แล้วตัดข้อมูลช่วงที่พิจารณามาแปลงให้อยู่ใน Frequency Domain โดยวิธี Fast Fourier Transform (FFT)

7. การเปรียบเทียบผลการทดสอบโครงสร้างสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองโครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การหาประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP หาได้จากผลต่างของกำลังของโครงสร้างสะพานก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP กล่าวคือจะต้องมีผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกจริงของโครงสร้างสะพานก่อนที่จะทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP และหลังจากที่ได้ทำการเสริมกำลังไปแล้วซึ่งการทดสอบจะมีทั้งการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต และวิธีการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต แต่เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้

ไม่ได้มีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานก่อนที่จะทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ดังนั้นการหาประสิทธิภาพจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จึงต้องประยุกต์จากการประเมินกำลังจากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีการจำลองโครงสร้างสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะทำให้การจำลองโครงสร้างสะพานในรูปแบบ 3 มิติ คุณสมบัติของวัสดุที่ระบุจะนำมาจากการทดสอบภาคสนาม เช่น กำลังของคอนกรีต เป็นต้น สำหรับขนาดและสัดส่วนต่างของโครงสร้างสะพานจะได้มาจากการวัดขนาดจริงจากภาคสนามและข้อมูลจากแบบก่อสร้างสะพาน

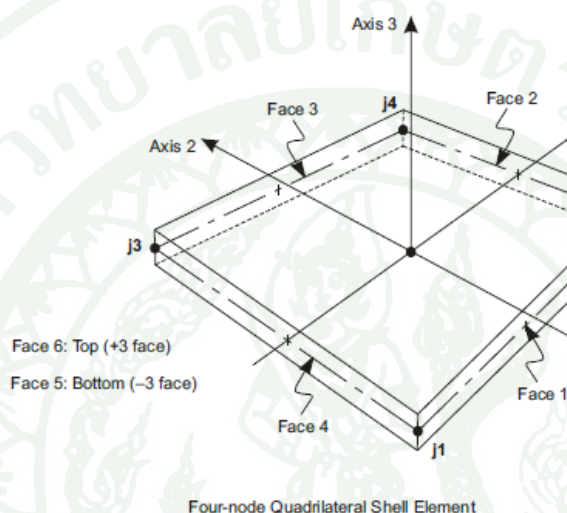
การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างแบบจำลอง Solid Element ที่ได้ระบุขนาดรูปร่างและคุณสมบัติของวัสดุที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงที่ได้จากการสำรวจภาคสนามและการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ที่ละเอียดมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าที่เข้าใกล้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากจุดต่อใน 1 เอลิเมนต์ของ Solid Element มีจำนวน 8 จุดต่อ แสดงดังภาพที่ 65 และในแต่ละจุดต่อจะสามารถเคลื่อนที่ (Displacement) และมีการหมุน (Rotation) อย่างอิสระได้ทั้ง 3 ทิศทางคือ แกน X, Y และ Z เนื่องจากจำนวนจุดต่อใน 1 เอลิเมนต์นั้นมีจำนวนมากหากแบบจำลองที่วิเคราะห์นั้นมีโครงสร้างขนาดใหญ่จำนวนเอลิเมนต์ที่มากจำนวนจุดต่อก็จะมากตามไปด้วย การประมวลผลและการขึ้นรูปแบบจำลองก็จะใช้เวลาสำหรับการวิเคราะห์นาน



ภาพที่ 65 ลักษณะของ Solid Element

ที่มา: CSI Analysis Reference Manual for SAP2000

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างแบบจำลอง Shell Element ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าที่ละเอียดน้อยกว่าการสร้างแบบจำลองพื้นสะพานด้วย Solid Element เนื่องจากจุดต่อใน 1 เอลิเมนต์ของ Shell Element มีจำนวน 4 จุดต่อ แสดงดังภาพที่ 66 และในแต่ละจุดต่อจะสามารถเคลื่อนที่ และมีการหมุนได้อย่างอิสระทั้ง 3 ทิศทางคือ แนวแกน X, Y และ Z

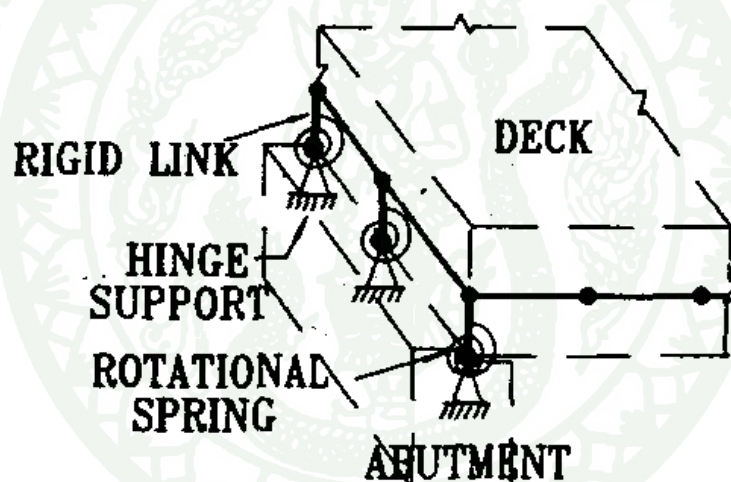


ภาพที่ 66 ลักษณะของ Shell Element

ที่มา: CSI Analysis Reference Manual for SAP 2000

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยการจำลองโครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีความละเอียด ในที่นี้จะจำลองโครงสร้างเป็นแบบ Solid Element และการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีความละเอียดน้อยกว่าเดิมคือการจำลองโครงสร้างเป็นแบบ Shell Element ซึ่งใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและการประมวลผลเร็วกว่าแบบ Solid Element การจำลองสะพานที่มีโครงสร้างแบบพื้นและสะพานที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูปมาวางเรียงกัน จะจำลองโครงสร้างแบบ Solid Element เพียงตัวอย่างละ 1 สะพานเท่านั้น แล้วจึงนำผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแบบ Shell Element ไปเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างและปรับความละเอียดมากขึ้น เช่น การปรับขนาด Mesh ของพื้นสะพานให้ละเอียด เมื่อผลการวิเคราะห์โครงสร้างมีความใกล้เคียงกันจึงใช้วิธีการจำลองโครงสร้างแบบ Shell Element กับสะพานอื่นๆต่อไป

การปรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานสำหรับงานวิจัยทำโดยการปรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในห้องปฏิบัติการซึ่งตัวอย่างทดสอบคอนกรีตได้มาจากการเจาะเก็บตัวอย่างตำแหน่งพื้นสะพานในแต่ละสะพานจำนวน 3 ตัวอย่าง นำค่าเฉลี่ยของกำลังอัดมาใช้สำหรับระบุกำลังอัดคอนกรีตของพื้นสะพาน ตรวจสอบพฤติกรรมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานโดยการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติและค่าการโก่งตัวของโครงสร้างสะพานที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน ปรับพฤติกรรมของโครงสร้างจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของสะพานโดยวิธีการยัดรีดบริเวณจุดรองรับของสะพาน ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 67 ปรับค่า Rotational Stiffness จนค่าความถี่ธรรมชาติและค่าการโก่งตัวของโครงสร้างสะพานมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 67 แบบจำลองสะพานที่มีการยัดรีดบริเวณจุดรองรับด้วย Rotational Spring

ที่มา: Shahrooz *et al.* (1994)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างสะพานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP และการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน มีขั้นตอนของการศึกษาดังนี้

- 1) การทดสอบภาคสนามเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพาน
 - 2) การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนการเสริมกำลังตามมาตรฐาน AASHTO LRFR
 - 3) การคำนวณออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างส่วนพื้นสะพานด้วยวัสดุ CFRP
 - 4) การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน
 - 5) การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 - 6) การวิเคราะห์ปรับแก้ค่า Rating Factor หลังจากโครงสร้างสะพานได้มีการซ่อมแซมเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP
 - 7) การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. ผลการทดสอบภาคสนามเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นของโครงสร้างสะพาน

1.1 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

การหาลำดับของคอนกรีตด้วยวิธีเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างแล้วทดสอบหาลำดับอัดในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM C39-93a ทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal - Testing Machine ขนาด 200 ตัน ยี่ห้อ Timius Olsen ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 68 ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้จะให้ผลทดสอบใกล้เคียงกับลำดับอัดคอนกรีตของโครงสร้างที่พิจารณามากที่สุดเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยวิธีอื่น โดยผลการทดสอบหาลำดับอัดคอนกรีตของสะพานสำหรับงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 22



ภาพที่ 68 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

ตารางที่ 22 กำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบกำลังอัดในห้องปฏิบัติการ

ลำดับที่	ชื่อสะพาน	ตัวอย่างที่	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	ตำแหน่ง โครงสร้าง
1	สะพานข้ามคลองเตย	1	370.31	360.74	พื้นสะพาน
		2	402.06		
		3	309.85		
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	1	395.12	345.85	พื้นสะพาน
		2	219.52		
		3	422.93		
3	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	1	293.37	334.29	พื้นสะพาน
		2	298.26		
		3	411.24		
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	1	177.13	209.95	พื้นสะพาน
		2	240.95		
		3	211.79		
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	1	281.90	278.01	พื้นสะพาน
		2	216.73		
		3	335.40		
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	1	284.51	323.58	พื้นสะพาน
		2	314.62		
		3	371.61		
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	1	368.58	323.19	พื้นสะพาน
		2	271.25		
		3	329.74		
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	1	265.69	286.97	พื้นสะพาน
		2	265.24		
		3	329.99		
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	1	210.02	268.13	พื้นสะพาน
		2	307.59		
		3	286.80		

ตารางที่ 22 (ต่อ)

ลำดับที่	ชื่อสะพาน	ตัวอย่างที่	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	ตำแหน่ง โครงสร้าง
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	1	260.07	276.77	พื้นสะพาน
		2	277.43		
		3	292.80		
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาาม	1	220.84	257.69	คานขวาง
		2	273.75		
		3	278.47		
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	1	323.03	240.79	คานขวาง
		2	357.51		
		3	341.85		

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างจากการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในห้องปฏิบัติการมี 2 ลักษณะคือ มีรอยแตกขนานกับแนวตั้งของตัวอย่างทดสอบ (Splitting Failure) และ มีรอยแตกขนานกับแนวตั้งของตัวอย่างทั้งยังมีรอยแตกเฉียงประมาณ 45 องศา จากฐานรองรับ (Shear and Splitting Failure) แสดงดังภาพที่ 69 และ 70 ตามลำดับ

กำลังอัดของคอนกรีตของแต่ละสะพานที่นำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน การคำนวณออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างส่วนพื้นสะพานภายนอกด้วยวัสดุ CFRP และการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 69 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแบบ Splitting Failure

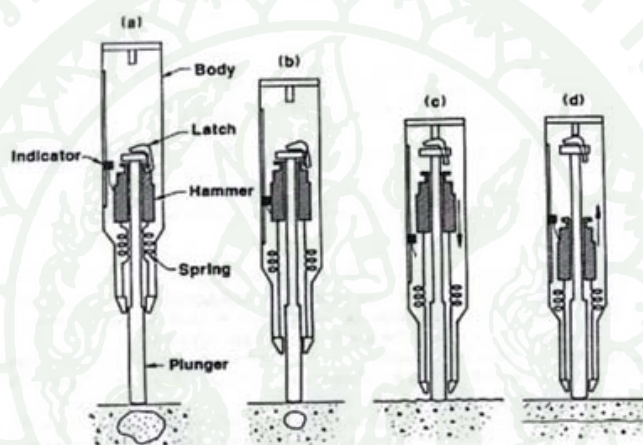


ภาพที่ 70 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแบบ Shear and Splitting Failure

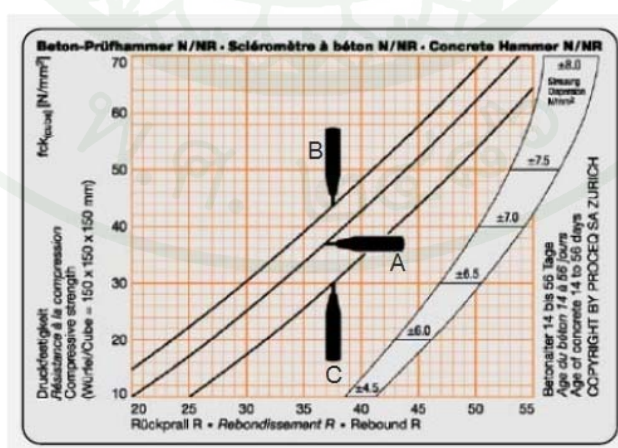
1.2 การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีการวัดค่าการสะท้อนด้วยคลื่นกระแทก

การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายตามมาตรฐาน ASTM C-805 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นเพียงกำลังอัดคอนกรีตโดยประมาณเท่านั้น คลื่นกระแทกมีลักษณะรูปทรงกระบอก แสดงดังภาพที่ 71 ภายในประกอบด้วยสปริง ค้อนน้ำหนัก และแท่งเหล็กประกอบอยู่ด้านในโดยใช้ค้อนเข้าหาพื้นผิวคอนกรีตซึ่งแท่งเหล็กจะถูกดันร่นเข้ามาอัดสปริง เมื่อแท่งเหล็กถูกดันเข้ามาเต็มที่ สปริงจะคืนตัวโดยอัตโนมัติ และค้อนน้ำหนักจะถูกดันเข้ามาระแทกแท่งเหล็กซึ่ง

ถ่ายแรงกระแทกเข้าสู่ผิวคอนกรีต ค้อนน้ำหนักก็จะสะท้อนกลับออกมาแสดงค่าสะท้อนการกระแทก อ่านค่าสะท้อนกลับจากเครื่องมือนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับกับค่ากำลังอัดคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 72 สำหรับทิศทางการทดสอบมีด้วยกัน 3 ทิศทาง ได้แก่ การทดสอบในแนวนอน (ทิศทาง A) การทดสอบแนวตั้งแบบยิงลง (ทิศทาง B) และการทดสอบแนวตั้งแบบยิงขึ้น (ทิศทาง C) ซึ่งแต่ละทิศทางจะใช้กราฟในการแปลงค่าวัดการสะท้อนเป็นค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยวิธีวัดค่าการสะท้อนด้วยค้อนกระแทกของสะพานที่ศึกษา แสดงดังตารางที่ 23 โดยที่ผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีตโดยวิธีการวัดค่าสะท้อนด้วยค้อนกระแทกสูงกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 71 ลักษณะของค้อนกระแทก



ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนกลับกับค่ากำลังอัดคอนกรีต

ตารางที่ 23 กำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบด้วยวิธีวัดค่าการสะท้อนด้วยค้อนกระแทก

ลำดับ ที่	ชื่อสะพาน	ทิศทาง	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความต่างระหว่าง Rebound Hammer กับการทดสอบใน ห้องปฏิบัติการ
1	สะพานข้าม คลองเตย	C	461.56	461.31	พื้นสะพาน	21.80 %
		C	456.13			
		C	466.25			
2	สะพานข้ามคลอง บางอ้อ	C	536.44	509.42	พื้นสะพาน	32.11 %
		C	501.63			
		C	490.19			
3	สะพานข้ามคลอง สะพานยาว	C	516.50	509.93	พื้นสะพาน	34.44 %
		C	512.80			
		C	500.49			
4	สะพานข้ามคลอง มอญ 1	C	486.30	462.18	พื้นสะพาน	54.57 %
		C	482.93			
		B	417.30			
5	สะพานข้ามคลอง เตาอิฐ	C	394.99	407.57	พื้นสะพาน	31.79 %
		B	390.97			
		B	436.74			
6	สะพานข้ามคลอง บางรัก	B	458.70	516.55	พื้นสะพาน	37.36 %
		C	521.64			
		C	569.32			
7	สะพานข้ามคลอง บางพระครู	C	482.46	474.02	พื้นสะพาน	31.82 %
		B	394.48			
		B	545.12			
8	สะพานข้ามคลอง บางพลัด	C	522.53	528.06	พื้นสะพาน	45.66 %
		C	576.61			
		C	485.03			
9	สะพานข้ามคลอง บางพลู	C	491.40	483.85	พื้นสะพาน	44.58 %
		C	504.97			
		C	455.17			

ตารางที่ 23 (ต่อ)

ลำดับ ที่	ชื่อสะพาน	ทิศทาง	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความต่างระหว่าง Rebound Hammer กับการทดสอบใน ห้องปฏิบัติการ
10	สะพานข้ามคลอง บางขุนนนท์	C	337.54	323.79	พื้นสะพาน	14.52 %
		C	291.25			
		C	342.57			
11	สะพานข้ามคลอง วัดเจ้าอาาม	A	558.60	506.64	คานขวาง	49.14 %
		A	482.32			
		A	479.00			
12	สะพานข้ามคลอง มอญ 3	A	477.50	482.44	คานขวาง	50.09 %
		A	491.96			
		A	477.87			

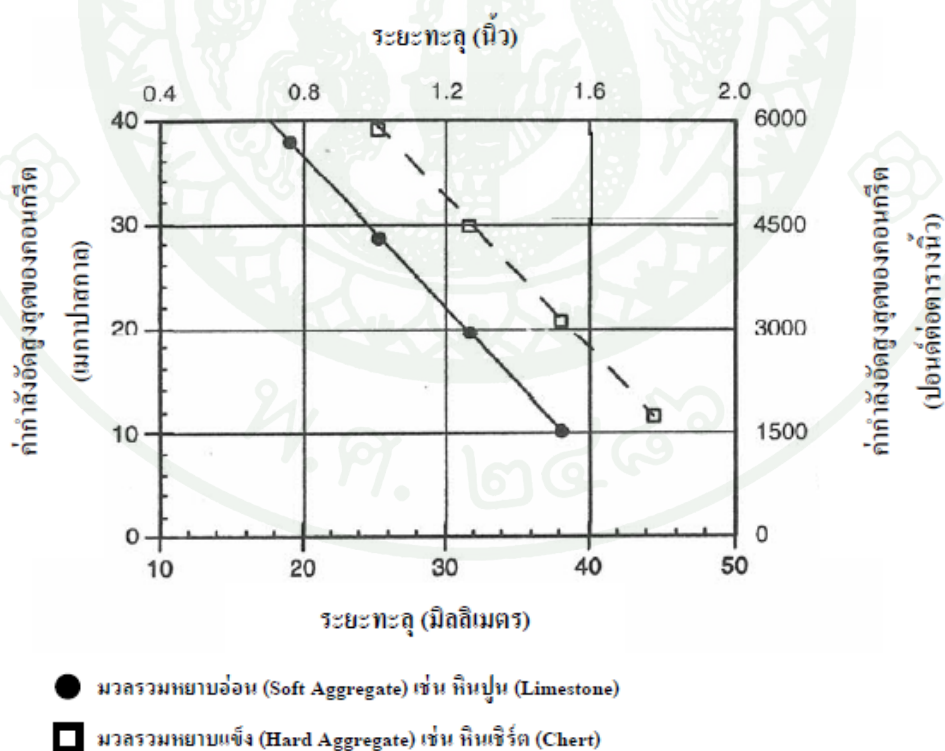
จากการทดสอบหาลำกำลังอัดคอนกรีตโดยวิธีวัดค่าการสะท้อนด้วยค้อนกระแทกพบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าตั้งแต่ 324 กก./ซม.² ถึง 528 กก./ซม.² ซึ่งมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าผลทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 14 ถึงร้อยละ 55 แสดงดังตารางที่ 25 ผลต่างระหว่างการทดสอบทั้ง 2 วิธีนี้ส่วนมากจะมีความแตกต่างกันกว่าร้อยละ 25 ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของการทดสอบด้วยค้อนกระแทกที่ได้จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมคุณภาพคอนกรีต สำหรับความคลาดเคลื่อนของกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบด้วยค้อนกระแทกมาจากสภาพของคอนกรีตที่มีความชื้นจากการระเหยของน้ำในคลอง

1.3 การทดสอบแบบกึ่งทำลายโดยวิธีการวัดกำลังต้านทานการทะลุ (Penetration Resistance Test) ด้วยเครื่องมือ Windsor Probe ที่ใช้การยิงหัวหยั่งทดสอบ (Probe) ที่เป็นแท่งโลหะอัลลอยที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นโคนที่สามารถทะลุเข้าไปในเนื้อคอนกรีต และปลายอีกข้างหนึ่งมีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อให้สามารถดึงหัวหยั่งทดสอบออกจากโครงสร้างคอนกรีตได้โดยสะดวก ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 73 การทดสอบแต่ละชุดจะวัด 3 จุด ทุกจุดต้องอยู่ห่างจากกันเท่าๆกัน และอยู่ห่างจากจุดที่จะทำการยิงหัวหยั่งทดสอบไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร วัดความยาวของหัวหยั่งทดสอบที่พ้นจากผิวหน้าของคอนกรีตโดยอุปกรณ์วัดระยะทะลุแล้วเฉลี่ยความยาวที่วัดได้นำไป

เปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและกำลังอัดของคอนกรีต ตัวอย่างกราฟแสดง
 ดังภาพที่ 74



ภาพที่ 73 หัวหยั่งทดสอบ (Probe)



ภาพที่ 74 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทะลุและกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตโดยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุด้วยเครื่องมือ Windsor Probe ของสะพานสำหรับงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 กำลังอัดคอนกรีตจากการทดสอบด้วยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุด้วยเครื่องมือ Windsor Probe

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ตำแหน่ง	กำลังอัด กก./ชม. ²	ค่าเฉลี่ย กก./ชม. ²	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความต่างระหว่างวิธี วัดกำลังต้านทานการ ทะลุกับการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ
1	สะพานข้าม คลองเตย	1	367.64	398.69	พื้นสะพาน	9.52 %
		2	434.22			
		3	394.22			
2	สะพานข้ามคลอง บางอ้อ	1	425.36	456.42	พื้นสะพาน	24.22 %
		2	425.36			
		3	518.52			
3	สะพานข้ามคลอง สะพานยาว	1	462.07	460.38	พื้นสะพาน	27.39 %
		2	457.60			
		3	462.07			
4	สะพานข้ามคลอง มอญ 1	1	283.20	361.43	พื้นสะพาน	41.91 %
		2	400.55			
		3	400.55			
5	สะพานข้ามคลอง เตาอิฐ	1	430.43	372.49	พื้นสะพาน	25.36 %
		2	368.91			
		3	318.14			
6	สะพานข้ามคลอง บางรัก	1	359.34	370.99	พื้นสะพาน	12.78 %
		2	323.91			
		3	430.43			
7	สะพานข้ามคลอง บางพระครู	1	460.24	407.34	พื้นสะพาน	20.66 %
		2	363.84			
		3	451.94			
8	สะพานข้ามคลอง บางพลัด	1	421.99	424.43	พื้นสะพาน	32.39 %
		2	430.43			
		3	420.86			

ตารางที่ 24 (ต่อ)

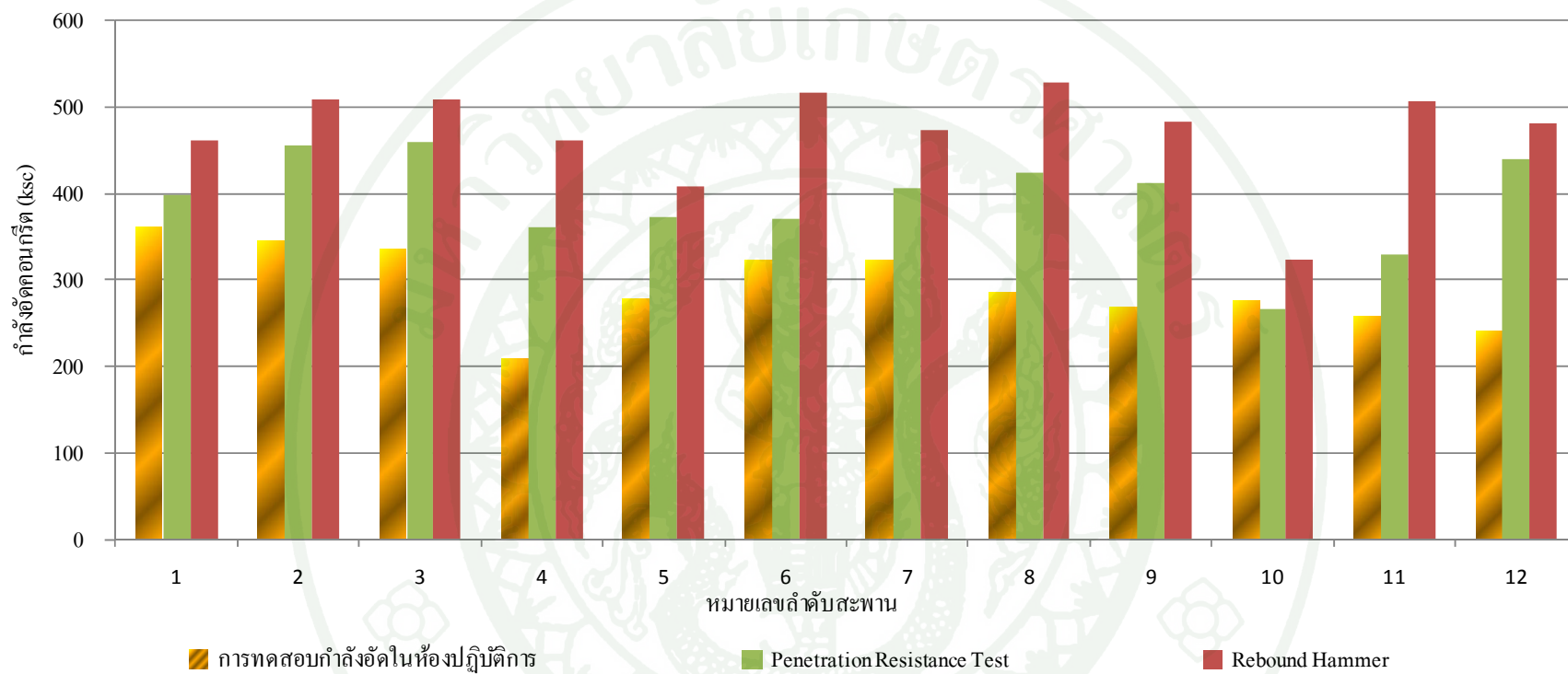
ลำดับ	ชื่อสะพาน	ตำแหน่ง	กำลังอัด กก./ชม. ²	ค่าเฉลี่ย กก./ชม. ²	ตำแหน่ง โครงสร้าง	ความต่างระหว่างวิธี วัดกำลังต้านทานการ ทะลุกับการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ
9	สะพานข้ามคลอง	1	407.51			
	บางพลู	2	407.51	413.46	พื้นสะพาน	35.15
		3	425.36			
10	สะพานข้ามคลอง	1	260.60			
	บางขุนนนท์	2	257.80	267.38	พื้นสะพาน	3.39 %
		3	283.74			
11	สะพานข้ามคลอง	1	292.76			
	วัดเจ้าอาม	2	354.28	328.69	คานขวาง	21.60 %
		3	339.03			
12	สะพานข้ามคลอง	1	441.18			
	มอญ 3	2	406.24	440.08	คานขวาง	45.28 %
		3	472.82			

จากการทดสอบหาลำกำลังอัดคอนกรีตโดยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุด้วยเครื่องมือ Windsor Probe พบว่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าตั้งแต่ 267 กก./ชม.² ถึง 460 กก./ชม.² ซึ่งมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าผลทดสอบจากห้องปฏิบัติการ โดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 0.62 ถึง ร้อยละ 45 แสดงดังตารางที่ 24 หากเปรียบเทียบผลการทดสอบที่แตกต่างระหว่างการทดสอบโดยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุกับการทดสอบโดยวิธีวัดค่าการสะท้อน พบว่าการทดสอบโดยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุมีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตในห้องปฏิบัติการมากกว่า ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าการทดสอบโดยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการทดสอบโดยวัดค่าการสะท้อน สำหรับความคลาดเคลื่อนของกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีวัดกำลังต้านทานการทะลุมาจากการยิงด้วยเครื่องมือ Windsor Probe และตำแหน่งของมวลรวมหยาบที่อยู่ใกล้ผิวคอนกรีตมีผลต่อค่าการทะลุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่ทำให้ค่าการทะลุบางค่าแตกต่างจากค่าอื่นมาก

ผลสรุปการทดสอบหาค่าลึงอัดในห้องปฏิบัติการ วิธีวัดค่าลึงด้านทานการทะลวงด้วยเครื่องมือ Windsor Probe และวิธีวัดค่าการสะท้อนด้วยค้อนกระแทกของสะพานสำหรับงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 25 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าลึงอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธี แสดงดังภาพที่ 75

ตารางที่ 25 สรุปผลการทดสอบหาค่าลึงอัดของคอนกรีต

ลำดับ	ชื่อสะพาน	การวัดค่าลึงด้านทาน		
		การทดสอบค่าลึงอัดในห้องปฏิบัติการ	การวัดค่าสะท้อนด้วยค้อนกระแทก	การทะลวงด้วยเครื่องมือ Windsor Probe
		(กก./ชม. ²)	(กก./ชม. ²)	(กก./ชม. ²)
1	สะพานข้ามคลองเตย	360.74	461.31	398.69
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	345.85	509.42	456.42
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	334.29	509.93	460.38
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	209.95	462.18	361.43
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	278.01	407.57	372.49
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	323.58	516.55	370.99
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	323.19	474.02	407.34
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	286.97	528.06	424.43
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	268.13	483.85	413.46
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	276.77	323.79	267.38
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	257.69	506.64	328.69
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	240.79	482.44	440.08



ภาพที่ 75 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตโดยวิธีที่แตกต่างกัน

1.4 การทดสอบหากล้างครากของเหล็กเสริมคอนกรีต โดยวิธีแบบทำลายกับตัวอย่างเหล็กเสริมในโครงสร้างสะพาน ทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine เช่นเดียวกันกับการทดสอบหากล้างอัดคอนกรีต เหล็กเสริมที่นำมาทดสอบหากล้างรับแรงดึงเก็บตัวอย่างมาจากราวสะพานเนื่องจากเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ไม่ค่อยสำคัญต่อการรับน้ำหนักและเป็นบริเวณที่มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมน้อยที่สุด โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีความยาวไม่น้อยกว่า 40 เซนติเมตร เกรด SD30 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A 370 เมื่อทำการทดสอบหากล้างครากของเหล็กเสริมจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 3,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ก่อนการทดสอบจะต้องทำความสะอาดเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากมีเศษปูนและฝุ่นเกาะที่ผิว วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง วัดความยาว และชั่งน้ำหนักเหล็กเสริมก่อนการทดสอบเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตรวจสอบหลังจากมีการทดสอบหากล้างรับแรงดึงของเหล็กต่อไป ตารางที่ 26 แสดงผลการทดสอบหากล้างรับแรงดึงของเหล็กเสริมของสะพานที่นำข้อมูลมาศึกษาทั้งหมด

ตารางที่ 26 หากล้างรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ลำดับที่	ชื่อสะพาน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	หากล้างดึงคราก (กก./ชม. ²)	หากล้างดึงประลัย (กก./ชม. ²)
1	สะพานข้ามคลองเตย	12	4,650	5,363
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	12	4,817	5,546
3	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	12	3,937	5,591
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	12	4,551	5,318
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	12	3,546	5,128
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	12	3,940	5,607
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	12	4,964	5,620
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	12	4,023	5,608
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	12	3,977	5,494
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	12	3,056	4,125
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	12	3,109	4,215
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	12	4,013	5,648

จากผลการทดสอบหาค่าดึงครากของเหล็กเสริมเกรด SD 30 ที่ตำแหน่งราวสะพานพบว่า ค่าดึงครากของเหล็กเสริมของสะพานสำหรับงานวิจัย มีค่าตั้งแต่ 3,056 กก./ชม.² ถึง 4,964 กก./ชม.² ซึ่งมีค่าสูงกว่า 3,000 กก./ชม.² แสดงดังตารางที่ 26 ดังนั้นในการคำนวณการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสามารถใช้ค่าดึงครากของเหล็กเสริมที่มีค่า 3,000 กก./ชม.² ได้ เนื่องจากผลการทดสอบเหล็กเสริมมีค่าตามมาตรฐานที่กำหนด

2. ผลการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR

การตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพานในภาคสนามเป็นการประเมินสภาพความสมบูรณ์เบื้องต้นสำหรับการใช้งานของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบสภาพด้วยสายตาโดยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญและมีประสบการณ์ทางด้านการตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน วิธีการประเมินสภาพโครงสร้างสะพาน คือการบันทึกภาพ เขียนบรรยายลักษณะความเสียหาย แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อให้คะแนนระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน สำหรับข้อมูลสรุปความเสียหายของโครงสร้างสะพานและคะแนนการประเมินระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานด้วยค่าดัชนีชี้วัดของสะพานในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 27 และ 28 ตามลำดับ

ตารางที่ 27 ข้อมูลสรุปความเสียหายของโครงสร้างสะพาน

ลำดับ	ชื่อสะพาน	พื้นที่การหลุดล่อนของคอนกรีต (ม. ²)								พื้นที่ของ พื้น สะพาน โดยรวม (ม ²)
		ฝั่งซ้าย				ฝั่งขวา				
		ตำแหน่งกลางสะพาน (L/2)		ตำแหน่งใกล้จุดรองรับ		ตำแหน่งกลางสะพาน (L/2)		ตำแหน่งใกล้จุดรองรับ		
		พื้นด้านบน	พื้นด้านล่าง	พื้นด้านบน	พื้นด้านล่าง	พื้นด้านบน	พื้นด้านล่าง	พื้นด้านบน	พื้นด้านล่าง	
1	สะพานข้ามคลองเตย	0.04	-	0.02	-	0.01	-	0.0625	0.515	99
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	0.06	1.09	0.03	-	0.0225	0.06	0.04	0.08	99
3	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	-	0.105	-	0.035	-	0.04	-	-	99
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-	-	0.325	0.005	0.3725	-	0.4	0.28	99
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-	-	0.645	-	0.2612	-	0.6255	0.26	99
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	0.02	-	-	-	-	-	0.04	0.193	99
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	0.11	0.34	0.42	0.81	0.10	-	0.08	0.05	99
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-	-	0.01	0.04	-	-	0.08	0.01	59.40
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-	-	-	-	-	-	0.09	0.1975	99
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	0.03	-	1.09	0.0425	-	-	-	-	99
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	4.50	0.30	8.27	-	-	-	-	-	140
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3					-	-	-	-	1,275

ตารางที่ 28 คะแนนระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน (Condition Rating)

ลำดับ	ชื่อสะพาน	Condition Rating		ลักษณะพื้น สะพาน
		ฝั่งซ้าย	สะพาน	
1	สะพานข้ามคลองเตย	4	6	Slab Type
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	4	6	Slab Type
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	4	5	Slab Type
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	4	6	Slab Type
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	4	4	Slab Type
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	5	5	Slab Type
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	4	6	Slab Type
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	6	4	Slab Type
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	7	6	Slab Type
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์		4	Slab Type
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาาม		5	Plank Girder
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3		4	Plank Girder

คะแนนระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน (Condition Rating) จะต้องสัมพันธ์กับข้อมูลตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างสะพานกล่าวคือปริมาณความเสียหายของโครงสร้างสะพานมีมากหรือน้อยค่า Condition Rating ก็ควรจะมีค่าในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 27 และ 28 ตามลำดับ สำหรับตารางที่ 27 สะพานลำดับที่ 10 ถึง 12 เป็นสะพานที่มีฝั่งเดียวจึงนำผลการตรวจสอบได้ในช่องฝั่งซ้ายเพียงด้านเดียว

หลังจากที่มีการสำรวจขนาดโครงสร้างสะพาน ทดสอบกำลังวัสดุเบื้องต้นของสะพาน และประเมินระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานด้วยค่าดัชนีชี้วัดสำหรับสะพานที่ศึกษาแล้ว นำขนาดหน้าตัดและผลการทดสอบวัสดุของโครงสร้างมาคำนวณหากำลังต้านทานโมเมนต์คัตและคำนวณค่า RF ดังสมการที่ 2 เพื่อประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนการเสริมกำลังสำหรับการพิจารณาการเสริมกำลังสะพาน โดยที่ค่า RF ของแต่ละสะพานได้ประเมินทั้งในระดับ Inventory (IN) และ Operating (OP) แสดงดังตารางที่ 29 และตัวอย่างรายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

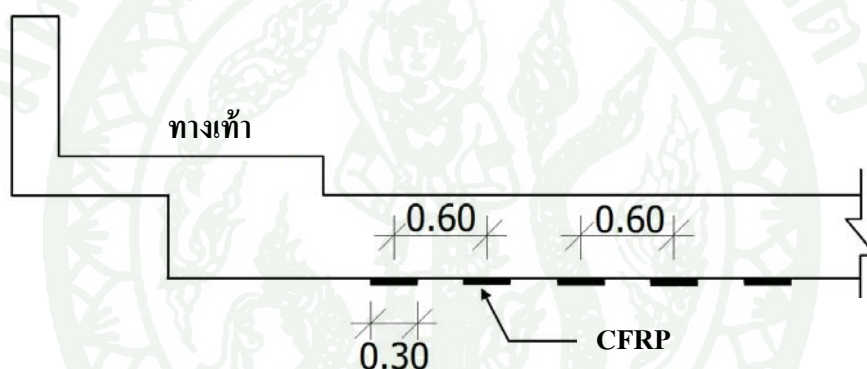
ตารางที่ 29 ค่า RF ที่ระดับ Inventory (IN) และ Operating (OP) ของโครงสร้างสะพานส่วนพื้น
ก่อนการเสริมกำลัง

ลำดับที่	ชื่อสะพาน	Rating Factor (RF)				ลักษณะพื้น
		Inventory (IN)		Operating (OP)		
		ฝั่งซ้าย	ฝั่งขวา	ฝั่งซ้าย	ฝั่งขวา	
1	สะพานข้ามคลองเตย	0.78	1.02	1.01	1.32	Slab Type
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	0.78	1.02	1.01	1.32	Slab Type
3	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	0.78	0.94	1.01	1.22	Slab Type
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	0.78	1.02	1.01	1.32	Slab Type
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	0.78	0.78	1.01	1.01	Slab Type
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	0.94	0.94	1.22	1.22	Slab Type
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	0.78	1.02	1.01	1.32	Slab Type
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	0.91	0.73	1.18	0.95	Slab Type
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	1.02	1.02	1.33	1.33	Slab Type
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์		0.95		1.23	Slab Type
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม		0.89		1.16	Plank Girder
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3		0.87		1.12	Plank Girder

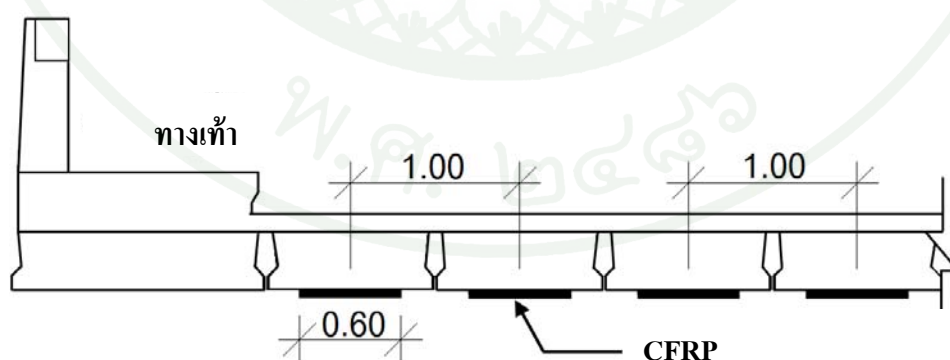
ผลการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนการเสริมกำลังด้วย CFRP ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR ดังที่แสดงในตารางที่ 29 พบว่ามีเพียงสะพานลำดับที่ 9 สะพานข้ามคลองบางพลูที่มีค่า RF ระดับ Inventory มากกว่า 1 แสดงว่าสะพานนี้มีความปลอดภัยในการใช้งาน จึงไม่ต้องมีการพิจารณาการเสริมกำลังโครงสร้าง สำหรับสะพานที่มีค่า RF ระดับ Inventory น้อยกว่า 1 คือสะพานที่ไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานสำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด ดังนั้นต้องมีการพิจารณาเสริมกำลังโครงสร้าง

3. การคำนวณออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างภายนอกด้วยวัสดุ CFRP

การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ CFRP ได้พิจารณาจากผลการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานในระดับ Inventory โดยมีสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 10 สะพานและสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงจำนวน 2 สะพาน ตัวอย่างหน้าตัดของสะพานที่เสริมกำลังด้วย CFRP ทั้งสะพานแบบ Slab Type และสะพานแบบ Prestressed Plank Girder แสดงดังภาพที่ 76 และ 77 ตามลำดับ สำหรับการออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ CFRP ได้ใช้ข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 442.2R-08 ปริมาณและรายละเอียดของการเสริมกำลังพื้นสะพานด้วย CFRP แสดงดังตารางที่ 30



ภาพที่ 76 หน้าตัดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP



ภาพที่ 77 หน้าตัดของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ตารางที่ 30 ปริมาณและรายละเอียดของการเสริมกำลังพื้นสะพานด้วย CFRP

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	ฝั่ง	ปริมาณการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อ				กำลังต้านทาน โมเมนต์คดปลายของหน้าตัด		ลักษณะ โครงสร้าง สะพาน	จำนวน ทางเท้า
			ความกว้างพื้นสะพาน 1 เมตร				(กิโลนิวตัน-ม/ม)			
			กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)	หนา (มม.)	จำนวน ชั้น (Layers)	ก่อนการเสริมกำลัง	หลังเสริมกำลังด้วย CFRP		
1	สะพานข้ามคลองเตย	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
3	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	ฝั่งขวา	0.50	9.00	0.176	2	647.69	777.64	Slab Type	1 ด้าน
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	ฝั่งขวา	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	647.69	777.64	Slab Type	1 ด้าน
	สะพานข้ามคลองบางรัก	ฝั่งขวา	0.50	9.00	0.176	2	647.69	777.64	Slab Type	1 ด้าน
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	ฝั่งซ้าย	0.50	9.00	0.176	2	579.51	777.64	Slab Type	1 ด้าน
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	ฝั่งซ้าย	0.50	5.00	0.176	2	263.46	346.86	Slab Type	1 ด้าน
	สะพานข้ามคลองบางพลัด	ฝั่งขวา	0.50	5.00	0.176	2	223.93	346.86	Slab Type	1 ด้าน
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-	0.40	8.00	0.176	2	413.66	562.68	Slab Type	2 ด้าน

ตารางที่ 30 (ต่อ)

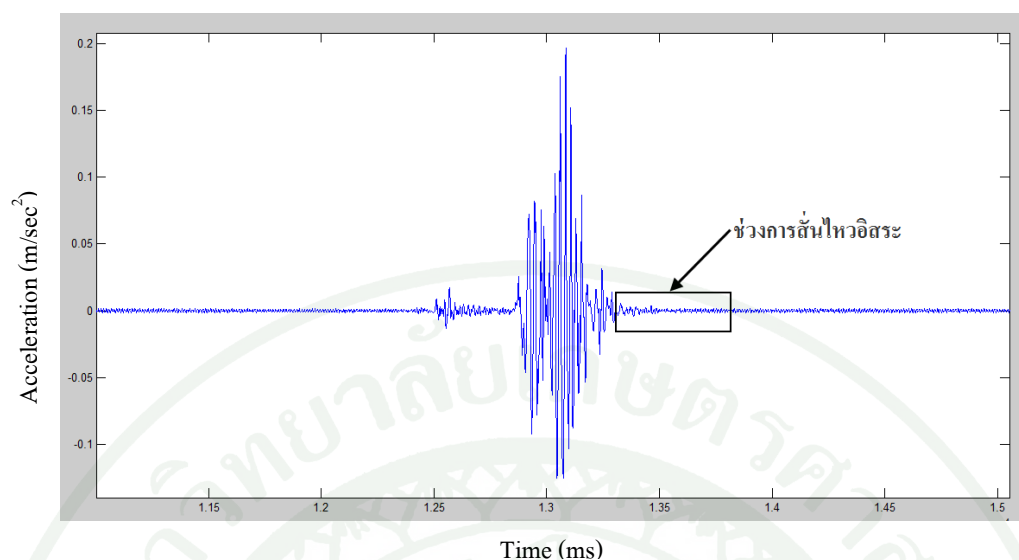
ลำดับ	ชื่อสะพาน	ฝั่ง	ปริมาณการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อ				กำลังต้านทาน โมเมนต์คดประลัยของหน้าตัด		ลักษณะ โครงสร้าง สะพาน	จำนวน ทางเท้า
			ความกว้างพื้นสะพาน 1 เมตร				(กิโลนิวตัน-ม/ม)			
			กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)	หนา (มม.)	จำนวน ชั้น (Layers)	ก่อนการเสริมกำลัง	หลังเสริมกำลังด้วย CFRP		
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	-	0.60	9.00	0.176	4	567.24	769.18	Plank Girder	2 ด้าน
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	-	0.60	9.00	0.176	4	537.89	806.92	Plank Girder	2 ด้าน

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน

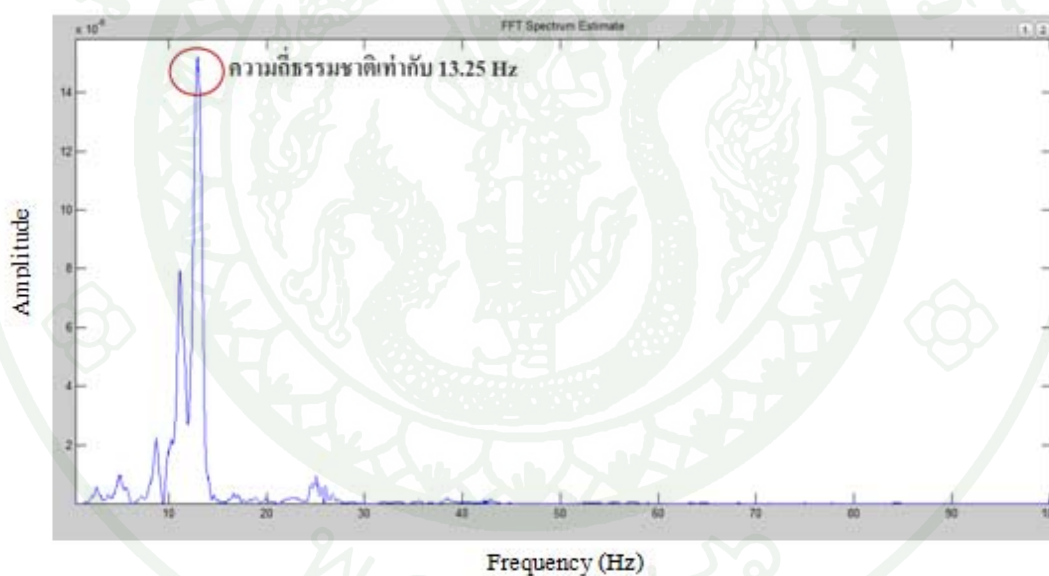
ในการศึกษานี้ได้มีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานแบบวิธี Diagnostic Load Test ซึ่งเป็นการทดสอบหาการตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกทดสอบประมาณ 25 ตัน จำนวน 2 คัน แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตและการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต สำหรับข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์การทดสอบ Accelerometer, Strain Gauge และ Displacement Transducer สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต (Dynamic Amplification Factor, DAF) และปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามลำดับ

4.1 การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ใช้รถบรรทุกที่มีน้ำหนักประมาณ 25 ตัน วิ่งคู่ขนานกันด้วยความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีอุปกรณ์วัดความเร่งตามแนวดิ่งของพื้นสะพาน (Accelerometer) บันทึกด้วยความถี่ 300 Hz แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 78 ซึ่งเป็นผลการทดสอบจากสะพานข้ามคลองสะพานยาวระบบโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทำได้ นำข้อมูลความเร่งในช่วงการสั่นไหวอิสระมาวิเคราะห์โดยวิธี FFT ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 79 โดยที่ตำแหน่งความถี่ (Frequency) ที่มีค่าแอมพลิจูด (Amplitude) สูงที่สุดคือ ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน



ภาพที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา



ภาพที่ 79 การหาความถี่ธรรมชาติโดยวิธี FFT

หลังจากที่มีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานแบบวิธี Diagnostic Load Test ของทุกสะพานแล้ว นำข้อมูลความเร่งตามแนวดิ่งของพื้นสะพานมาวิเคราะห์เพื่อหาความถี่ธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ความถี่ธรรมชาติของสะพาน

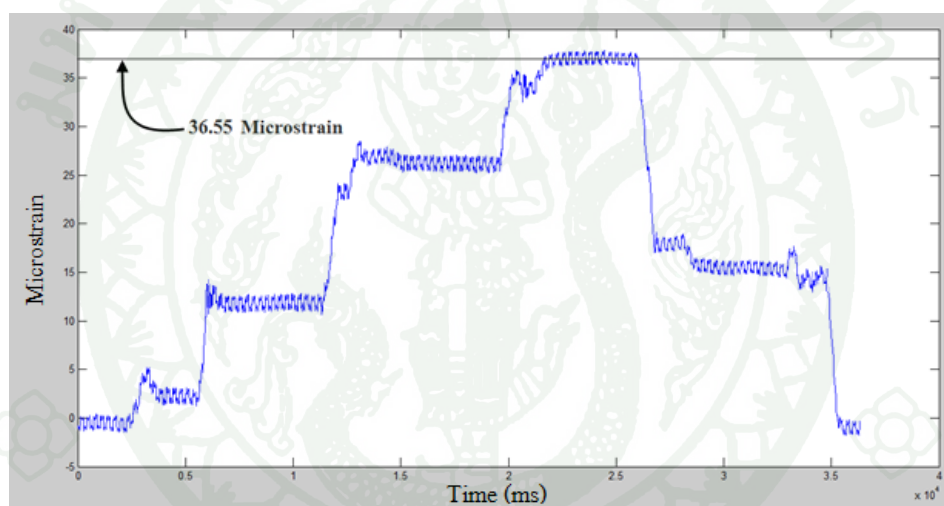
ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความยาว ช่วงพาด (ม.)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)		ลักษณะ โครงสร้าง สะพาน	การเสริม กำลังด้วย CFRP	
			ฝั่งซ้าย	ฝั่งขวา		ฝั่ง ซ้าย	ฝั่ง ขวา
1	สะพานข้ามคลองเตย	10	13.63	13.73	Slab Type	●	
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	10	12.65	13.45	Slab Type	●	
3	สะพานข้ามคลองสะพานยาว	10	13.25	13.52	Slab Type	●	●
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	10	13.38	13.45	Slab Type	●	
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	10	12.67	13.37	Slab Type	●	●
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	10	14.09	13.8	Slab Type	●	●
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	10	11.60	11.13	Slab Type	●	
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	6	25.58	22.06	Slab Type	●	●
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	10	13.13	16.03	Slab Type		
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	10		11.55	Slab Type		●
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	10		14.35	Plank Girder	●	
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	10		12.61	Plank Girder	●	

หมายเหตุ : สัญลักษณ์● หมายถึงสะพานที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 31 พบว่าสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร มีค่าความถี่ธรรมชาติระหว่าง 11.13 Hz ถึง 16.03 Hz สำหรับสะพานข้ามคลองบางพลัดที่มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 25.58 Hz ซึ่งมีค่าสูงกว่าเนื่องจากมีความยาวช่วงพาดสะพานที่มีความยาวเพียง 6 เมตร ทำให้ช่วงการสั่นไหวอิสระของสะพานมีความถี่มากกว่าสะพานที่มีความยาว 10 เมตร แสดงให้เห็นว่าความยาวช่วงพาดของสะพานมีความแปรผันกับค่าความถี่ธรรมชาติและสตีเฟนของโครงสร้าง

4.2 ค่าความเครียดจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิต

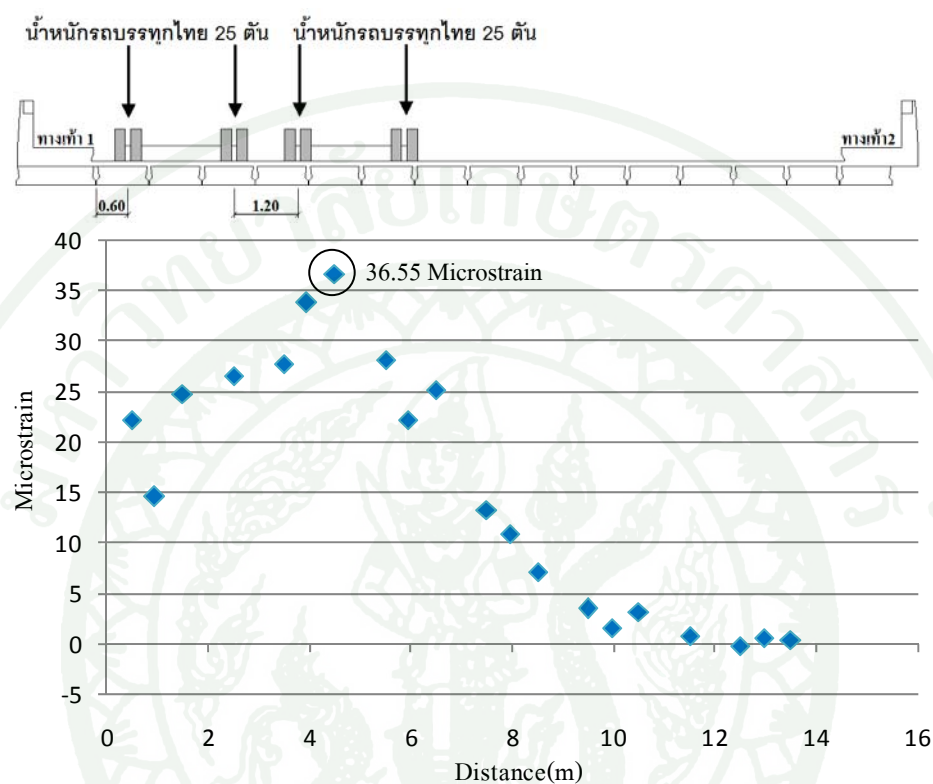
ค่าความเครียดของพื้นสะพานที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิตวัดโดยอุปกรณ์ Strain Gauge ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งใต้ท้องพื้นสะพาน บันทึกด้วยความถี่ 100 Hz แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 80 ซึ่งเป็นผลการทดสอบจากสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่มีโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงเป็นการทดสอบกรณีที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบจอดชิดทางเท้าตำแหน่งกลางความยาวช่วงพาดสะพาน ($L/2$) จำนวนรถบรรทุกทดสอบ 2 คัน ซึ่งป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุด มีค่าความเครียดเฉลี่ยเท่ากับ 36.55 Microstrain



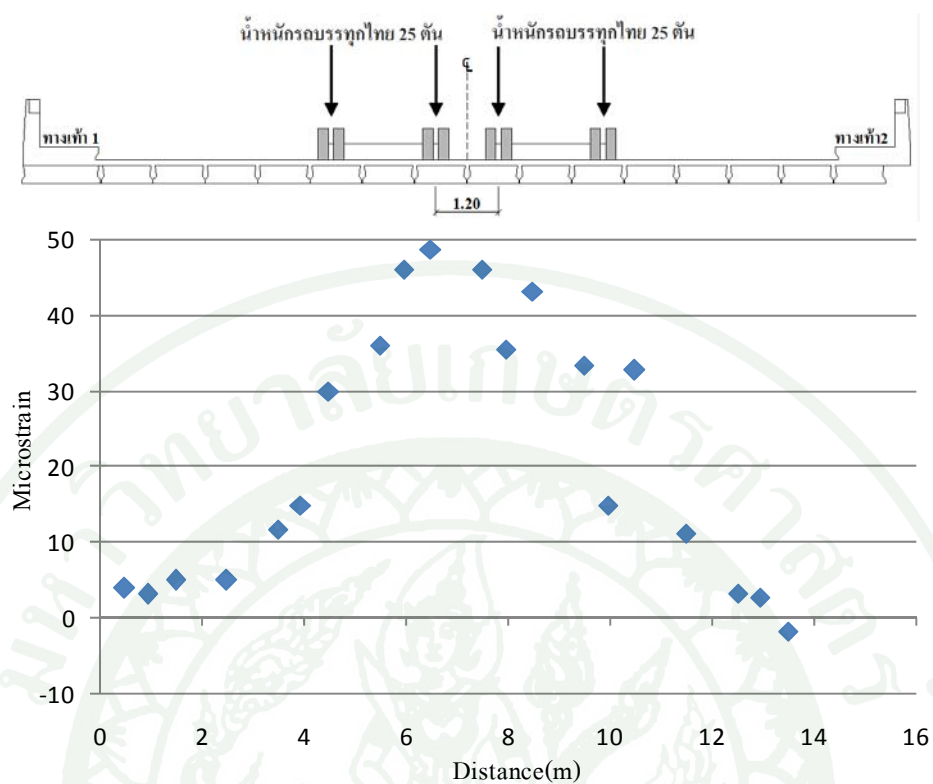
ภาพที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา

เมื่อวิเคราะห์หาค่าความเครียดของพื้นสะพานจากข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิตทุกกรณีการวางน้ำหนักบรรทุกแล้ว นำค่าความเครียดในกรณีที่รถบรรทุกอยู่ตำแหน่งกลางความยาวช่วงพาดสะพาน ($L/2$) เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดมาเขียนกราฟความเครียดตามทิศทางขวางการจราจร แสดงดังภาพที่ 81 ถึง 83 โดยเป็นการวางน้ำหนักบรรทุกชิดจอดทางเท้า 1 น้ำหนักบรรทุกจอดกลางสะพาน และน้ำหนักบรรทุกชิดจอดทางเท้า 2 ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายความเครียดตามทิศทางขวางการจราจรภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทดสอบในกรณีต่างๆ และเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับตำแหน่งของทางเท้า 1 คือ อยู่ทางด้านขวามือเมื่อหันหน้า

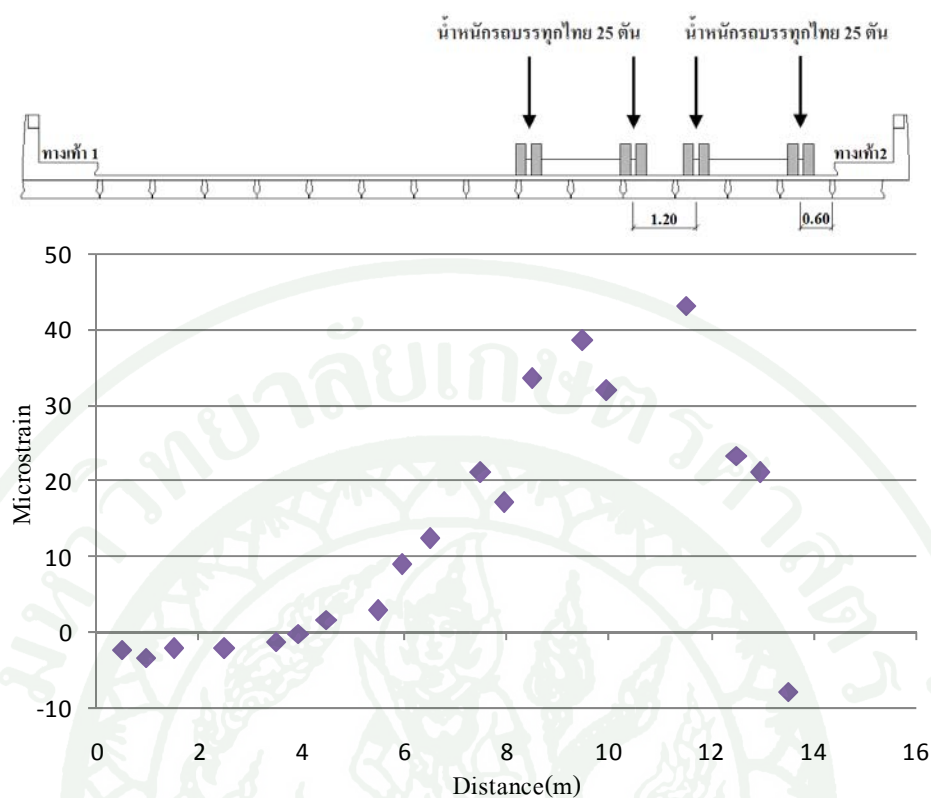
ไปยังถนนเส้นเจริญฯ และตำแหน่งของทางเท้า 2 คือ อยู่ทางด้านขวามือเมื่อหันหน้าไปยังกรมบังคับคดี ซึ่งตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 53



ภาพที่ 81 ความเครียดของพื้นสะพานตามทิศทางขวางการจราจร กรณีน้ำหนักบรรทุกจอดชิดทางเท้า 1



ภาพที่ 82 ความเครียดของพื้นสะพานตามทิศทางขวางการจราจร กรณีน้ำหนักบรรทุกจอดกลางสะพาน



ภาพที่ 83 ความเครียดของพื้นสะพานตามทิศทางขวางการจราจร กรณีน้ำหนักบรรทุกจอดชิดทางเท้า 2

ค่าความเครียดสูงสุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิตซึ่งมีรถบรรทุกทดสอบจำนวน 2 คัน ตำแหน่งกลางช่วงพาดสะพาน ($L/2$) สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีทางเท้าด้านเดียวแสดงดังตารางที่ 32 และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีทางเท้าสองด้านแสดงดังตารางที่ 33

ตารางที่ 32 ความเครียดสูงสุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิต สำหรับ สะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความเครียดสูงสุดใต้พื้นสะพาน					
		กรณีรถบรรทุกทดสอบจอดที่ตำแหน่งต่างๆ (Microstrain)					
		ชิดทางเท้า		กลางสะพาน		ชิดขอบกันตก	
		LT	RT	LT	RT	LT	RT
1	สะพานข้ามคลองเตย	<u>52.29</u>	31.34	<u>58.76</u>	59.05	<u>62.13</u>	37.21
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	<u>39.23</u>	15.33	<u>42.76</u>	31.97	<u>55.63</u>	27.27
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	<u>77.23</u>	<u>49.37</u>	<u>45.16</u>	<u>65.42</u>	<u>55.67</u>	<u>66.22</u>
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	<u>58.74</u>	42.90	<u>56.81</u>	44.99	<u>31.75</u>	48.42
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	<u>59.86</u>	<u>33.06</u>	<u>54.86</u>	<u>30.94</u>	<u>65.67</u>	<u>29.15</u>
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	<u>31.77</u>	<u>29.37</u>	<u>62.87</u>	<u>51.63</u>	<u>32.77</u>	<u>42.62</u>
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	<u>31.65</u>	19.77	<u>52.00</u>	54.61	<u>38.86</u>	14.50
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	<u>48.35</u>	<u>66.92</u>	<u>56.93</u>	<u>53.17</u>	<u>52.90</u>	<u>49.95</u>
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	34.08	23.14	29.57	30.23	35.04	25.43
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	<u>65.92</u>		<u>90.44</u>		<u>38.84</u>	

หมายเหตุ : ตัวเลขที่ขีดเส้นใต้คือ สะพานที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

ตารางที่ 33 ความเครียดสูงสุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้แรงกระทำแบบสถิต สำหรับ สะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความเครียดสูงสุดใต้พื้นสะพาน		
		กรณีรถบรรทุกทดสอบจอดที่ตำแหน่งต่างๆ (Microstrain)		
		ชิดทางเท้า 1	กลางสะพาน	ชิดทางเท้า 2
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	<u>36.55</u>	<u>48.66</u>	<u>43.13</u>
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	<u>44.22</u>	<u>45.58</u>	<u>54.15</u>

หมายเหตุ : ตัวเลขที่ขีดเส้นใต้คือ สะพานที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

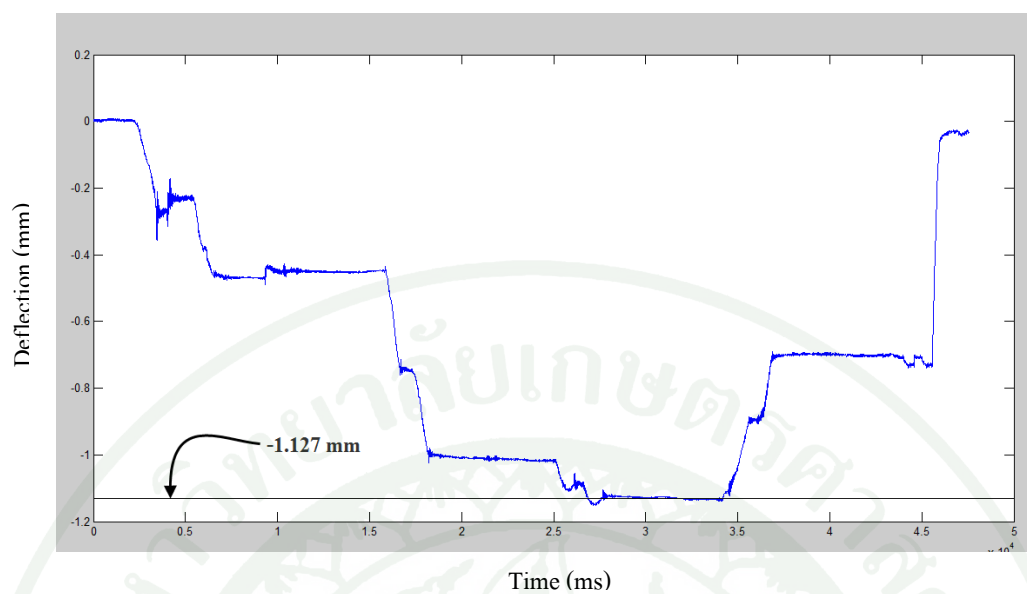
4.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต (Dynamic Amplification Factor, DAF)

ผลการตอบสนองของสะพานหมายถึงค่าความเครียดหรือค่าการโก่งตัวจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพาน DAF เป็นอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานที่เพิ่มขึ้นในสภาวะแรงกระทำแบบพลศาสตร์นอกเหนือจากแรงกระทำแบบสถิต โดยที่ DAF คำนวณได้ดังสมการที่ 7

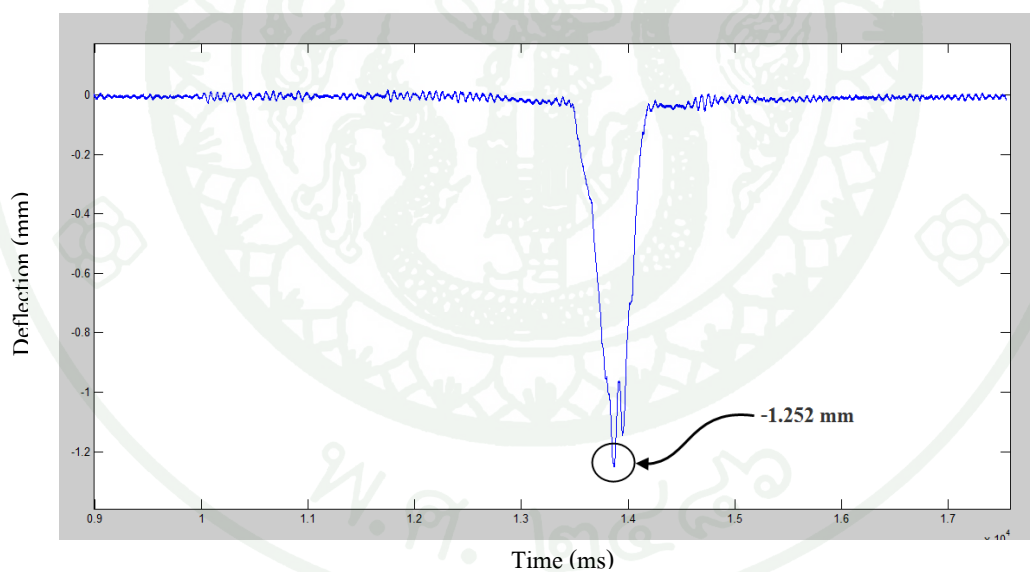
ค่าอัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิตจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ น้ำหนักและความเร็วรถบรรทุกทดสอบ ความลาดชันบริเวณพื้นคอสสะพาน (Approach Slab) ความเรียบของพื้นผิวจราจรบนพื้นสะพาน ความยาวของช่วงพาดสะพาน เป็นต้น ตามมาตรฐาน AASHTO ได้กำหนดให้ค่า DAF มีค่าไม่เกินร้อยละ 33

การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิต หรือ DAF สามารถทำได้โดยใช้ผลต่างระหว่างผลการตอบสนองเชิงพลวัตกับผลตอบสนองเชิงสถิตที่ได้ผลการทดสอบจาก Strain Gauge หรือ Displacement Transducer โดยมีวิธีการดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า DAF นี้ได้นำผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่มีโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร ใช้ค่าการโก่งตัวของโครงสร้างจากอุปกรณ์ทดสอบ Displacement Transducer ณ ตำแหน่ง $L/2$ ของความยาวช่วงพาดสะพาน สำหรับผลการตอบสนองเชิงสถิตได้ใช้การทดสอบน้ำหนักจากรถบรรทุกจำนวน 2 คัน ตำแหน่งจอดกลางสะพาน $L/2$ ของความยาวช่วงพาด สำหรับผลการตอบสนองเชิงพลวัตได้ใช้การทดสอบน้ำหนักจากรถบรรทุกจำนวน 2 คันซึ่งเป็นน้ำหนักเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบการตอบสนองเชิงสถิต วิ่งด้วยความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยผลต่างระหว่างข้อมูลทั้งสองคือค่า DAF แสดงดังภาพที่ 84 และ 85 เมื่อคำนวณตามสมการที่ 7 ค่า DAF เท่ากับร้อยละ 11.06 สำหรับค่า DAF ของสะพานอื่นๆที่นำมาศึกษานี้ได้แสดงในตารางที่ 34



ภาพที่ 84 ค่าการโก่งตัวของสะพานจากการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกเชิงสถิต



ภาพที่ 85 ค่าการโก่งตัวของสะพานจากการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกเชิงพลวัต

ตารางที่ 34 อัตราส่วนระหว่างผลการตอบสนองรวมต่อผลการตอบสนองเชิงสถิติ

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัวของสะพาน (มม.)				DAF (%)	
		LT		RT		LT	RT
		STA	DYN	STA	DYN		
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.91	-1.17	-0.69	-0.74	27.82	6.28
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-1.03	-1.06	-0.95	-1.06	3.44	11.26
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-1.13	-1.25	-1.01	-1.04	11.06	3.42
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-0.92	-0.98	-0.85	-0.89	6.71	4.54
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-1.25	-1.30	-1.09	-1.17	4.15	7.60
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-1.16	-1.22	-1.01	-1.13	5.72	11.89
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-1.19	-1.22	-1.28	-1.33	2.94	3.84
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.74	-0.91	-0.76	-0.90	22.92	18.73
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-0.88	-0.97	-0.74	-0.84	9.89	12.57
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-2.15	-2.24	-	-	4.47	-
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	-0.77	-0.86	-	-	11.89	-
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	-0.53	-0.59	-	-	11.36	-

หมายเหตุ : STA คือ การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกเชิงสถิติ

DYN คือ การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกเชิงพลวัต

ตัวเลขที่ขีดเส้นใต้คือ สะพานที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP

สะพานที่ไม่มีการกรอกฝั่ง RT หมายความว่าโครงสร้างสะพานนั้นไม่ได้มีการแบ่งทิศทางการจราจรเป็น 2 ฝั่ง

ค่า DAF ของสะพานที่นำมาศึกษาอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 2.94 ไปจนถึงร้อยละ 27.82 ซึ่งยังอยู่ในข้อกำหนดของ AASHTO ที่ว่า ค่า DAF ไม่ควรเกินร้อยละ 33 สำหรับสะพานข้ามคลองเตย และบางพลัดที่มีค่า DAF สูงกว่าสะพานอื่นๆ อาจเนื่องมาจากผิวจราจรของสะพานทั้งสองมีความขรุขระทำให้ค่าการโก่งตัวของสะพานขณะที่มีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเชิงพลวัตมีค่าที่สูงและทำให้ค่า DAF มีค่าสูงตามไปด้วย

5. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 สมมติฐานของแบบจำลองโครงสร้างสะพานไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน วิธีการวิเคราะห์เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎี Small Displacement คุณสมบัติของวัสดุที่ระบุในแบบจำลองของแต่ละสะพานได้จากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ โดยแบบจำลองวิเคราะห์บนพื้นฐานสมมติฐานที่ว่าวัสดุคอนกรีตที่พิจารณาอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Linear Elasticity) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ระบุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มาจากการพิจารณาตามมาตรฐาน ACI แสดงดังสมการที่ 25 ค่าลึงอัดคอนกรีตได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างแล้วนำไปทดสอบหาค่าลึงอัดในห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 24

$$E_C = 15,100\sqrt{f_C'} \quad (25)$$

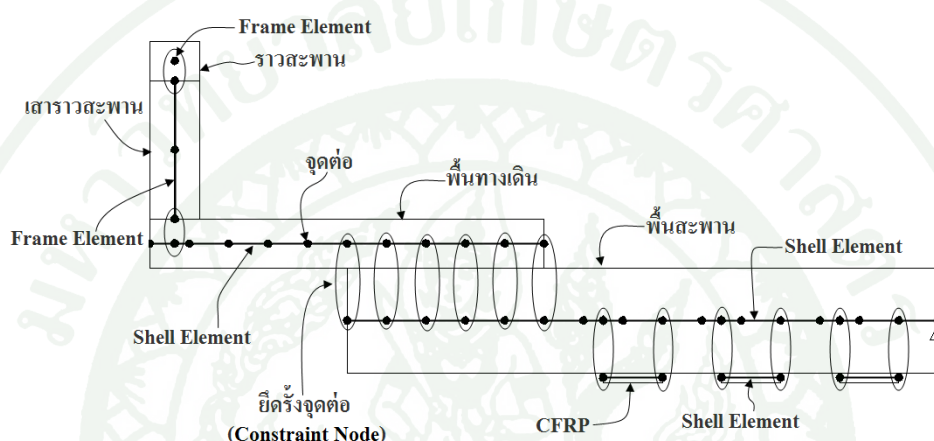
เมื่อ E_C คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (ksc)

f_C' คือ ค่าลึงอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ksc)

5.2 การศึกษาการจำลองโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

การจำลองโครงสร้างสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้โปรแกรม SAP2000 ในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง การจำลองโครงสร้างสะพานใช้เงื่อนไขและสมมติฐานของ Bernoulli-Euler ที่ว่า ระนาบของหน้าตัดยังคงเป็นระนาบหลังจากที่มีการเปลี่ยนรูปร่างแล้ว (Plane Remains Plane) สำหรับเอลิเมนต์ที่ใช้ขึ้นรูปร่างของพื้นสะพาน ทางเท้า และวัสดุเสริมกำลัง CFRP คือเอลิเมนต์แบบแผ่นเปลือกบาง (Thin Shell Element) ใน 1 เอลิเมนต์มีจุดต่อ (Node) 4 จุด แต่ละจุดต่อมีระดับความเสรี (Degree of Freedom, DOF) 3 ระดับ ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y, Z และมีการหมุนได้อย่างอิสระ 3 ทิศทาง ได้แก่ การหมุนรอบแกน X, Y, Z คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง CFRP ที่ระบุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้กำหนดตามตารางที่ 17 ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุ CFRP แบบแผ่นบาง สำหรับราวสะพาน, เสายของราวสะพาน และขอบกันตก ได้มีการจำลองโดยใช้เอลิเมนต์แบบโครงข้อแข็ง (Frame Element) ใน 1 เอลิเมนต์มีจุดต่อ 2 จุด มี 6 DOF เช่นเดียวกับ Shell Element ในส่วนของการยัดรี้งสำหรับโครงสร้างที่ต่างชนิดและต่างระดับกัน เช่น

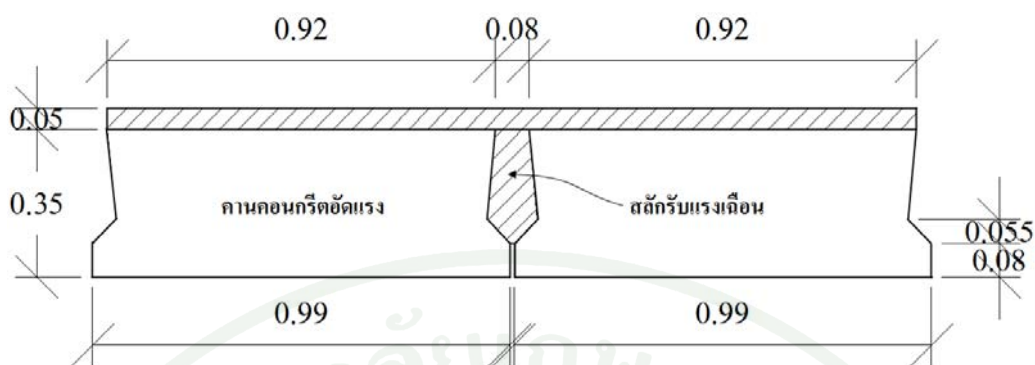
พื้นทางเดินที่ยึดกับพื้นสะพาน และวัสดุเสริมกำลัง CFRP ที่ยึดติดกับพื้นสะพาน ได้ใช้วิธีการเชื่อมจุดต่อโดยวิธียึดรั้งจุดต่อ (Constraint Node) แสดงดังภาพที่ 86 ที่มีการยึดรั้งทั้ง 6 ทิศทาง คือ ยึดรั้งการเคลื่อนที่ (Translation) 3 ทิศในทิศทางแนวแกน X Y และ Z การยึดรั้งการหมุน (Rotation) 3 ทิศ คือ การหมุนรอบแกน X, Y และ Z เพื่อให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงแบบวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) มากที่สุด



ภาพที่ 86 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.3 การศึกษาการจำลองโครงสร้างพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

การจำลองสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงได้ศึกษาการจำลองโดยใช้ Solid Element เนื่องจากหน้าตัดพื้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่มีความซับซ้อน รูปร่างหน้าตัดที่ไม่คงที่พร้อมทั้งยังมีสลักรับแรงเฉือนในการถ่ายแรงจากแผ่นคานไปยังแผ่นคานที่ใกล้เคียง ตัวอย่างหน้าตัดสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง แสดงดังภาพที่ 87

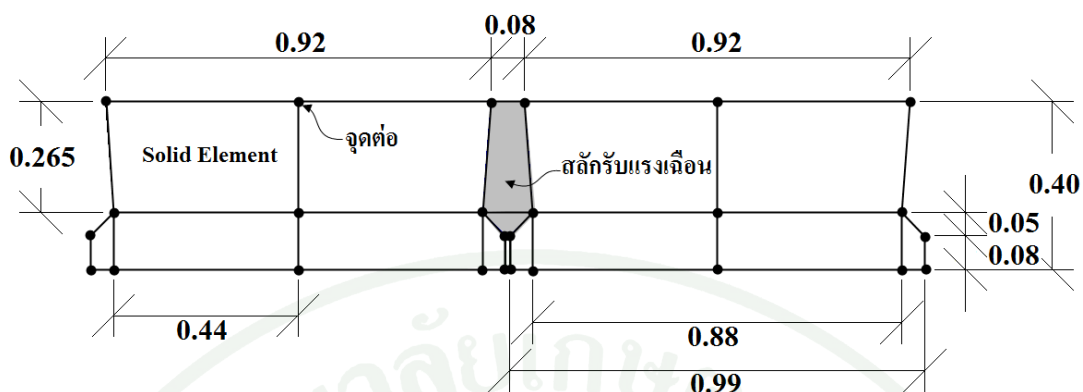


ภาพที่ 87 หน้าตัดของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

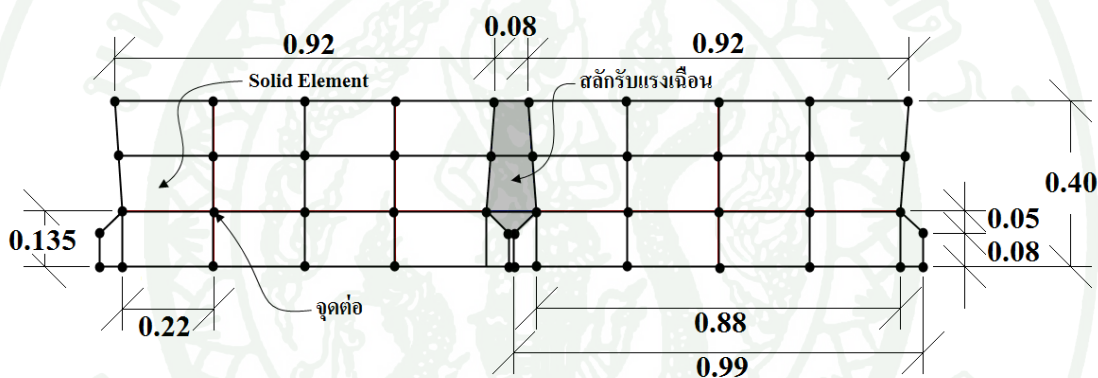
สำหรับ Solid Element มีจำนวน 8 จุดต่อใน 1 เอลิเมนต์ มี 6 DOF เช่นเดียวกับ Shell Element และ Frame Element ในการศึกษาเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้องที่สุดได้ทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวและความเค้นที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของโครงสร้างเอง (Dead Load) การทดลองนี้ได้สร้างตัวอย่าง Solid Element ของแผ่นคานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 2 แผ่นที่มีสลักรับแรงเฉือนถ่ายแรง มีความละเอียดการแบ่งเอลิเมนต์ของจำนวนชั้น (Layer) ที่แตกต่างกันดังนี้คือ 2 ชั้น 3 ชั้น 4 ชั้น และ 8 ชั้น จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Roller รายละเอียดของหน้าตัดแสดงดังภาพที่ 88 ถึง 91 และคุณสมบัติของคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element แสดงดังตารางที่ 35 สำหรับกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ระบุในคุณสมบัติในเอลิเมนต์ได้อ้างอิงจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวง (Standard Drawing 1994)

ตารางที่ 35 คุณสมบัติของคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element

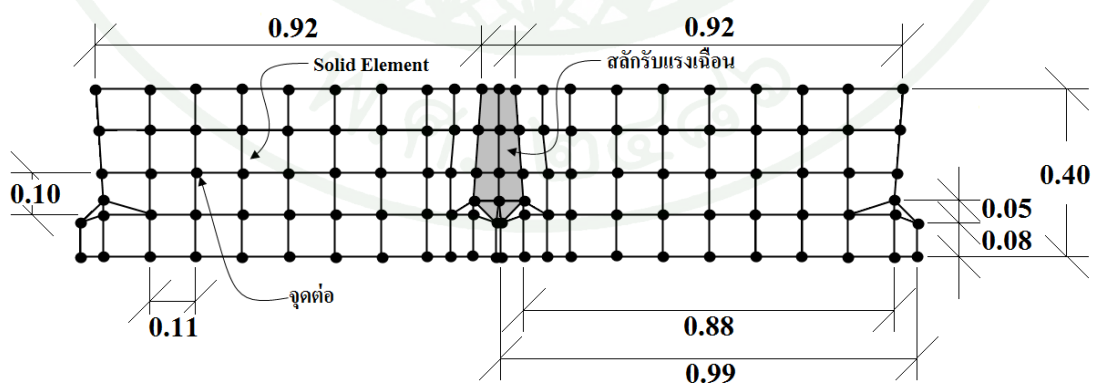
ลำดับ	จำนวนชั้น	ขนาดเอลิเมนต์โดยประมาณ (cm)			กำลังอัดคอนกรีต (ksc)		จำนวน เอลิเมนต์
		กว้าง	ยาว	สูง	แผ่นคาน	สลักรับ แรงเฉือน	
1	2	45	40	25	350	250	392
2	3	22	20	13	350	250	1,550
3	4	11	10	10	350	250	11,000
4	8	5	5	5	350	250	56,200



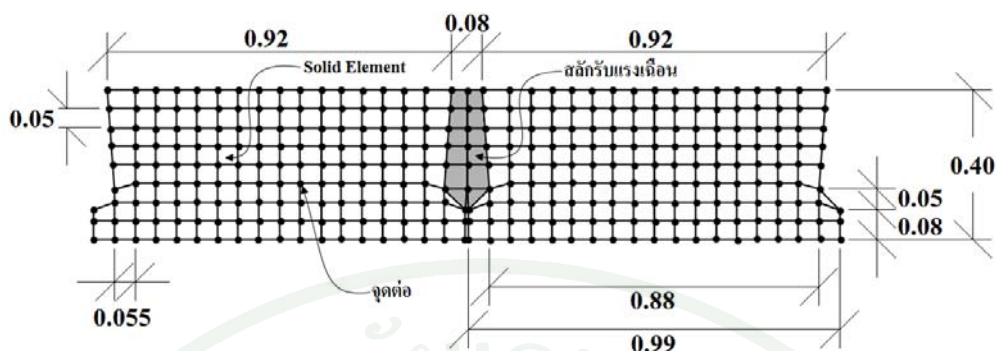
ภาพที่ 88 หน้าตัดของโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 2 ชั้น



ภาพที่ 89 หน้าตัดของโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 3 ชั้น

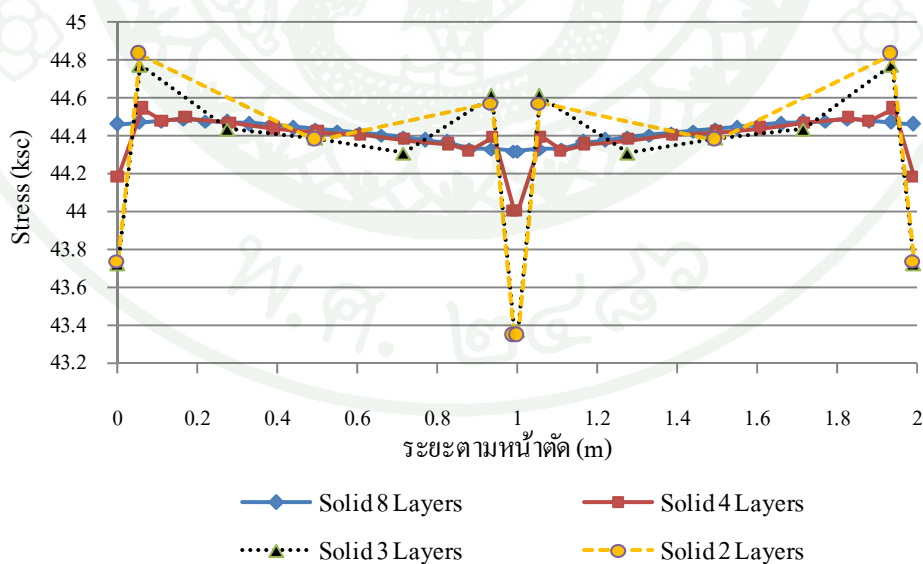


ภาพที่ 90 หน้าตัดของโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 4 ชั้น

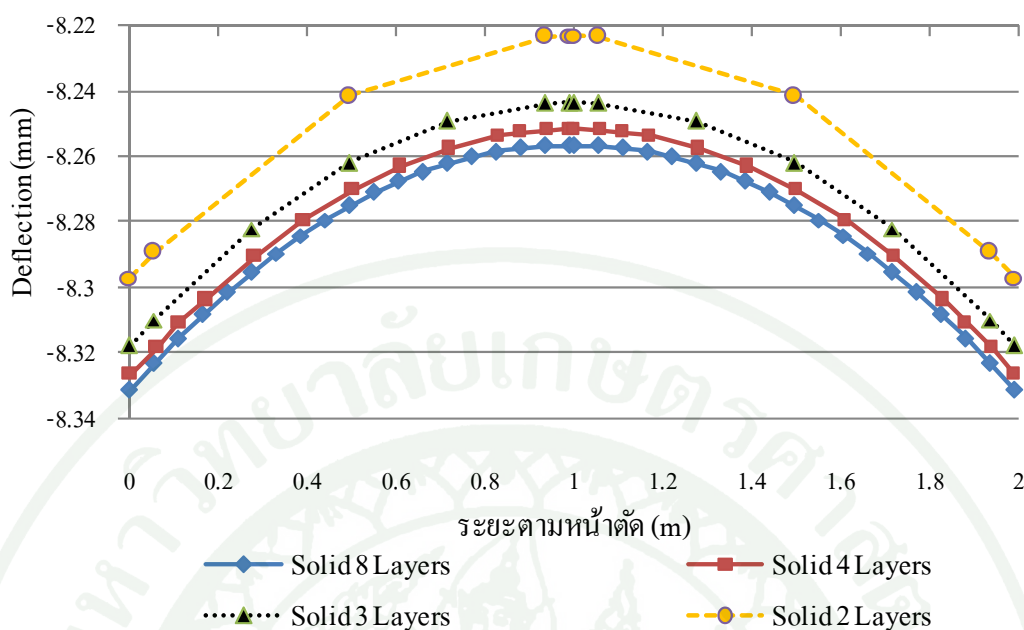


ภาพที่ 91 หน้าตัดของโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Solid Element 8 ชั้น

จากการทดลองพบว่าค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองที่มีการขึ้นรูปด้วย Solid Element จำนวน 2 ชั้น, 3 ชั้น และ 4 ชั้น ได้มีค่าตอบที่คู่เข้า Solid Element จำนวน 8 ชั้น ทั้งค่าความเค้นและค่าการโก่งตัว แสดงดังภาพที่ 92 และ 93 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความแตกต่างสูงสุดของความเค้นดังนี้ ร้อยละ 2.21 ร้อยละ 2.14 และร้อยละ 0.72 เมื่อ Solid Element จำนวน 2 ชั้น 3 ชั้น และ 4 ชั้น เปรียบเทียบกับ Solid Element จำนวน 8 ชั้น ตามลำดับ ค่าความแตกต่างสูงสุดของการโก่งตัวดังนี้ ร้อยละ 0.40 ร้อยละ 0.16 และร้อยละ 0.06 เมื่อ Solid Element จำนวน 2 ชั้น 3 ชั้น และ 4 ชั้น เปรียบเทียบกับ Solid Element จำนวน 8 ชั้น ตามลำดับ

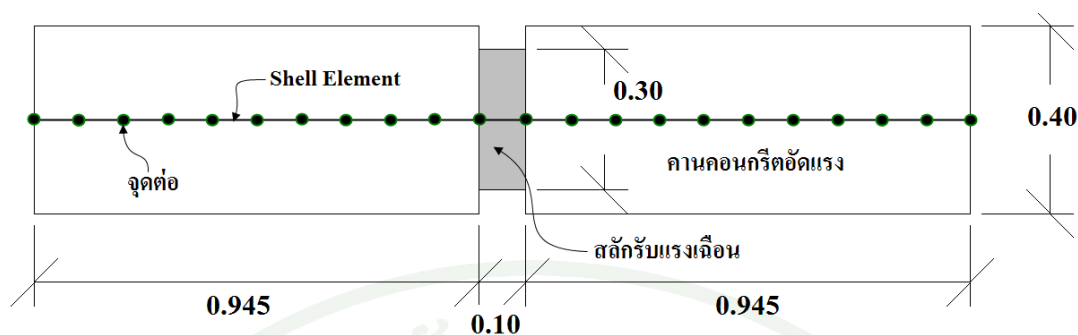


ภาพที่ 92 ความเค้นใต้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Solid Element ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงพาดสะพาน ($L/2$)

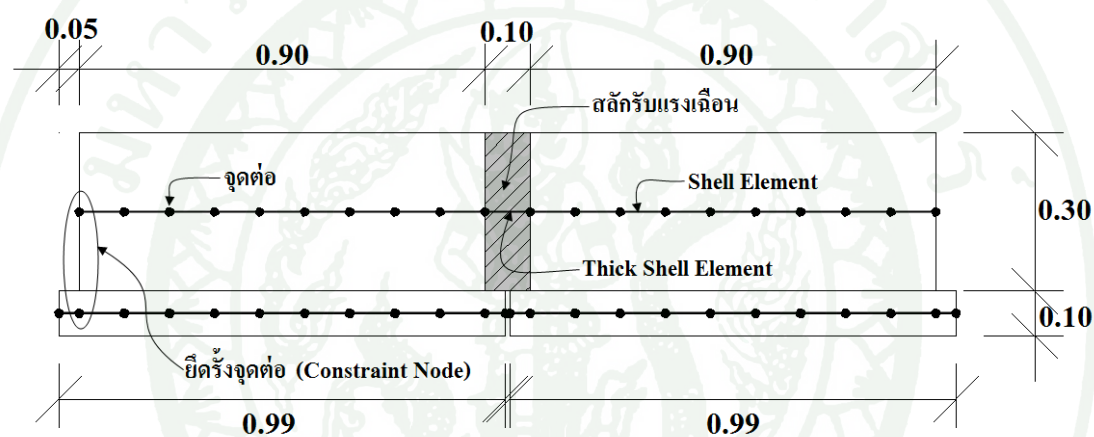


ภาพที่ 93 ค่าโก่งตัวได้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Solid Element ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงพาดสะพาน ($L/2$)

จากการวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงวางเรียงกันจำนวน 2 แผ่น โดย Solid Element พบว่าใช้เวลาในการวิเคราะห์มากเนื่องจากใน 1 เอลิเมนต์มีจำนวนจุดต่อถึง 8 จุดต่อ และจำนวนคานคอนกรีตอัดแรงทั้งสะพานมีด้วยกันทั้งสิ้น 16 แผ่น ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงต้องปรับวิธีการขึ้นรูปของสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงใหม่เพื่อลดระยะเวลาในการวิเคราะห์โดยได้ทดลองวิธีขึ้นรูปคานคอนกรีตอัดแรงโดย Shell Element ที่ใช้วิธีการปรับจำนวนเอลิเมนต์และปรับหน้าตัดให้มีความใกล้เคียงกับแบบมาตรฐานมากที่สุด โดยที่คำตอบจะต้องคู่เข้าแบบจำลองแบบ Solid Element มากที่สุด (Sharpe, 2007) ในการทดลองนี้ได้ใช้การขึ้นรูปโดย Shell Element จำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้นจุดรองรับเป็นแบบ Pin-Roller แสดงดังภาพที่ 94 และ 95 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของโครงสร้างเอง สำหรับการเปรียบเทียบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปโดย Shell Element กับ หน้าตัดจากแบบมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 36



ภาพที่ 94 หน้าตัดของโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element 1 ชั้น



ภาพที่ 95 หน้าตัดของโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element 2 ชั้น

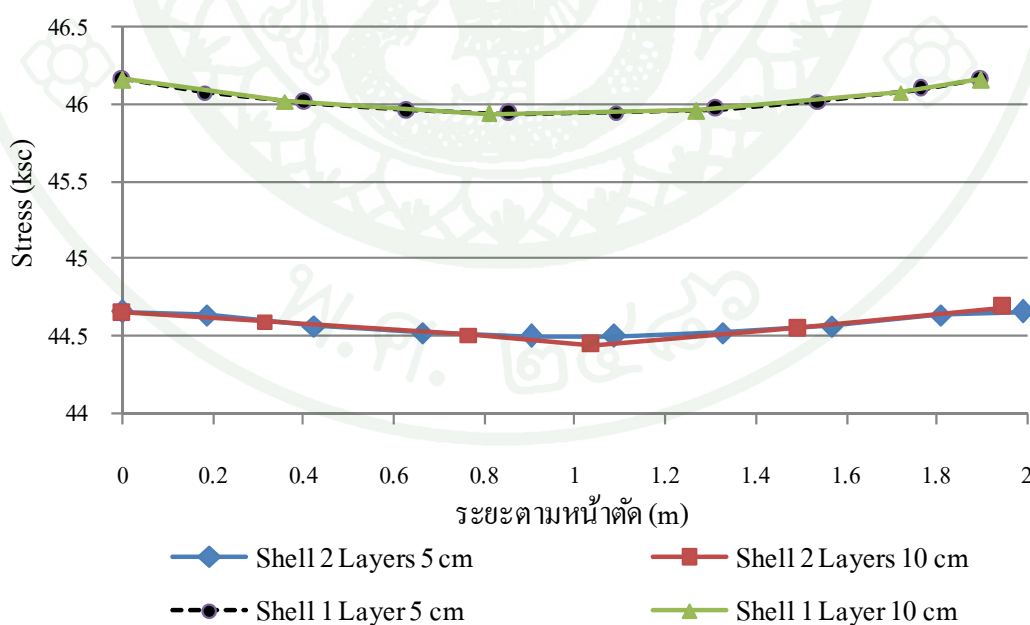
ตารางที่ 36 การเปรียบเทียบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปโดย Shell Element กับหน้าตัดจากแบบมาตรฐาน

แบบหน้าตัด	พื้นที่หน้าตัดคาน	พื้นที่หน้าตัดสลักรับ	ความต่างเมื่อเทียบกับ
คานคอนกรีตอัดแรง	คานคอนกรีตอัดแรง (cm^2)	แรงเฉือน (cm^2)	แบบมาตรฐาน (%)
แบบมาตรฐาน	3,691	301	-
Shell Element 1 Layer	3,780	300	2.35
Shell Element 2 Layers	3,705	270	0.38

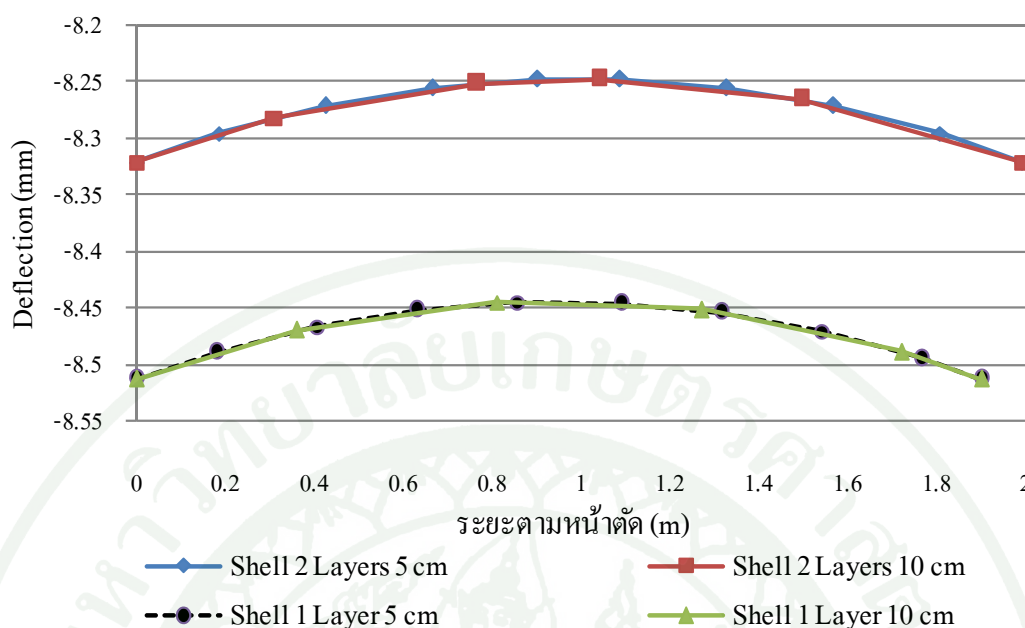
สำหรับหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปโดย Shell Element ทั้ง 1 ชั้น และ 2 ชั้น ได้แบ่งความละเอียดอีกเป็น 2 ระดับ คือ แบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) ขนาด 10 x 10 ซม. และ 5 x 5 ซม. เพื่อให้ในแต่ละระดับได้มีข้อเปรียบเทียบและมีตัวเลือกสำหรับการเลือกใช้รูปแบบการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น คุณสมบัติของคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element แสดงดังตารางที่ 37 และผลการทดลองการขึ้นรูปคานคอนกรีตอัดแรงโดย Shell Element ทั้งค่าความเค้นและค่าการโก่งตัว แสดงดังภาพที่ 96 และ 97 ตามลำดับ

ตารางที่ 37 คุณสมบัติของคานคอนกรีตอัดแรงที่ขึ้นรูปด้วย Shell Element

ลำดับ	จำนวนชั้น	ขนาดเอลิเมนต์ (cm)		กำลังอัดคอนกรีต (ksc)		จำนวนเอลิเมนต์
		กว้าง	ยาว	แผ่นคาน	สลักรับแรงเหวี่ยง	
1	1	10	10	350	250	2,100
2	1	5	5	350	250	8,400
3	2	10	10	350	250	4,600
4	2	5	5	350	250	16,400

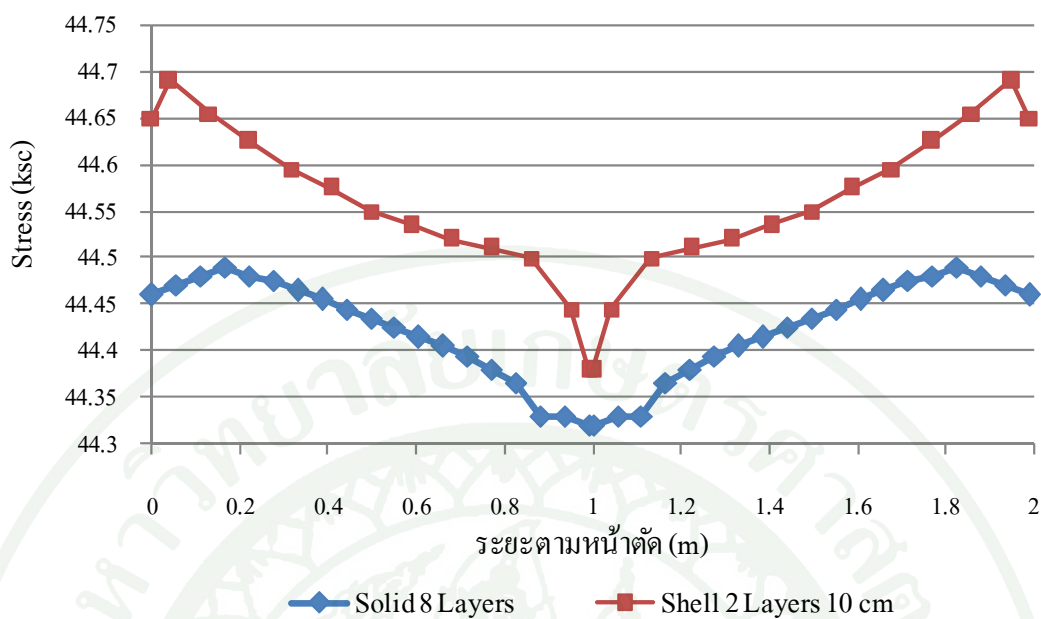


ภาพที่ 96 ความเค้นได้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Shell Element

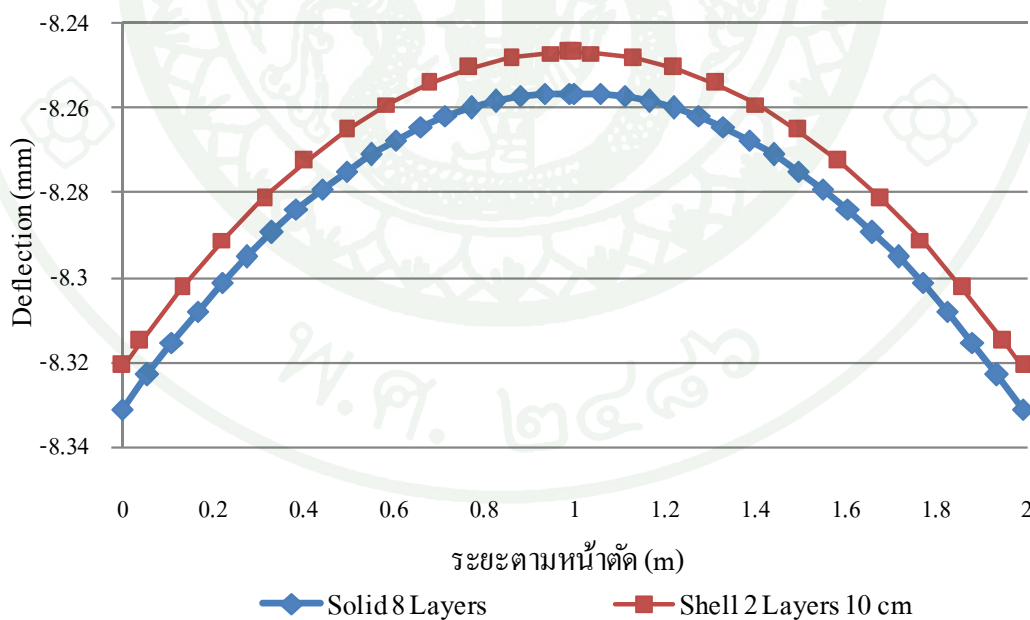


ภาพที่ 97 ค่าโก่งตัวของพื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Shell Element

จากผลการทดลองพบว่าความเค้นและค่าการโก่งตัวของ Shell Element 2 ชั้น แบ่งเอลิเมนต์ขนาด 5 x 5 ซม. มีคำตอบที่คู่เข้าสู่ผลการทดลองของการขึ้นรูปแบบ Solid Element 8 ชั้น โดยที่มีความแตกต่างของค่าความเค้นและค่าการโก่งตัว ร้อยละ 0.45 และร้อยละ 0.13 ตามลำดับ สำหรับ Shell Element 1 ชั้น ยังให้ผลของความเค้นและค่าการโก่งตัวได้ละเอียดน้อยกว่า Shell Element 2 ชั้น ดังนั้นจึงไม่พิจารณาการขึ้นรูปแบบ Shell Element 1 ชั้น สำหรับ Shell Element 2 ชั้น แบ่งเอลิเมนต์ขนาด 10 x 10 ซม. ซึ่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับ Shell Element 2 ชั้น แบ่งเอลิเมนต์ขนาด 5 x 5 ซม. โดยมีค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวแตกต่างกันเพียงร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.01 ตามลำดับ การเปรียบเทียบค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวของ Solid Element กับ Shell Element แสดงดังภาพที่ 98 และ 99 ตามลำดับ โดยที่มีค่าความเค้นและค่าการโก่งตัวแตกต่างกันเพียงร้อยละ 0.50 และ ร้อยละ 0.12 ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เลือกการขึ้นรูปโดย Shell Element 2 ชั้น แบ่งเอลิเมนต์ขนาด 10 x 10 ซม. เนื่องจากใช้เวลาและจำนวนเอลิเมนต์ที่น้อยกว่า Solid Element 8 ชั้น และ Shell Element 2 ชั้น แบ่งเอลิเมนต์ขนาด 5 x 5 ซม. ซึ่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 98 การเปรียบเทียบความเค้นได้พื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Solid Element กับ Shell Element



ภาพที่ 99 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของพื้นคานคอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางจากการขึ้นรูป Solid Element 8 ชั้น กับ Shell Element 2 ชั้น

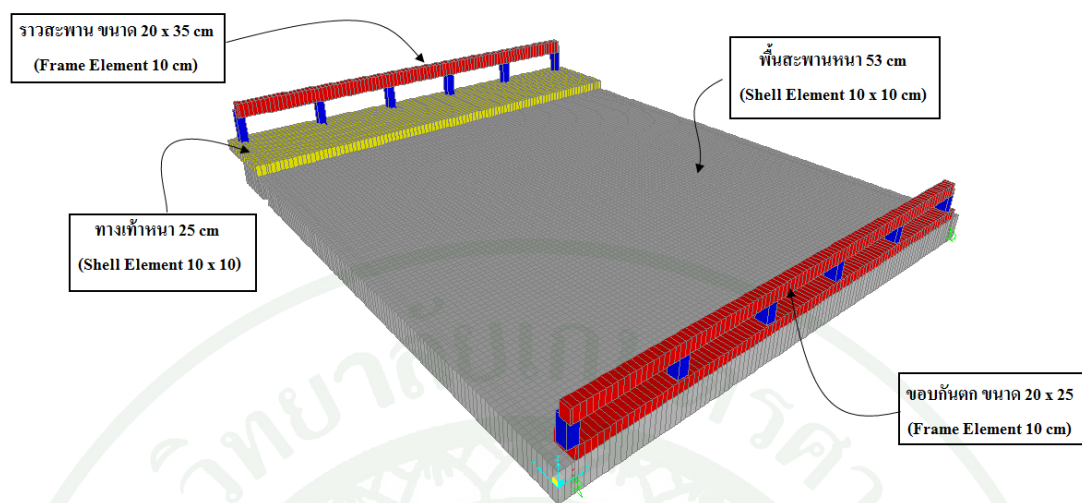
5.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลตอบสนองจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลแบบก่อสร้างและจากการวัดขนาดโครงสร้างสะพานในภาคสนามถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของโครงสร้างสะพานจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานตามคำแนะนำจากมาตรฐาน AASHTO Manual for Condition Evaluation of Bridge (2008) เพื่อให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสะพานที่พิจารณามากที่สุด วิธีการปรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานทำโดยการปรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและปรับค่าการยึดรั้งบริเวณจอร์จรับของสะพานแล้วเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ ค่าการโก่งตัว และค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน

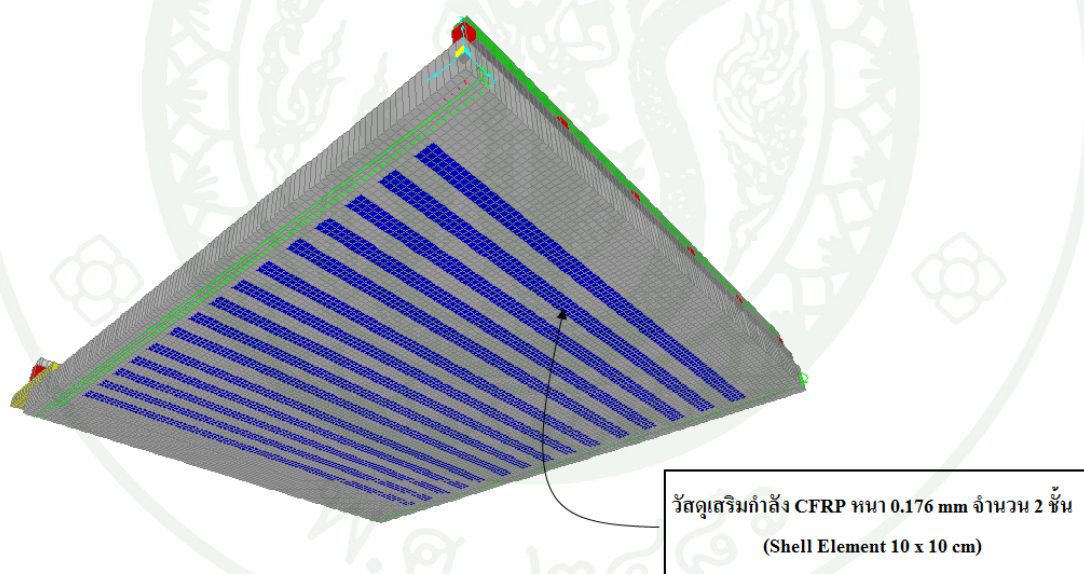
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แบ่งลักษณะของโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน คือ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง เนื่องจากวิธีการขึ้นรูปของโครงสร้างที่มีความแตกต่างกัน

5.4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

สะพานแบบพื้นสำหรับการศึกษา มีลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกันคือ มีจำนวน 1 ช่วงสะพาน (Span) ยาว 10 เมตร กว้าง 9.9 เมตร พื้นสะพานและพื้นทางเดินหนา 53 เซนติเมตร และ 25 เซนติเมตรตามลำดับ มีทางเท้าและขอบกันตลิ่งอย่างละ 1 ด้าน มีเพียงสะพานข้ามคลองบางพลัดเท่านั้นที่มีความแตกต่างคือ มีจำนวน 3 ช่วงพาดสะพาน ยาวช่วงละ 6 เมตร พื้นสะพานและพื้นทางเดินหนา 40 เซนติเมตร และ 25 เซนติเมตรตามลำดับ สำหรับตัวอย่างสะพานที่นำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน คือ สะพานข้ามคลองสะพานยาว ผังซ้าย ที่มีการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ขนาดเอลิเมนต์สำหรับ Shell Element เท่ากับ 10 x 10 เซนติเมตร กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 334 กก./ซม.² ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวส่วนเหนือพื้นและส่วนใต้พื้นสะพานแสดงดังภาพที่ 100 และ 101 ตามลำดับ

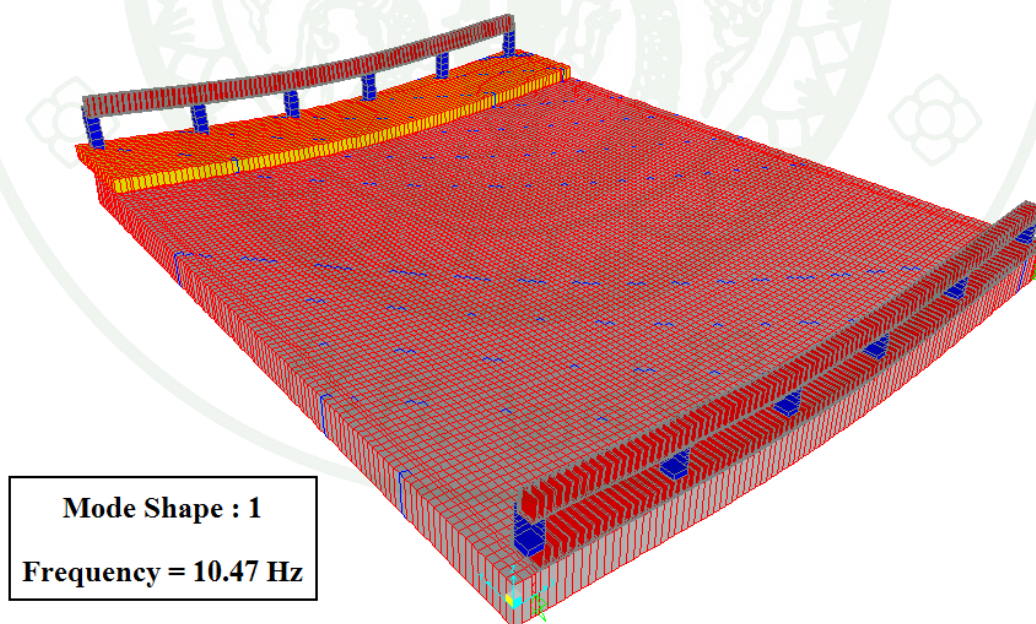


ภาพที่ 100 ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของพื้นสะพานแบบ Slab Type ด้านบน



ภาพที่ 101 ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของพื้นสะพานแบบ Slab Type ด้านล่าง

จากการวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนการปรับแบบจำลอง มีค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 10.47 Hz ซึ่งเป็นเป็นโหมดการสั่นไหวโหมดที่ 1 แสดงดังภาพที่ 102 โดยที่ค่าความถี่ธรรมชาติเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน เท่ากับ 13.25 Hz มีความแตกต่างกันร้อยละ 20.98 ซึ่งยังมีความแตกต่างกันมาก ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นต้องมีการปรับเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยปรับค่าการยึดรั้งบริเวณจุดรองรับของสะพาน โดยการปรับค่า Rotational Stiffness เป็นการลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกว่าค่าความถี่ธรรมชาติและค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งของพื้นสะพานจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน สำหรับการปรับค่า Rotational Stiffness ของสะพานที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 0.65×10^6 kg-m/rad มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 12.52 Hz มีความแตกต่างจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานเท่ากับร้อยละ 5.51 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ยังคงเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งของพื้นสะพานให้มีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาติและการโก่งตัวจะต้องมีความสอดคล้องกัน การปรับเทียบค่าความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งฝั่งซ้ายและฝั่งขวา แสดงดังตารางที่ 38 และ 39 ตามลำดับ



ภาพที่ 102 การสั่นไหวโหมด 1 จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

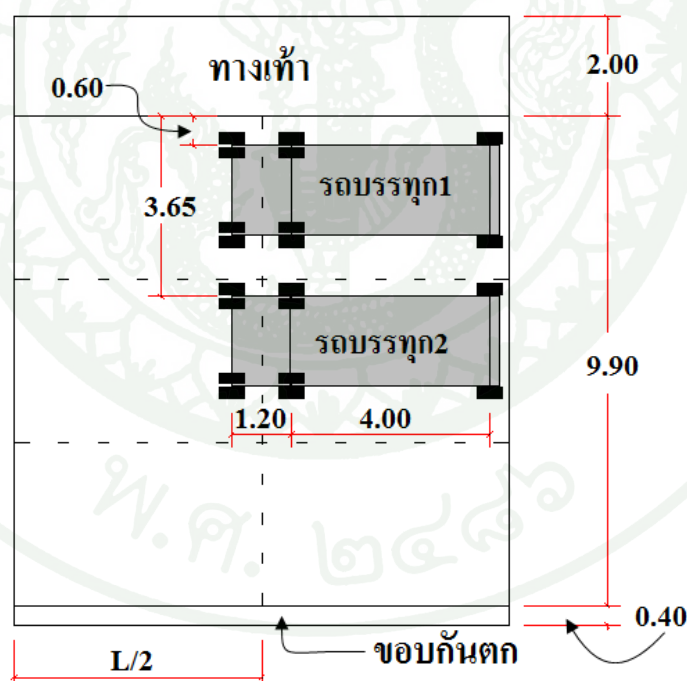
ตารางที่ 38 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแบบพื้นฝังซ้าย

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)					Rotational Stiffness (kg-m/rad)		
		(1)	วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์			(3)			
			จากการ ทดสอบ น้ำหนัก บรรทุก	(2) จากรูปแบบ Pin-Pin	ความ ต่าง 1&2 (%)				
								จากรูปแบบ Pin-Pin และปรับ ให้มี Rotational Stiffness	ความ ต่าง 1&3 (%)
1	สะพานข้าม คลองเตย	13.63 Hz	10.62 Hz	22.08	13.54 Hz	0.70	1.20 x 10 ⁶		
2	สะพานข้ามคลอง บางอ้อ	12.56 Hz	10.56 Hz	16.53	12.28 Hz	2.92	0.60 x 10 ⁶		
3	สะพานข้ามคลอง สะพานยาว	13.25 Hz	10.47 Hz	20.98	12.52 Hz	5.51	0.65 x 10 ⁶		
4	สะพานข้ามคลอง มอญ 1	13.38 Hz	9.28 Hz	30.63	12.79 Hz	4.39	1.50 x 10 ⁶		
5	สะพานข้ามคลอง เตาอิฐ	12.67 Hz	9.95 Hz	21.47	11.97 Hz	5.54	0.70 x 10 ⁶		
6	สะพานข้ามคลอง บางรัก	14.09 Hz	10.34 Hz	26.65	12.63 Hz	10.37	0.95 x 10 ⁶		
7	สะพานข้ามคลอง บางพระครู	11.60 Hz	10.34 Hz	10.91	11.58 Hz	0.91	0.40 x 10 ⁶		
8	สะพานข้ามคลอง บางพลัด	25.58 Hz	18.23 Hz	28.71	23.00 Hz	10.07	0.50 x 10 ⁶		
9	สะพานข้ามคลอง บางพลู	13.13 Hz	9.73 Hz	25.88	12.74 Hz	2.96	1.20 x 10 ⁶		
10	สะพานข้ามคลอง บางขุนนนท์	11.47 Hz	11.62 Hz	-1.30	-	-	-		

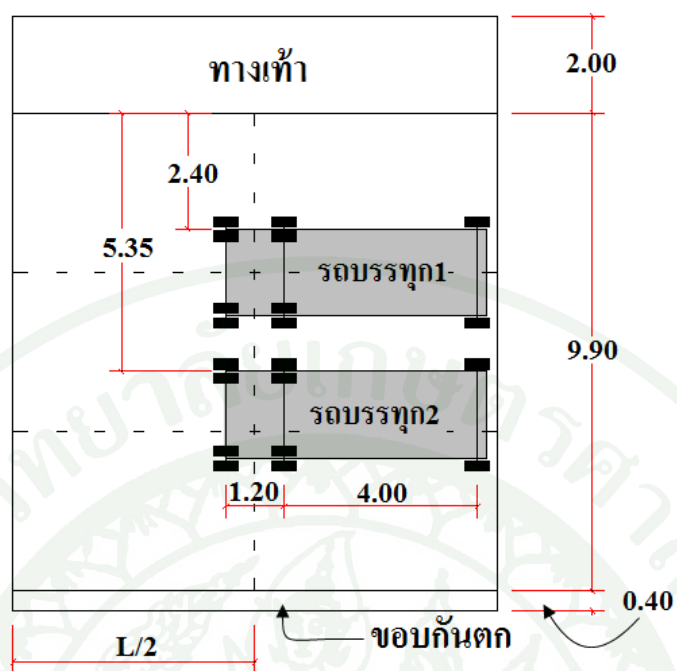
ตารางที่ 39 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแบบพื้นฝังขว

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)					Rotational Stiffness (kg-m/rad)
		(1)	วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์			ความ ต่าง 1&3 (%)	
			(2)	ความ ต่าง 1&2 (%)	(3) จตุรกรรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับ ให้มี Rotational Stiffness		
1	สะพานข้าม คลองเตย	13.73 Hz	10.50 Hz	23.55	13.42 Hz	2.26	1.20 x 10 ⁶
2	สะพานข้ามคลอง บางอ้อ	13.45 Hz	10.43 Hz	22.43	13.36 Hz	0.63	1.20 x 10 ⁶
3	สะพานข้ามคลอง สะพานยาว	13.52 Hz	10.41 Hz	23.00	13.34 Hz	1.27	1.20 x 10 ⁶
4	สะพานข้ามคลอง มอญ 1	13.45 Hz	9.17 Hz	31.86	12.69 Hz	5.65	1.50 x 10 ⁶
5	สะพานข้ามคลอง เตาอิฐ	13.37 Hz	9.95 Hz	25.57	12.19 Hz	8.86	0.80 x 10 ⁶
6	สะพานข้ามคลอง บางรัก	13.80 Hz	10.34 Hz	25.12	12.7 Hz	7.77	0.90 x 10 ⁶
7	สะพานข้ามคลอง บางพระครู	11.13 Hz	10.21 Hz	8.23	11.32 Hz	-1.75	0.20 x 10 ⁶
8	สะพานข้ามคลอง บางพลัด	22.06 Hz	18.23 Hz	17.34	23.00 Hz	-4.27	0.50 x 10 ⁶
9	สะพานข้ามคลอง บางพลู	16.03 Hz	9.73 Hz	39.30	13.86 Hz	13.56	2.00 x 10 ⁶
10	สะพานข้ามคลอง บางขุนนนท์	11.47 Hz	11.62 Hz	-1.30	-	-	-

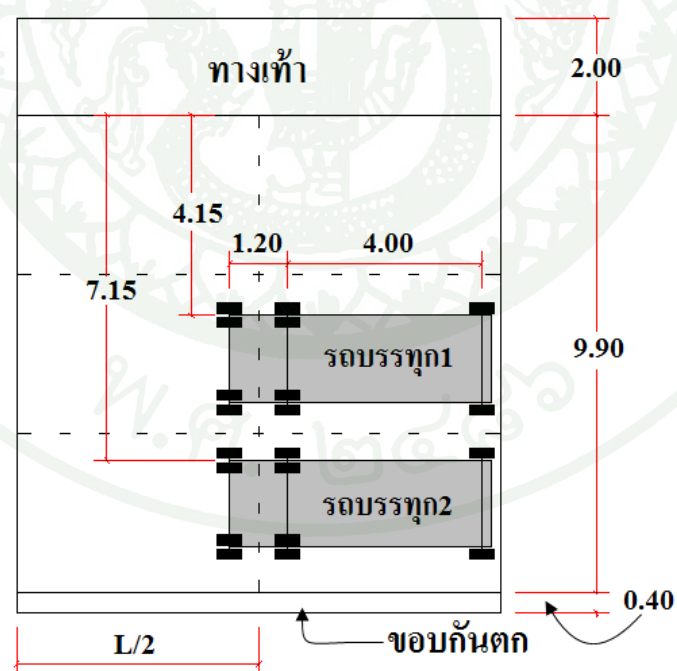
การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงสถิติของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน โดยผลที่นำมาเปรียบเทียบคือค่าการโก่งตัวของโครงสร้างที่ได้ผลมาจากอุปกรณ์ LVDT (Linear Variable Differential Transformers) และค่าความเครียดบริเวณใต้พื้นสะพานที่ได้ผลมาจาก Strain Gauge เกิดขึ้นในช่วงที่โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น สำหรับรถบรรทุกทดสอบมีจำนวน 2 คัน มีน้ำหนักทดสอบเท่ากับ 23,270 กก. และ 23,730 กก. ตามลำดับ ตำแหน่งของรถบรรทุกทดสอบได้กำหนดให้กึ่งกลางของเพลาลังอยู่ที่ $L/2$ ของความยาวช่วงพาดสะพาน (5 เมตร) เพื่อให้เกิดการโก่งตัวและความเครียดสูงสุดสำหรับการทดสอบสะพาน การวางน้ำหนักบรรทุกทุกทดสอบสำหรับสะพานที่พิจารณา 3 กรณี คือ วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า (Edge Load) วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกึ่งกลางสะพาน (Center Load) และวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันต (Edge Load) แสดงดังภาพที่ 103 ถึง 105 ตามลำดับ ระยะห่างของรถบรรทุกที่แสดงในภาพคือระยะที่วัดได้ตามจริงขณะทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน มีหน่วยเป็นเมตร



ภาพที่ 103 การวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้าสำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว

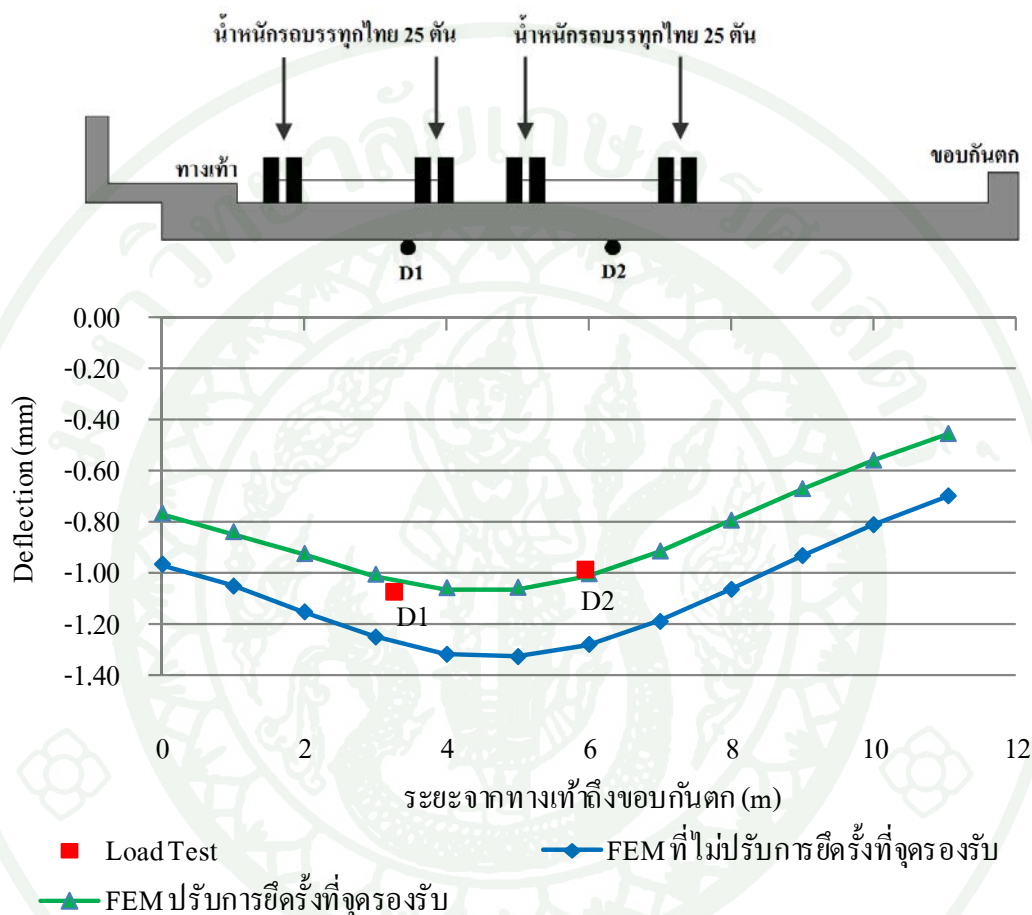


ภาพที่ 104 การวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกลางสะพานสำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว



ภาพที่ 105 การวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตกสำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว

ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งของโครงสร้างพื้นสะพานระหว่างการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานข้ามคลองสะพานยาวทั้ง 3 กรณี แสดงดังภาพที่ 106 ถึง 108 ตามลำดับ

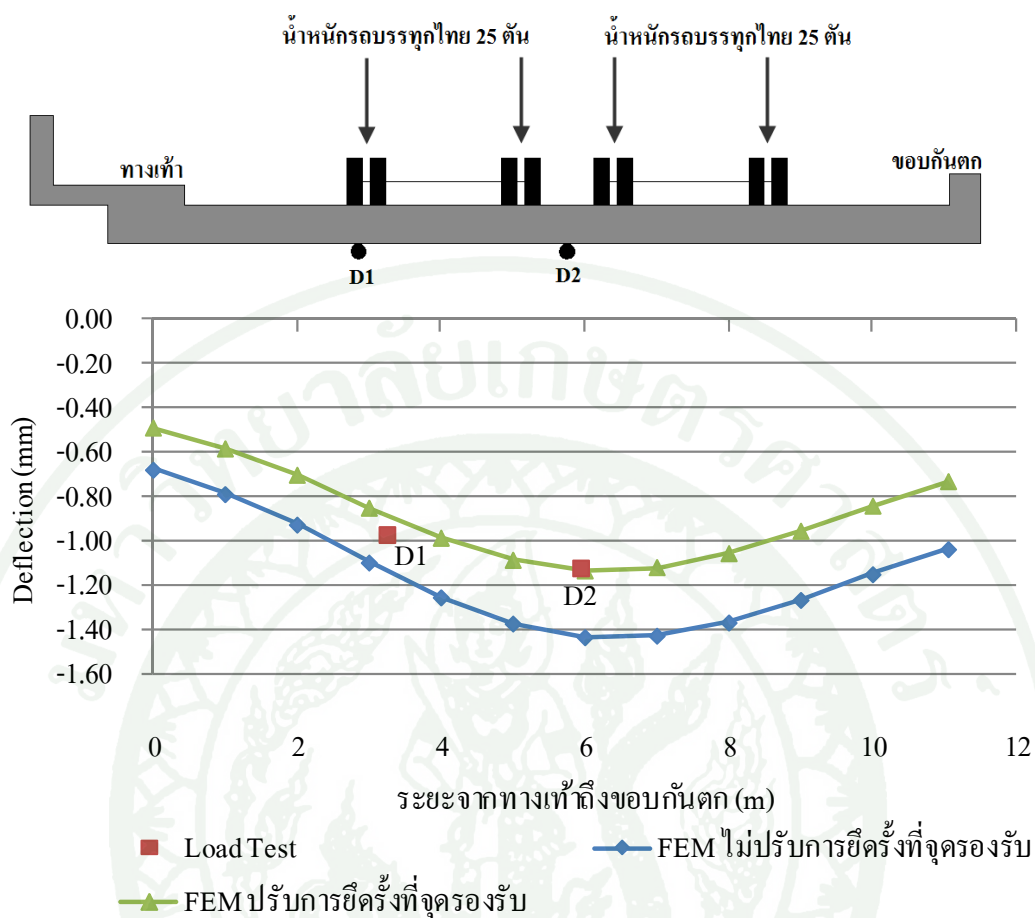


หมายเหตุ : สัญลักษณ์ D1 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากขอบทางเท้า 2.25 ม.

สัญลักษณ์ D2 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากขอบทางเท้า 5.95 ม.

ภาพที่ 106 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

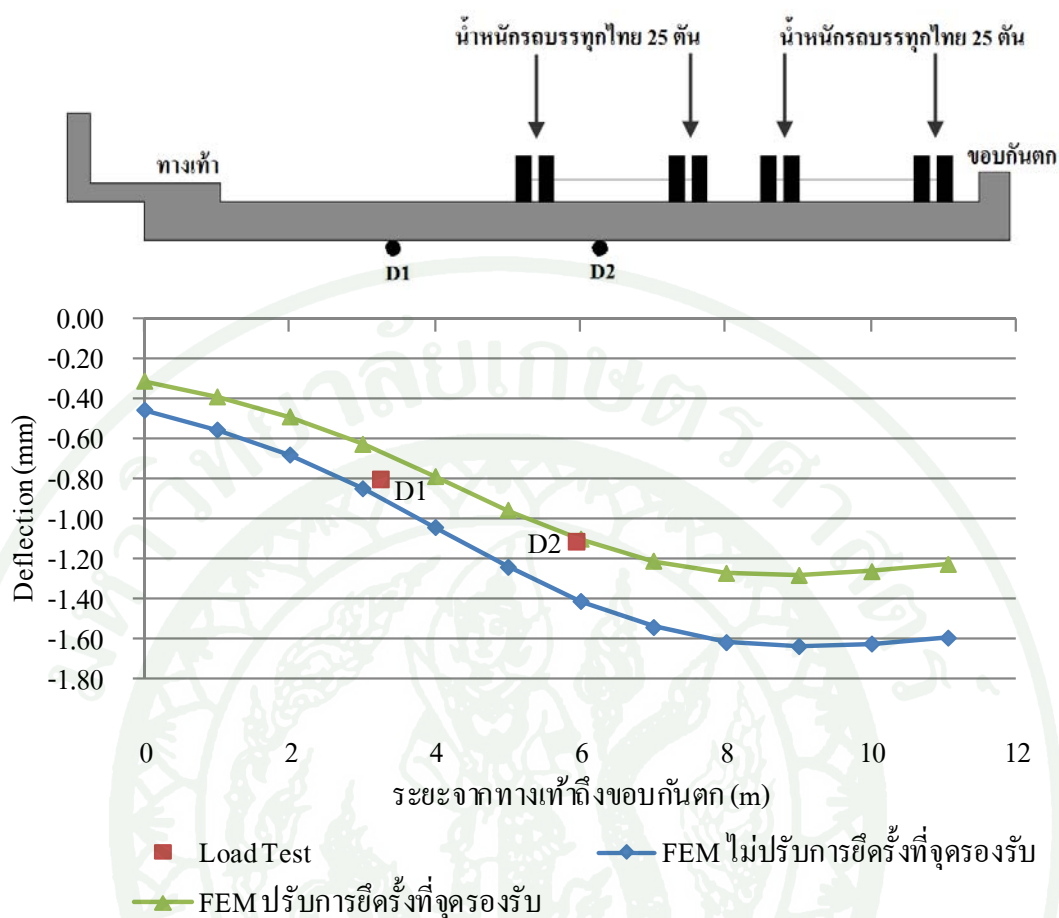
ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานโดยการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้าพบว่ามีความแตกต่างร้อยละ 19.37 และร้อยละ 3.59 ระหว่างการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีและมีการปรับการยึดรั้งบริเวณจุดรองรับตามลำดับ



หมายเหตุ : สัญลักษณ์ D1 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากขอบทางเท้า 2.25 ม.
 สัญลักษณ์ D2 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากขอบทางเท้า 5.95 ม.

ภาพที่ 107 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวตั้งจากการวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานโดยการวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพานพบว่ามีความแตกต่างร้อยละ 18.16 และร้อยละ 4.41 ระหว่างการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีและมีการปรับการยัดตั้งบริเวณจุดรองรับตามลำดับ



หมายเหตุ : สัญลักษณ์ D1 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากขอบทางเท้า 2.25 ม.
 สัญลักษณ์ D2 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากขอบทางเท้า 5.95 ม.

ภาพที่ 108 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตล

ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานโดยการวางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตลว่ามีความแตกต่างร้อยละ 15.10 และร้อยละ 9.76 ระหว่างการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีและมีการปรับการยัดตั้งบริเวณจุดรองรับตามลำดับ

จากผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานของการวางน้ำหนักบรรทุก ทั้ง 3 รูปแบบพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่ได้ปรับจูนรองรับเพิ่ม Rotational Stiffness มีความแตกต่างจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ร้อยละ 15.10 ถึงร้อยละ 19.37 ประกอบกับ ค่าความถี่ธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 20.43 ซึ่งมีความแตกต่างกันมากยังไม่ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ปรับจูนรองรับเพิ่ม Rotational Stiffness เท่ากับ 0.55×10^6 kg-m/rad มีความแตกต่างจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ร้อยละ 3.59 ถึงร้อยละ 9.76 และค่าความถี่ธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 9.81 ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ สำหรับการเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของพื้นสะพานจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้นทั้งฝั่งซ้ายและฝั่งขวาทั้ง 3 กรณี ของตำแหน่งการวางน้ำหนักบรรทุก แสดงดังตารางที่ 40 ถึง 45 ตามลำดับ

ตารางที่ 40 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดขอบทางเท่า

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัว (mm)							
		วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์							
		(1)		(2)		ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)		ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบ น้ำหนักบรรทุก		จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin			จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness		
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.83	-0.57	-1.32	-0.89	36.51	-0.91	-0.57	5.09
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-1.02	-0.93	-1.23	-1.25	21.78	-0.99	-0.98	4.45
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-1.08	-0.98	-1.27	-1.28	19.37	-1.03	-1.01	3.59
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-1.05	-0.98	-1.64	-1.62	37.41	-1.03	-0.97	2.23
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-1.16	-1.17	-1.47	-1.48	20.77	-1.12	-1.09	5.24
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-1.10	-1.09	-1.37	-1.37	19.96	-1.02	0.99	8.35
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-1.22	-1.13	-1.45	-1.41	18.15	-1.23	-1.17	2.40
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.74	-0.56	-1.21	-0.83	35.84	-0.81	-0.53	7.36
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-1.04	-0.68	-1.59	-1.07	35.57	-1.05	-0.65	2.88
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-2.73	-1.21	-2.42	-1.09	7.29	-	-	-

ตารางที่ 41 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัว (mm)							
		วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์							
		(1)		(2)		ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)		ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบ น้ำหนักบรรทุก		จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin			จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness		
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.91	-0.63	-1.33	-1.13	37.83	-0.96	-0.60	5.07
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-0.94	-1.03	-1.14	-1.37	21.39	-0.89	-1.07	4.72
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-0.97	-1.13	-1.14	-1.43	18.16	-0.89	-1.14	4.41
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-0.92	-1.04	-1.54	-1.72	38.25	-0.86	-1.03	3.40
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-0.98	-1.25	-1.29	-1.63	23.96	-0.94	-1.21	3.19
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-0.92	-1.16	-1.21	-1.51	23.74	-0.86	-1.10	5.70
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-1.02	-1.19	-1.29	-1.59	23.24	-1.07	-1.33	7.49
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.88	-0.72	-1.50	-1.13	35.85	-1.02	-0.66	10.84
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-0.88	-0.65	-1.67	-1.12	44.50	-1.09	-0.67	11.42
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-1.33	-2.30	-1.20	-2.28	5.12	-	-	-

ตารางที่ 42 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดขอบคันตก

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัว (mm)							
		วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์							
		(1)		(2)		ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)		ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบ น้ำหนักบรรทุก		จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin			จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness		
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.62	-0.88	-1.06	-1.25	35.85	-0.53	-0.85	8.25
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-0.70	-0.99	-0.86	-1.34	22.70	-0.63	-1.03	7.01
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-0.80	-1.12	-0.89	-1.40	15.10	-0.66	-1.09	9.76
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-0.66	-0.98	-1.11	-1.73	42.35	-0.57	-1.00	7.76
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-0.71	-1.17	-1.00	-1.59	27.71	-0.67	-1.15	3.64
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-0.69	-1.07	-0.99	-1.49	29.12	-0.66	-1.06	3.11
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-0.79	-1.14	-1.03	-1.56	24.76	-0.81	-1.28	6.53
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.63	-0.76	-0.93	-1.34	38.10	-0.58	-0.89	11.34
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-0.57	-0.95	-1.02	-1.52	40.97	-0.59	-0.94	2.18
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-2.15	-1.93	-1.92	-1.97	6.26	-	-	-

ตารางที่ 43 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดขอบทางเท้า

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัว (mm)							
		วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์							
		(1)		(2)		ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)		ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบ น้ำหนักบรรทุก		จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin			จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness		
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.93	-0.58	-1.33	-0.92	33.67	-0.91	-0.57	2.55
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-0.92	-0.90	-1.35	-1.35	32.79	-0.93	-0.90	0.73
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-0.97	-0.92	-1.34	-1.36	30.00	-0.92	-0.91	3.10
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-1.06	-1.00	-1.64	-1.61	36.68	-1.01	-0.95	4.65
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-1.10	-1.00	-1.43	-1.45	27.12	-1.07	-1.04	3.47
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-1.01	-0.94	-1.31	-1.30	25.40	-0.96	-0.92	3.17
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-1.19	-1.16	-1.44	-1.45	18.78	-1.23	-1.22	0.59
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.55	-0.76	-0.85	-1.23	36.51	-0.54	-0.82	2.55
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-0.86	-0.59	-1.56	-1.05	44.49	-0.90	-0.54	6.58
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-2.73	-1.21	-2.42	-1.09	7.29	-	-	-

ตารางที่ 44 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัว (mm)							
		วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์							
		(1)		(2)		ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)		ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบ		จุดรองรับเป็นแบบ			จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin		
		น้ำหนักบรรทุก		Pin-Pin			และปรับให้มี Rotational	Stiffness	
D1	D2	D1	D2	D1	D2				
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.69	-1.04	-0.99	-1.43	28.54	-0.60	-0.97	10.03
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-0.81	-0.95	-1.22	-1.47	34.56	-0.81	-0.98	1.57
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-0.86	-1.01	-1.20	-1.49	30.27	-0.79	-1.00	4.83
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-0.85	-1.06	-1.46	-1.78	40.99	-0.85	-1.05	0.62
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-1.04	-1.09	-1.26	-1.59	24.56	-0.91	-1.15	9.15
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-0.86	-1.01	-1.20	-1.45	29.94	-0.85	-1.04	1.70
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-1.02	-1.28	-1.30	-1.61	20.83	-1.08	-1.36	5.77
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.66	-0.92	-1.04	-1.51	37.87	-0.67	-1.03	5.72
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-0.57	-0.74	-1.11	-1.66	51.95	-0.57	-0.96	11.28
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-1.33	-2.30	-1.20	-2.28	5.12	-	-	-

ตารางที่ 45 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดขอบคันตก

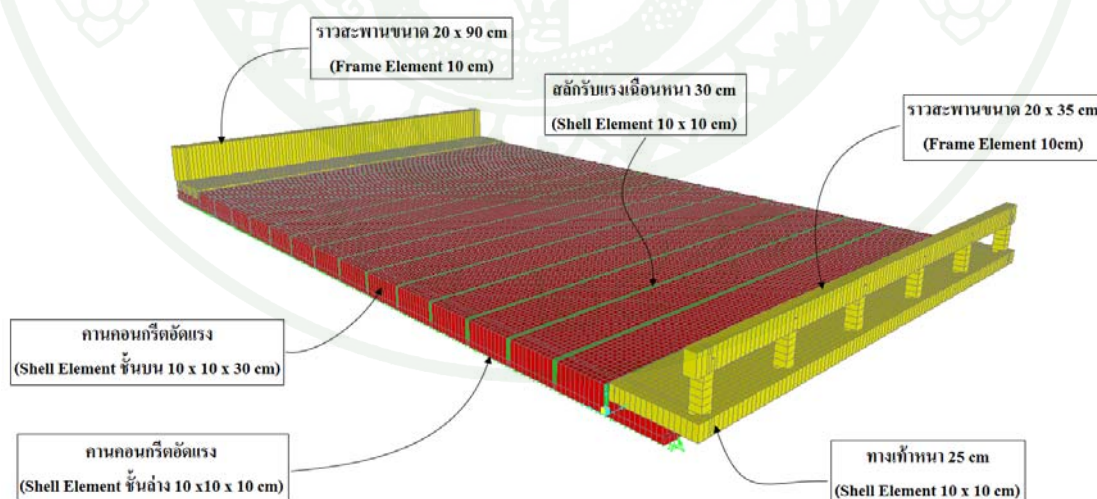
ลำดับ	ชื่อสะพาน	ค่าการโก่งตัว (mm)							
		วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์							
		(1)		(2)		ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)		ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบ น้ำหนักบรรทุก		จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin			จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness		
1	สะพานข้ามคลองเตย	-0.66	-0.95	-0.91	-1.30	26.95	-0.53	-0.84	16.41
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-0.56	-0.88	-0.92	-1.45	39.45	-0.54	-0.94	2.95
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	-0.66	-0.98	-0.94	-1.48	32.08	-0.56	-0.97	8.60
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-0.58	-1.02	-1.13	-1.78	45.63	-0.56	-1.01	2.33
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	-0.74	-1.10	-1.01	-1.55	28.12	-0.68	-1.11	4.44
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	-0.63	-0.97	-0.94	-1.45	33.30	-0.61	-1.01	3.34
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-0.79	-1.22	-1.01	-1.57	22.07	-0.81	-1.31	4.52
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	-0.56	-0.77	-0.95	-1.37	42.75	-0.59	-0.91	10.53
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-0.46	-0.75	-1.01	-1.49	52.06	-0.47	-0.79	4.10
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	-2.15	-1.93	-1.92	-1.97	6.26	-	-	-

5.4.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

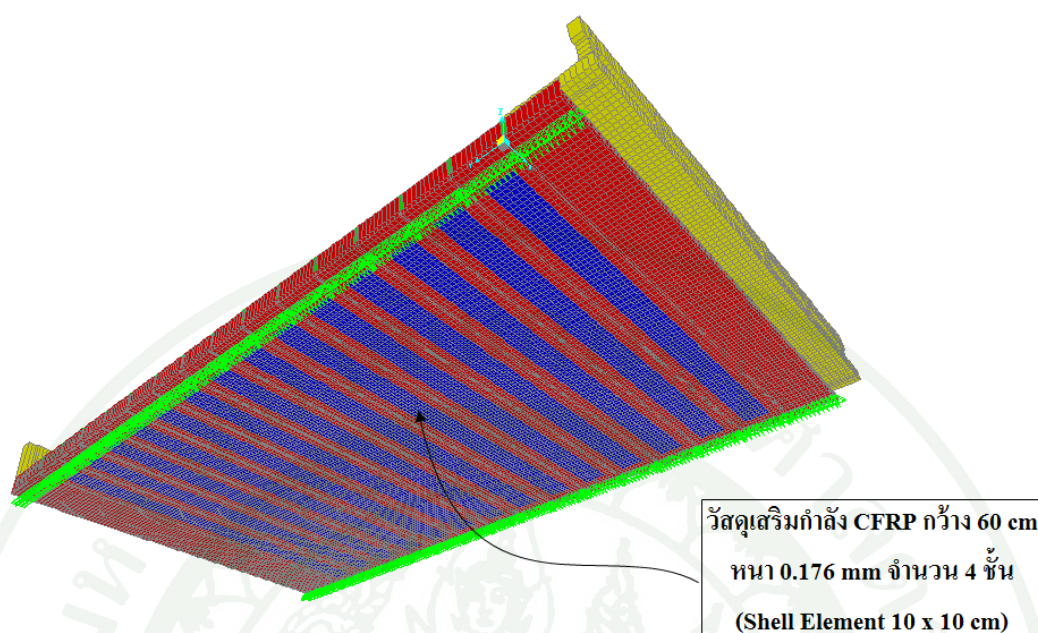
สะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะทางกายภาพที่มีความแตกต่างกันทั้ง 2 สะพาน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 46 สำหรับตัวอย่างสะพานที่นำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน คือ สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม ที่มีการเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP ขนาดเอลิเมนต์สำหรับ Shell Element เท่ากับ 10×10 ซม. จำนวน 2 ชั้น หนา 10 ซม. และ 30 ซม. ตามลำดับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 350 กก./ซม.^2 ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม ส่วนบนพื้นสะพานและส่วนใต้สะพานแสดงดังภาพที่ 109 และ 110 ตามลำดับ

ตารางที่ 46 ลักษณะทางกายภาพของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

ลำดับ	ชื่อสะพาน	มิติของหน้าตัดคาน คอนกรีตอัดแรง (ซม.)			จำนวน คาน (แผ่น)	ความยาว ช่วงพาด (ม.)	จำนวน ช่วงพาด
		กว้าง	ยาว	หนา			
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	99	1000	40	16	10	1
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	99	1000	40	19	10	1

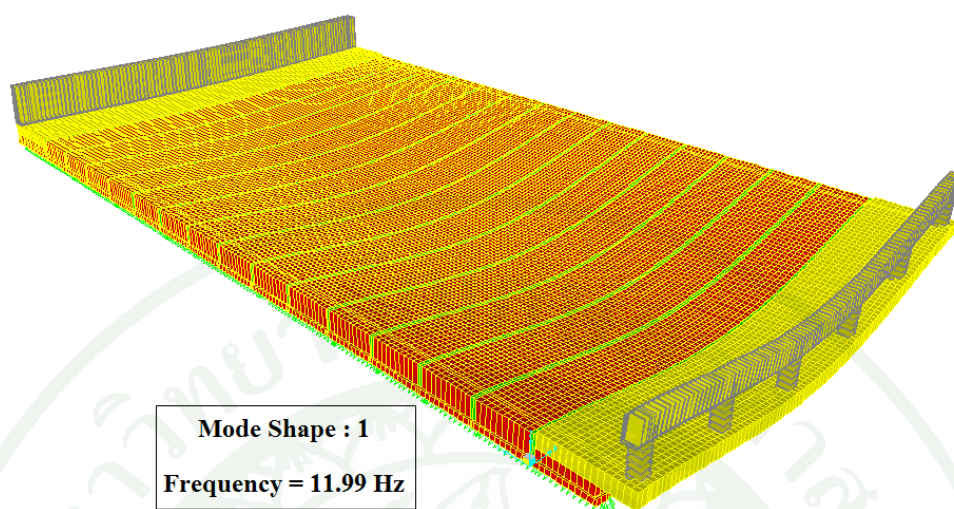


ภาพที่ 109 ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงส่วนบนพื้น



ภาพที่ 110 ลักษณะของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงส่วนใต้พื้น

จากการวิเคราะห์สะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนการปรับแบบจำลอง มีค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 11.99 Hz ซึ่งเป็นโหมดการสั่นไหวโหมดที่ 1 แสดงดังภาพที่ 111 โดยที่ค่าความถี่ธรรมชาติเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน เท่ากับ 14.35 Hz มีความแตกต่างกันร้อยละ 16.45 ซึ่งยังมีความแตกต่างกันมาก ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นต้องมีการปรับเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยปรับค่าการยึดรั้งบริเวณจุดรองรับของสะพาน โดยการปรับค่า Rotational Stiffness ซึ่งมีวิธีการปรับแบบจำลองเหมือนกับสะพานข้ามคลองสะพานยาว สำหรับการปรับค่า Rotational Stiffness ของสะพานที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 1.50×10^6 kg-m/rad มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 14.18 Hz มีความแตกต่างจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานเท่ากับร้อยละ 1.18 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การปรับเทียบค่าความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง แสดงดังตารางที่ 47

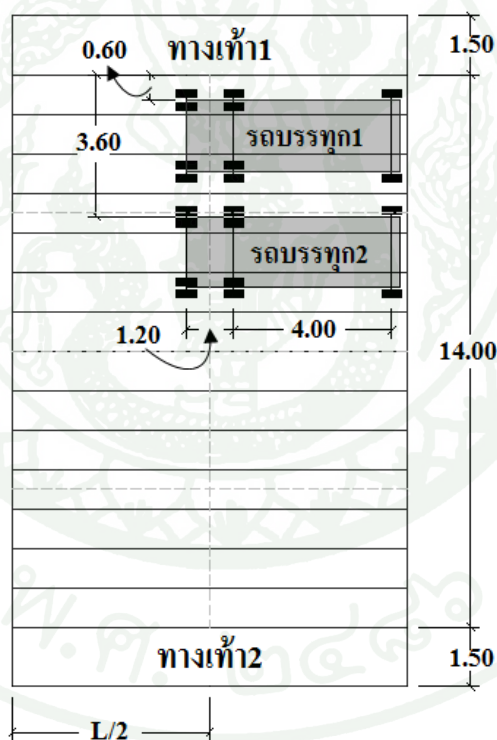


ภาพที่ 111 การสั่นไหวโหมด 1 จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

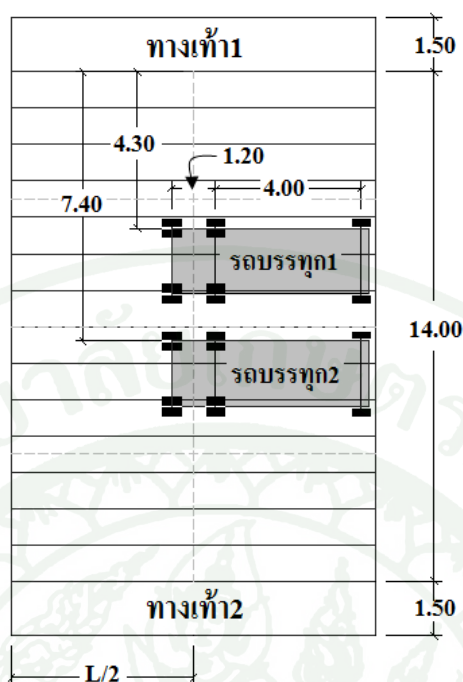
ตารางที่ 47 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

ลำดับ	ชื่อสะพาน	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)					Rotational Stiffness (kg-m/rad)
		(1)	วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์			ความ	
			(2)	ความ	(3)		
			ต่าง	ต่าง	ต่าง		
			1&2	1&2	Pin-Pin และปรับ	1&3	
					ให้ มี Rotational Stiffness		
				(%)		(%)	
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาาม	14.35 Hz	11.99 Hz	16.45	14.21 Hz	0.98	1.50 x 10 ⁶
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	12.36 Hz	11.65 Hz	5.75	13.52 Hz	-9.39	1.00 x 10 ⁶

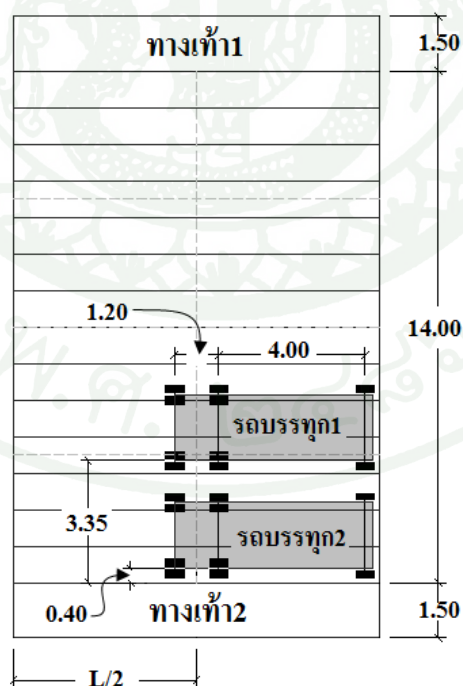
การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงสถิติของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน โดยผลที่นำมาเปรียบเทียบคือค่าการโก่งตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในช่วงที่โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น สำหรับรถบรรทุกทดสอบมีจำนวน 2 คัน มีน้ำหนักทดสอบเท่ากับ 24,500 กก. และ 24,100 กก. ตามลำดับ ตำแหน่งของรถบรรทุกทดสอบได้กำหนดให้กึ่งกลางของเพลาลังอยู่ที่ $L/2$ ของความยาวช่วงพาดสะพาน (5 เมตร) เพื่อให้เกิดการโก่งตัวและความเครียดสูงสุดสำหรับการทดสอบสะพาน การวางน้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับสะพานที่พิจารณามี 3 กรณี คือ วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกชิดทางเท้า (Edge Load) วางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน (Center Load) และวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกันตก (Edge Load) แสดงดังภาพที่ 112 ถึง 114 ตามลำดับ ระยะห่างของรถบรรทุกที่แสดงในภาพคือระยะที่วัดได้ตามจริงขณะทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน มีหน่วยเป็นเมตร



ภาพที่ 112 การวางตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

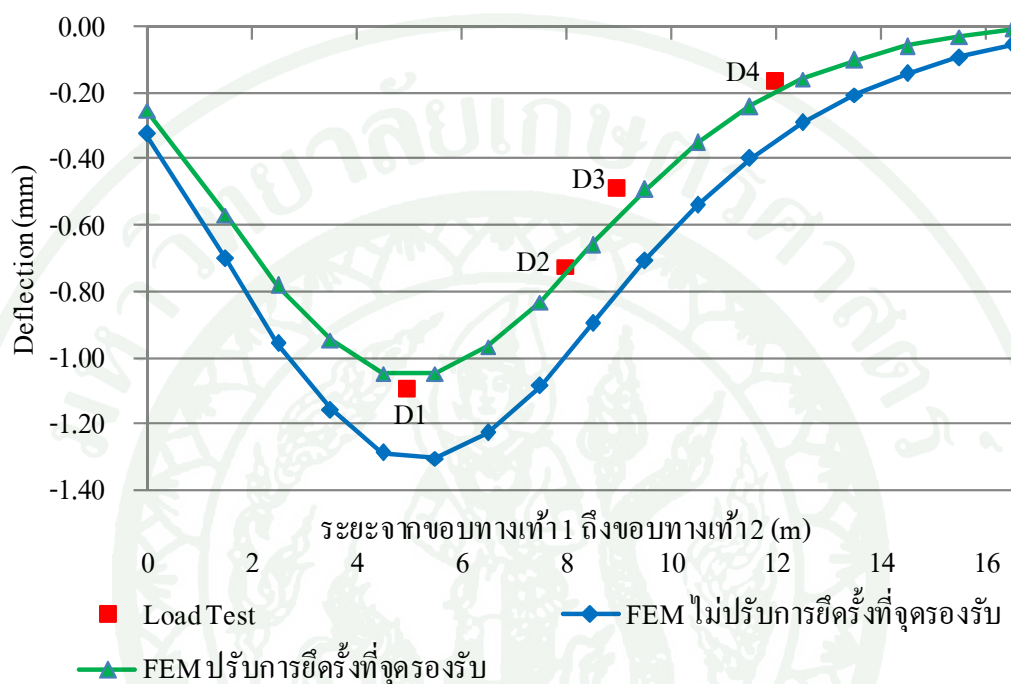


ภาพที่ 113 การวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกกลางสะพานสำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม



ภาพที่ 114 การวางตำแหน่งน้ำหนักรถบรรทุกชิดทางเท้า 2 สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

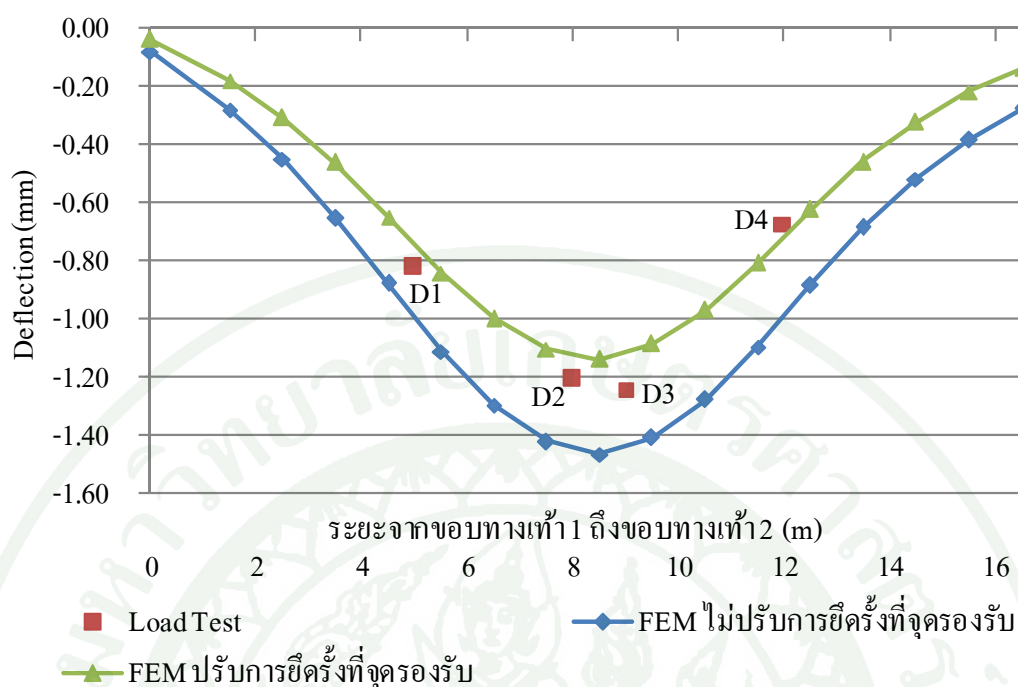
ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งของโครงสร้างพื้นสะพานระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามทั้ง 3 กรณี แสดงดังภาพที่ 115 ถึง 117 ตามลำดับ



หมายเหตุ : สัญลักษณ์ D1 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 3.50 ม.
 สัญลักษณ์ D2 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 6.50 ม.
 สัญลักษณ์ D3 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 7.50 ม.
 สัญลักษณ์ D4 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 10.50 ม.

ภาพที่ 115 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานโดยการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 พบว่ามีความแตกต่างร้อยละ 24.29 และร้อยละ 8.83 ระหว่างการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีและมีการปรับการยัดรีงบริเวณจุดรองรับตามลำดับ

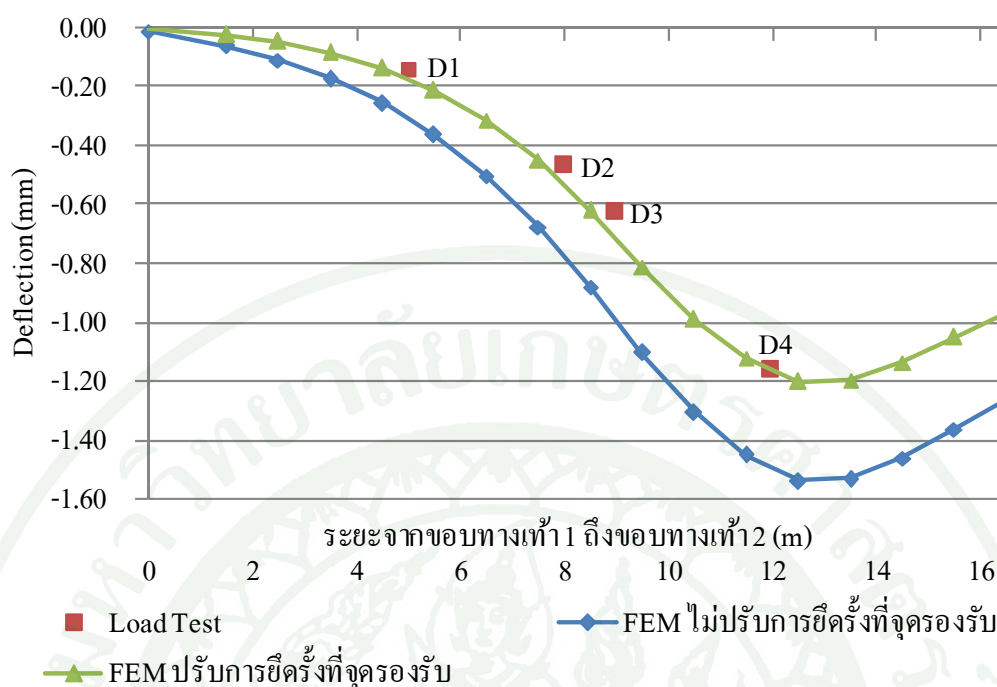


หมายเหตุ : สัญลักษณ์ D1 และ D4 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากกลางสะพาน 3.50 ม.

สัญลักษณ์ D2 และ D3 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากกลางสะพาน 0.50 ม.

ภาพที่ 116 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานโดยการวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน พบว่ามีความแตกต่างร้อยละ 19.98 และร้อยละ 7.83 ระหว่างการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีและมีการปรับการยึดรั้งบริเวณจุดรองรับตามลำดับ



หมายเหตุ : สัญลักษณ์ D1 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 3.50 ม.
 สัญลักษณ์ D2 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 6.50 ม.
 สัญลักษณ์ D3 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 7.50 ม.
 สัญลักษณ์ D4 คือ อุปกรณ์วัดค่าโก่งตัวของสะพาน มีระยะห่างจากทางเท้า 10.50 ม.

ภาพที่ 117 ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งจากการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2 สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

ผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานโดยการวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2 พบว่ามีความแตกต่างร้อยละ 38.34 และร้อยละ 7.78 ระหว่างการทดสอบภายใต้ น้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่มีและมีการปรับการยัดรีงบริเวณจุดรองรับตามลำดับ

จากผลการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของโครงสร้างพื้นสะพานของการวางน้ำหนักบรรทุก ทั้ง 3 รูปแบบพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่ได้ปรับจูนรองรับเพิ่ม Rotational Stiffness มีค่าความแตกต่างจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ร้อยละ 19.98 ถึงร้อยละ 38.34 ประกอบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 16.45 ซึ่งมีความแตกต่างกันมากยังไม่ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ปรับจูนรองรับเพิ่ม Rotational Stiffness เท่ากับ 1.50×10^6 kg-m/rad มีความแตกต่างจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ร้อยละ 7.78 ถึงร้อยละ 8.83 และค่าความถี่ธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 0.98 ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มากถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ สำหรับการเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของพื้นสะพานจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงทั้ง 3 กรณีของตำแหน่งการวางน้ำหนักบรรทุก แสดงดังตารางที่ 48 ถึง 50 ตามลำดับ

ตารางที่ 48 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

ลำดับ	ชื่อสะพาน	วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์													
		(1)				(2)				ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)				ความ ต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุก				จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin					จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness				
		D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4		D1	D2	D3	D4	
11	สะพานข้ามคลอง วัดเจ้าอาาม	-1.10	-0.73	-0.49	-0.17	-1.31	-0.99	-0.80	-0.34	24.29	-1.06	-0.75	-0.57	-0.20	8.83
12	สะพานข้ามคลอง มอญ 3	-1.50	-1.19	-0.58	-0.16	-2.06	-1.83	-1.00	-0.35	39.40	-1.66	-1.44	-0.72	-0.21	17.49

ตารางที่ 49 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน

ลำดับ	ชื่อสะพาน	วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์													
		(1)				(2)				ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)				ความต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุก				จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin					จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness				
		D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4		D1	D2	D3	D4	
11	สะพานข้ามคลอง วัดเจ้าอาาม	-0.82	-1.21	-1.24	-0.67	-1.00	-1.45	-1.44	-0.99	19.98	-0.75	-1.13	-1.12	-0.71	7.83
12	สะพานข้ามคลอง มอญ 3	-0.71	-1.44	-1.58	-1.13	-1.23	-2.05	-2.09	-1.36	28.18	-0.91	-1.62	-1.67	-1.08	10.80

ตารางที่ 50 การเปรียบเทียบค่าโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตึก

ลำดับ	ชื่อสะพาน	วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์													
		(1)				(2)				ความต่าง (1)&(2) (%)	(3)				ความ ต่าง (1)&(3) (%)
		จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุก				จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin					จุดรองรับเป็นแบบ Pin-Pin และปรับให้มี Rotational Stiffness				
		D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4		D1	D2	D3	D4	
11	สะพานข้ามคลอง วัดเจ้าอาาม	-0.14	-0.47	-0.63	-1.16	-0.31	-0.78	-0.99	-1.51	38.34	-0.15	-0.53	-0.72	-1.17	7.78
12	สะพานข้ามคลอง มอญ 3	-1.31	-1.45	-1.32	-0.63	-1.84	-2.15	-1.75	-0.84	27.79	-1.46	-1.70	-1.37	-0.62	7.61

5.5 เปรียบเทียบกำลังของสะพานที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP โดยผลของความเครียดจากอุปกรณ์ทดสอบ Strain Gauge

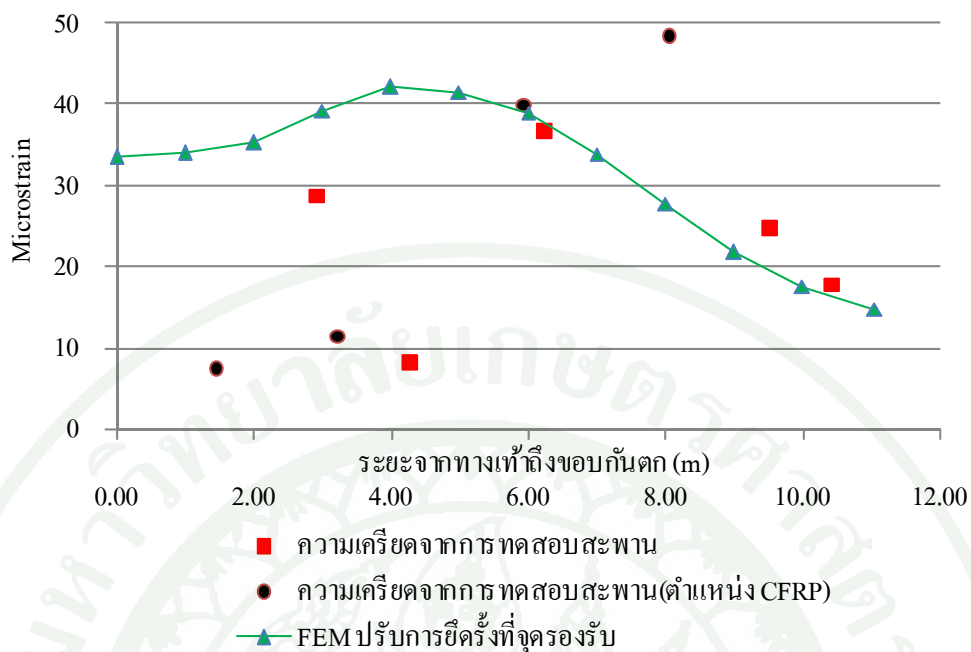
หลังจากการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานจากค่าความถี่ธรรมชาติและค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งของพื้นสะพานแล้ว นำค่าความเครียดจากการทดสอบสะพานจากอุปกรณ์ตรวจวัด Strain Gauge ณ ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงพาดของสะพาน ($L/2$) เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดความเครียดสูงสุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้เปรียบเทียบให้มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากหน่วยแรงตำแหน่งใต้พื้นสะพานตามทิศทางขนานการจราจรที่เกิดขึ้นจากการจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกทดสอบที่มีน้ำหนักและตำแหน่งตามการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุก แปลงหน่วยแรงให้เป็นความเครียดจากกฎของ Hook (Hook's Law) ที่ว่าคุณสมบัติของวัสดุที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่น หน่วยแรงจะแปรผันเป็นสัดส่วนกับความเครียด ดังสมการที่ 26 ตัวอย่างกราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 118 ถึง 123 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของสะพานข้ามคลองสะพานยาว และสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกทิศทางเท่า กลางสะพาน และชิดขอบกันตก ตามลำดับ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (26)$$

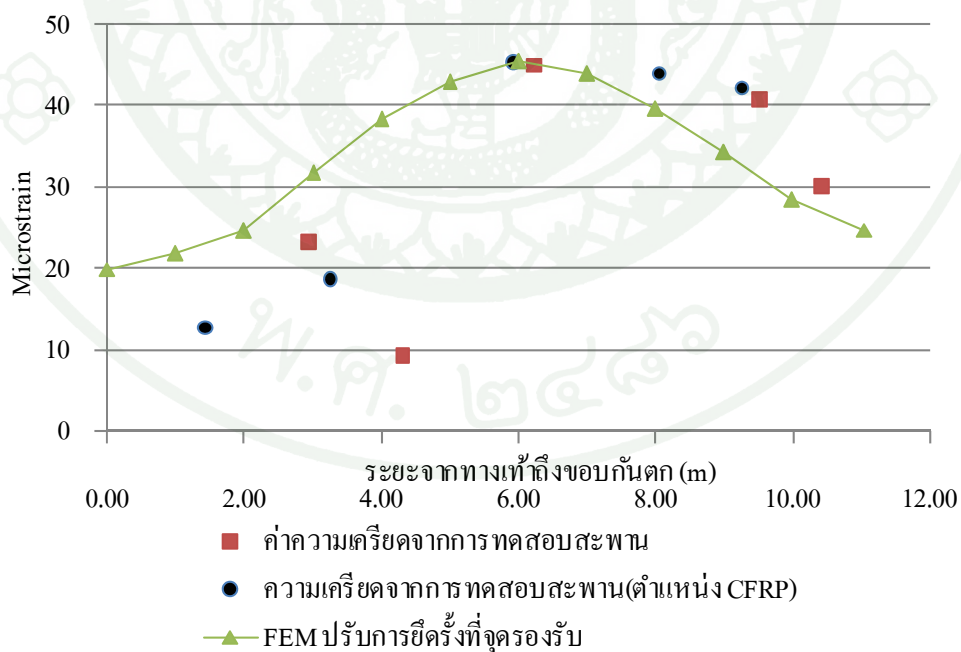
เมื่อ E คือ ความโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ มีหน่วยเป็น กก./ซม.²

σ คือ หน่วยแรง มีหน่วยเป็น กก./ซม.²

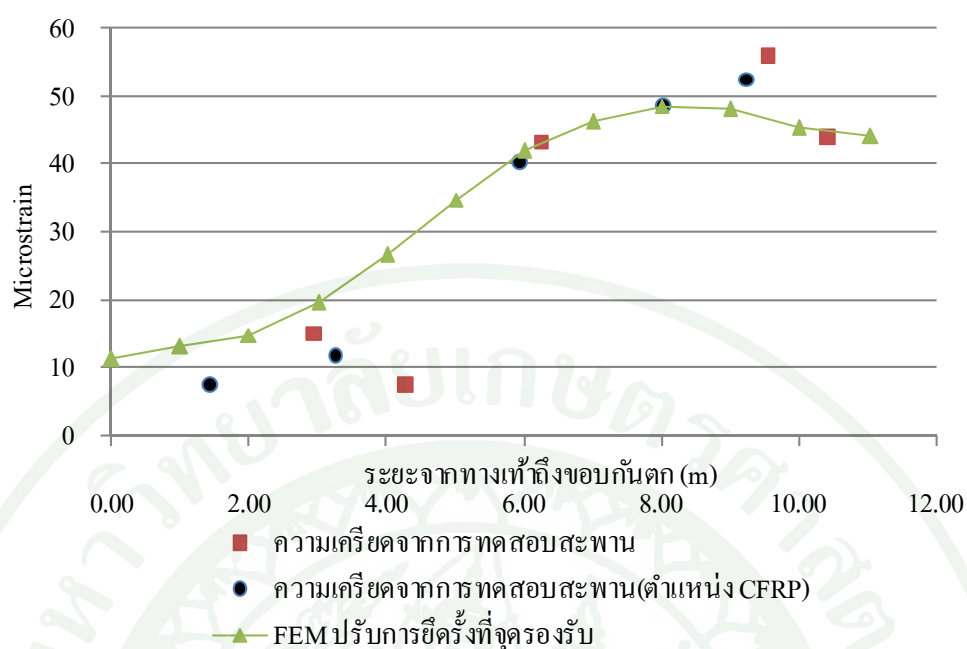
ϵ คือ ความเครียด



ภาพที่ 118 การเปรียบเทียบความเครียดจากการทดสอบสะพานกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

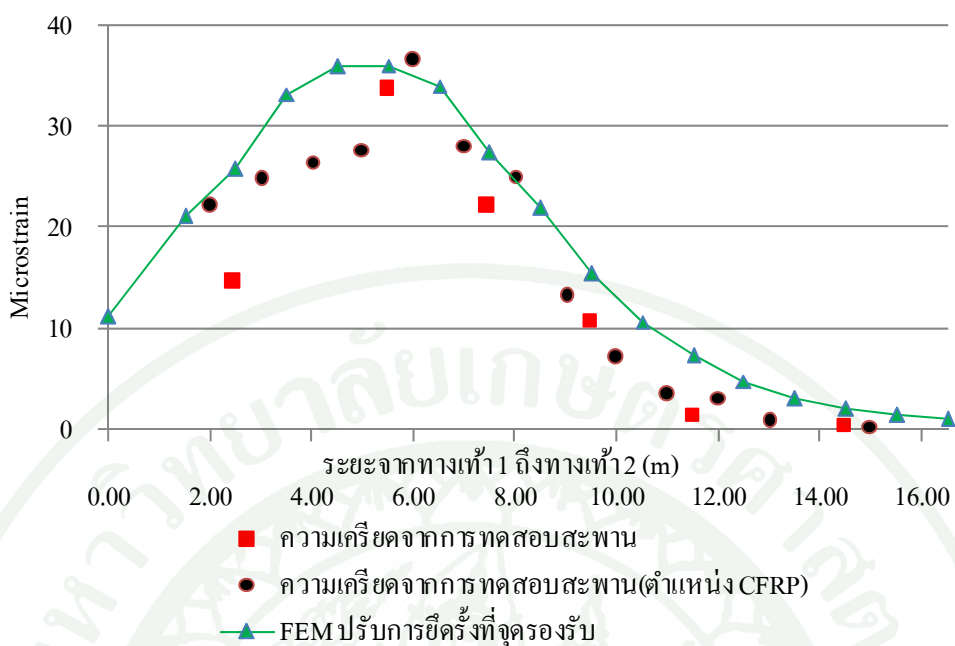


ภาพที่ 119 การเปรียบเทียบความเครียดจากการทดสอบสะพานกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายที่วางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

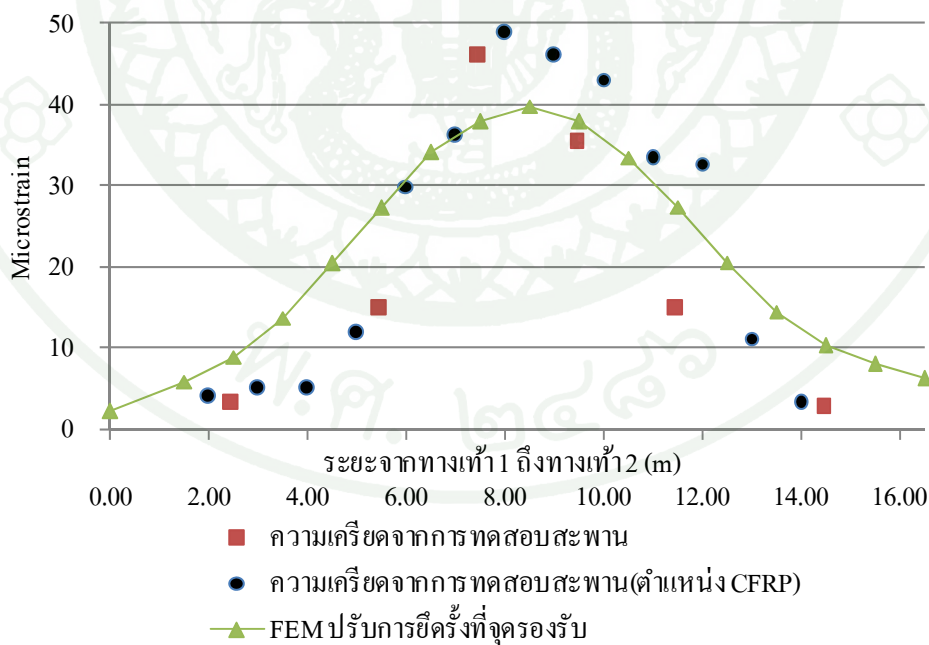


ภาพที่ 120 การเปรียบเทียบความเครียดจากการทดสอบสะพานกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายที่วางน้ำหนักรรทุกชิดขอบกันตก

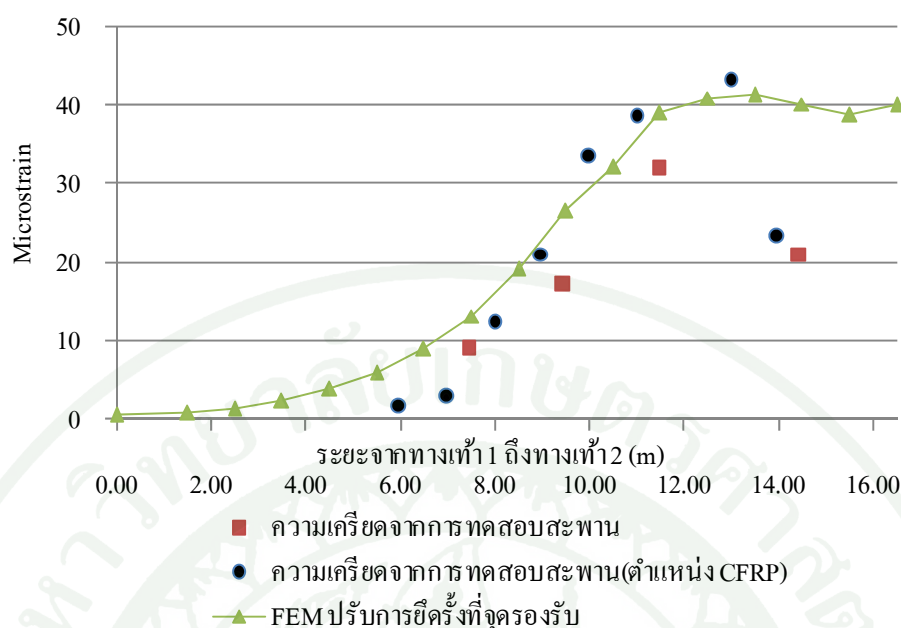
จากการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลังจากการปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่มีลักษณะโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงดังภาพที่ 118 ถึง 120 พบว่าค่าความเครียดที่วัดโดยอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain Gauge) จากการทดสอบสะพานกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยรวมความสอดคล้องกัน แต่มีค่าความเครียดจากการทดสอบสะพานบางค่าที่สูงกว่าผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ อาจเนื่องมาจาก Strain Gauge ติดตั้งบริเวณตำแหน่งหน้าตัดคอนกรีตแตกร้าว (Crack Section) ทำให้ค่าความเครียดที่วัดได้สูงผิดปกติ สำหรับค่าความเครียดที่มีค่าต่ำไม่มีความสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดจากความคลาดเคลื่อนในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในภาคสนาม



ภาพที่ 121 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากการทดสอบสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1



ภาพที่ 122 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากการทดสอบสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

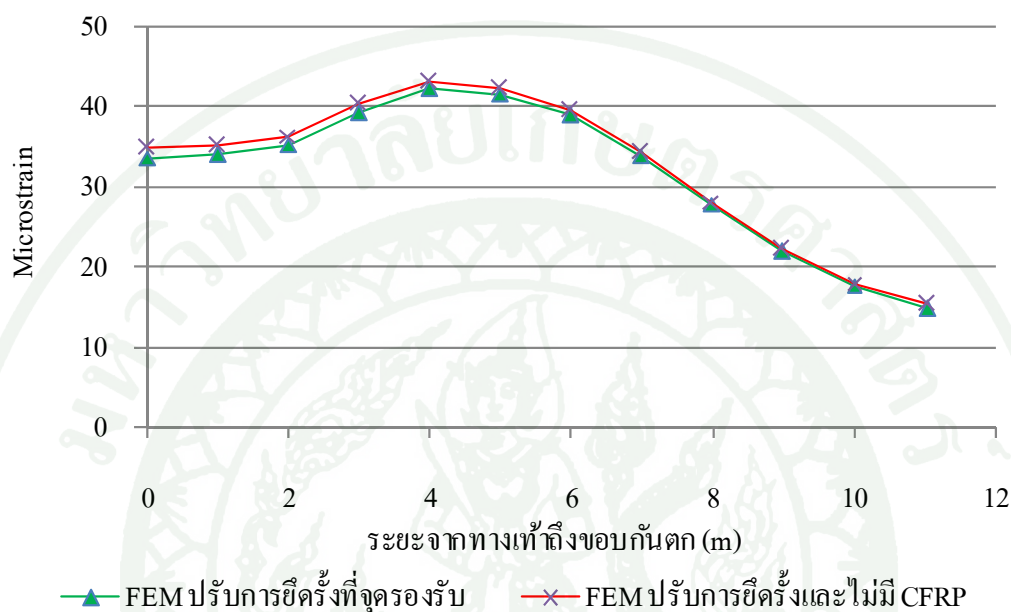


ภาพที่ 123 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากการทดสอบสะพานกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักรบรรทุกชิดทางเท้า 2

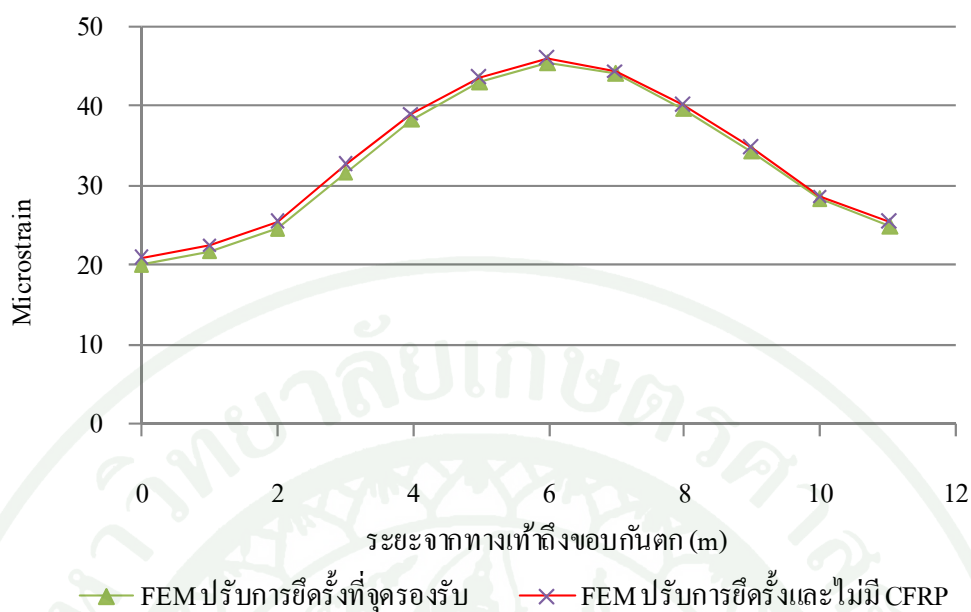
สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลังจากการปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่มีลักษณะโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง แสดงดังภาพที่ 121 ถึง 123 พบว่าค่าความเครียดที่วัดโดย Strain Gauge จากการทดสอบสะพานกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยรวมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีค่าความเครียดจากการทดสอบสะพานบางค่าที่ต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากการถ่ายแรงที่ไม่สมบูรณ์ของสลักรับแรงเฉือน (Shear Key)

ประสิทธิภาพจากการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุ CFRP ศึกษาโดยการวิเคราะห์ค่าความเครียดตามแนวขวางของสะพานจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP และไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ที่ได้ปรับเทียบให้มีพฤติกรรมที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน การศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ได้พิจารณาค่าความเครียดที่มีความแตกต่างกันมากที่สุดจากการวางน้ำหนักบรรทุกทดสอบ 3 กรณี คือ วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า ชิดขอบกันตก และวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน โดยมีตัวอย่างของการวิเคราะห์คือสะพานข้ามคลองสะพานยาวซึ่งป็นสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามซึ่งเป็นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างโครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้

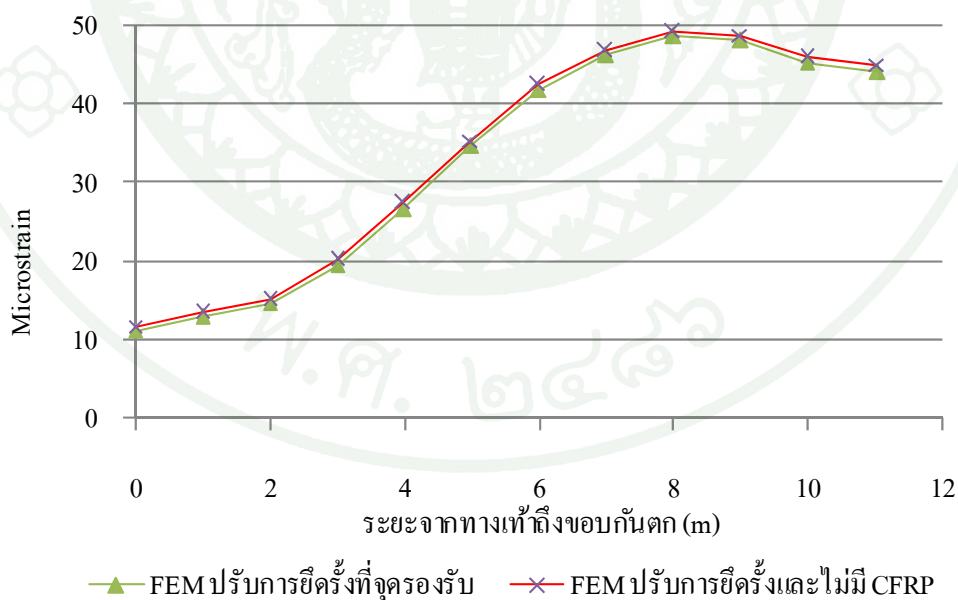
เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แสดงดังภาพที่ 124 ถึง 129 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของสะพานข้ามคลอง สะพานยาว และสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม กรณีวางน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า กลางสะพาน และ ชิดขอบกันตก ตามลำดับ



ภาพที่ 124 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างสะพานที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่วางน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า

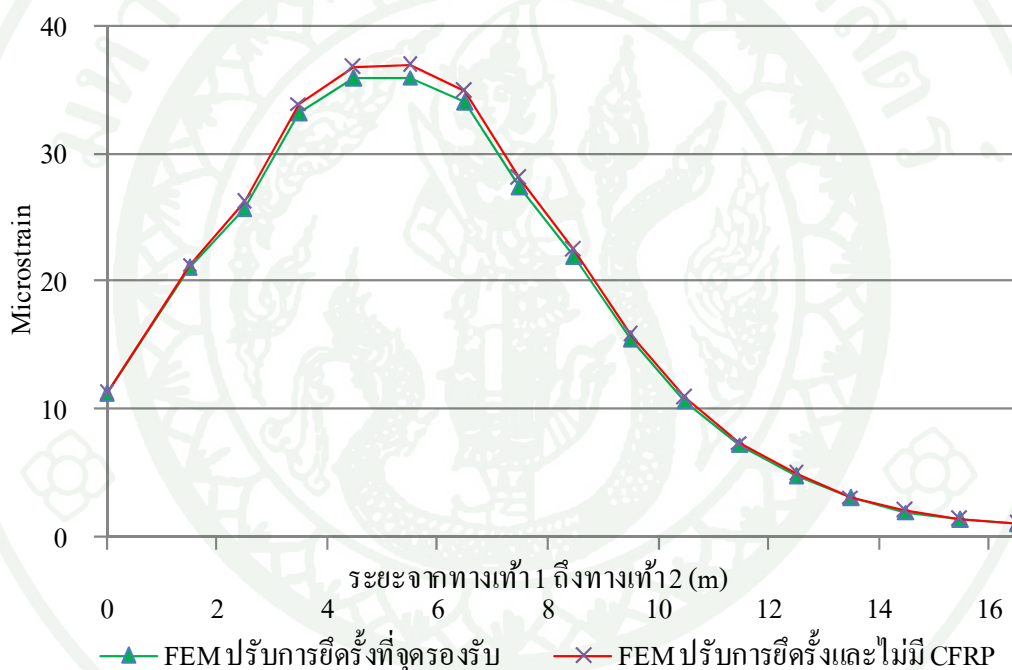


ภาพที่ 125 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างสะพานที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่วางน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน

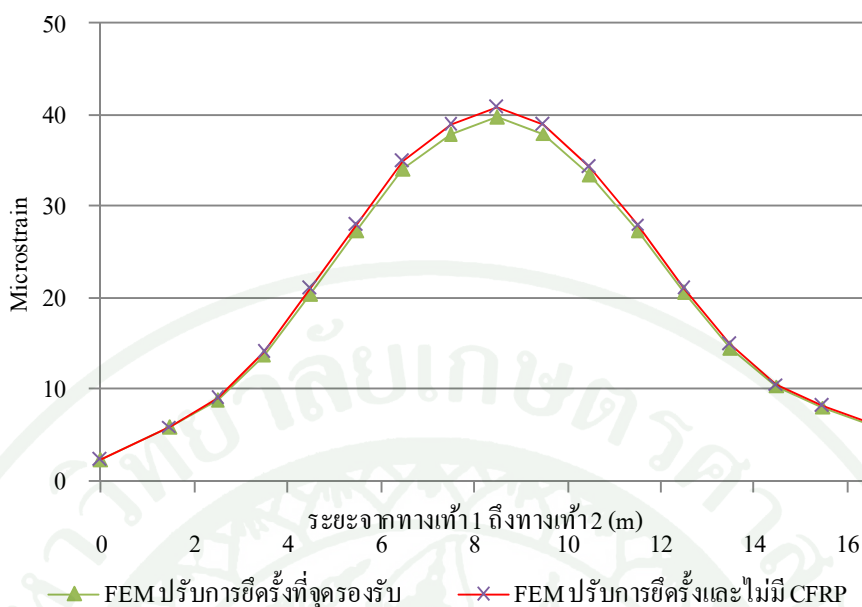


ภาพที่ 126 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างสะพานที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่วางน้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกันตก

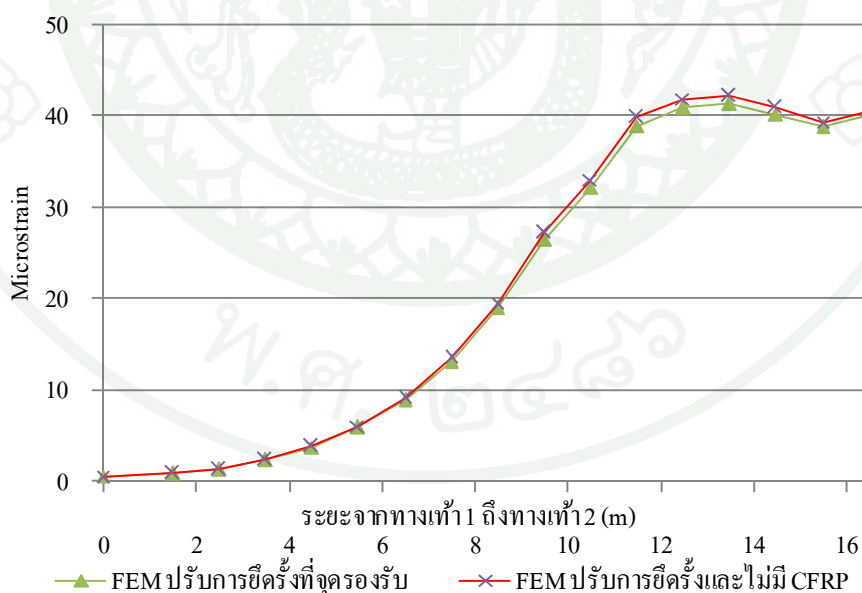
จากการวิเคราะห์ค่าความเครียดระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับเทียบของสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP กับแบบจำลองที่ไม่ได้มีการเสริมกำลังเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานส่วนพื้นที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จากการวางน้ำหนักบรรทุกทดสอบ 3 กรณี คือ วางน้ำหนักบรรทุกทิศทางเท้า กลางสะพาน และชิดขอบกันตัก ได้ผลดังนี้คือ ค่าความแตกต่างร้อยละ 3.75 ร้อยละ 4.02 และร้อยละ 4.33 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 4.03 แสดงว่าสะพานข้ามคลองสะพานยาวที่ทดสอบโดยรถบรรทุกไทยจำนวน 2 คัน น้ำหนักกรรวมน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 23,270 กก. และ 23,730 กก. ตามลำดับ มีค่าความเครียดลดลงเฉลี่ยร้อยละ 4.03 หลังจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จำนวน 2 ชั้น



ภาพที่ 127 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างโครงสร้างที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1



ภาพที่ 128 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างสะพานที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน



ภาพที่ 129 ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับแก้ระหว่างสะพานที่เสริมกำลังและไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่วางน้ำหนักรบรรทุกชิดทางเท้า 2

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ปรับเทียบของ สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP กับแบบจำลองที่ไม่ได้มีการเสริมกำลังเพื่อ ศึกษาประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานส่วนพื้นที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จากการวางน้ำหนัก บรรทุกทดสอบ 3 กรณี คือ วางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1 กลางสะพาน และชิดทางเท้า 2 ได้ผล ดังนี้คือ ค่าความแตกต่างร้อยละ 3.43 ร้อยละ 2.69 และร้อยละ 4.09 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 3.40 แสดงว่าสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่ทดสอบโดยรถบรรทุกไทยจำนวน 2 คัน น้ำหนัก รวมน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 24,500 กก. และ 24,100 กก. ตามลำดับ มีค่าความเครียดลดลงเฉลี่ย ร้อยละ 3.40 หลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP จำนวน 4 ชั้น

ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ของสะพานแบบพื้น และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงสำหรับงานวิจัยนี้ได้แสดงดังตารางที่ 51 ถึง 53 ตามลำดับ

ตารางที่ 51 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ฝั่งซ้าย

ลำดับ	ชื่อสะพาน	การลดลงของความเครียดจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP (%)				น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (กิโลกรัม)		
		ตำแหน่งรถบรรทุกทดสอบ			เฉลี่ย	รถบรรทุก 1	รถบรรทุก 2	รถบรรทุก 3
		ชิดทางเท้า 1	กลางสะพาน	ชิดขอบกันตก				
1	สะพานข้ามคลองเตย	3.28	3.47	3.85	3.54	24,380	24,490	-
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	3.63	3.81	4.23	3.89	23,270	23,730	-
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	3.75	4.02	4.33	4.03	23,270	23,730	-
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	2.19	5.89	5.03	4.37	22,690	24,190	-
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	3.55	6.01	11.45	7.00	24,160	24,710	-
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	3.47	3.68	3.93	3.69	24,160	24,710	-
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	3.77	4.09	4.25	4.04	25,470	25,300	-
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	2.70	2.26	2.37	2.44	24,580	24,550	-
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-	-	-	-	-	-	-
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	0.87	0.98	0.81	0.89	24,570	24,850	24,460

ตารางที่ 52 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ฝั่งขวา

ลำดับ	ชื่อสะพาน	การลดลงของความเครียดจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP (%)				น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (กิโลกรัม)		
		ตำแหน่งรถบรรทุกทดสอบ			เฉลี่ย	รถบรรทุก 1	รถบรรทุก 2	รถบรรทุก 3
		ชิดทางเท้า	กลางสะพาน	ชิดขอบกันตก				
1	สะพานข้ามคลองเตย	-	-	-	-	-	-	-
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	-	-	-	-	-	-	-
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	3.28	6.05	6.42	5.25	24,820	24,780	-
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	-	-	-	-	-	-	-
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	6.54	5.99	7.33	6.62	24,390	23,450	-
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	3.33	3.63	3.83	3.60	24,390	23,450	-
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	-	-	-	-	-	-	-
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	2.65	2.33	2.55	2.51	24,540	24,650	-
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	-	-	-	-	-	-	-
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	0.87	0.98	0.81	0.89	24,570	24,850	24,460

ตารางที่ 53 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

ลำดับ	ชื่อสะพาน	การลดลงของความเครียดจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP (%)				น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (กิโลกรัม)		
		ตำแหน่งรถบรรทุกทดสอบ			เฉลี่ย	รถบรรทุก 1	รถบรรทุก 2	รถบรรทุก 3
		ชิดทางเท้า 1	กลางสะพาน	ชิดทางเท้า 2				
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	3.43	2.69	4.09	3.40	24,500	24,100	-
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	3.77	3.62	3.13	3.50	24,570	24,680	24,550

6. การวิเคราะห์ปรับแก้ค่า Rating Factor จากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพานหลังจาก โครงสร้างสะพานได้มีการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

การวิเคราะห์ปรับแก้ค่า Rating Factor หลังจากซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุ CFRP จะต้องปรับแก้ค่า Condition Rating ของสะพานให้เท่ากับ 7 เนื่องจากการซ่อมแซมสะพานแล้วตามข้อกำหนดของ AASHTO LRFR (2008) สำหรับวิธีการปรับแก้ค่า Rating Factor หลังจากสะพานซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จะต้องปรับแก้ค่า Rating Factor จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้ค่า RF มีความสอดคล้องกับสะพานที่ได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ซึ่งมาตรฐาน AASHTO มีคำแนะนำสำหรับการปรับแก้ค่า RF หลังจากที่ได้มีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกคือนำค่า RF จากการคำนวณก่อนการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน (RF_C) คูณกับตัวประกอบปรับแก้ (K) ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบผลตอบแทนโครงสร้างจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพานกับผลตอบแทนโครงสร้างจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ค่า RF ที่มีความสอดคล้องกับกำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกทดสอบ (RF_T) สำหรับการคำนวณตัวประกอบปรับแก้แสดงดังสมการที่ 27

$$RF_T = RF_C \times K \quad (27)$$

เมื่อ RF_T คือ Rating Factor ที่ได้รับการปรับแก้จากข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุก
สะพาน

RF_C คือ Rating Factor ที่คำนวณจากสมการของ AASHTO ก่อนการทดสอบน้ำหนัก
บรรทุกสะพาน

K คือ ตัวประกอบปรับแก้ค่า Rating Factor จากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุก
สะพาน

โดยที่ค่า K คำนวณได้จากสมการที่ 28

$$K = 1 + k_a k_b \quad (28)$$

เมื่อ k_a คือ ตัวประกอบปรับแก้จากข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน

k_b คือ ตัวประกอบปรับแก้จากข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทางทฤษฎี

โดยที่ k_a คำนวณได้จากสมการที่ 29

$$k_a = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_T} - 1 \quad (29)$$

เมื่อ ε_T คือ ความเครียดสูงสุดที่วัดได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน

ε_c คือ ความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยน้ำหนักบรรทุกและตำแหน่งของ
รถบรรทุกทดสอบเหมือนกับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน

โดยที่ ε_c คำนวณได้จากสมการที่ 30

$$\varepsilon_c = \frac{L_T}{(SF)E} \quad (30)$$

เมื่อ L_T คือ ผลตอบสนองของชิ้นส่วนโครงสร้างที่วิเคราะห์ทางทฤษฎีได้จากการคำนวณ

โดยที่น้ำหนักและตำแหน่งรถบรรทุกต้องมีความสอดคล้องกับการทดสอบ
น้ำหนักบรรทุกสะพาน

SF คือ ตัวประกอบปรับแก้ของหน้าตัดโครงสร้างที่เหมาะสม

E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขององค์อาคารที่พิจารณา

สำหรับค่า K_b พิจารณาจากการคาดการณ์ที่ว่าโครงสร้างสะพานสามารถรองรับน้ำหนัก
ทดสอบเพิ่มอีก 1.33 เท่าได้หรือไม่ วิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเพิ่มน้ำหนัก
บรรทุกอีก 1.33 เท่า (1.33W) หากพฤติกรรมโครงสร้างยังอยู่ในช่วงเชิงเส้น (Linear Behavior)
แสดงว่าโครงสร้างสะพานที่พิจารณาสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุก 1.33W ได้ การพิจารณาค่า K_b
แสดงในตารางที่ 54

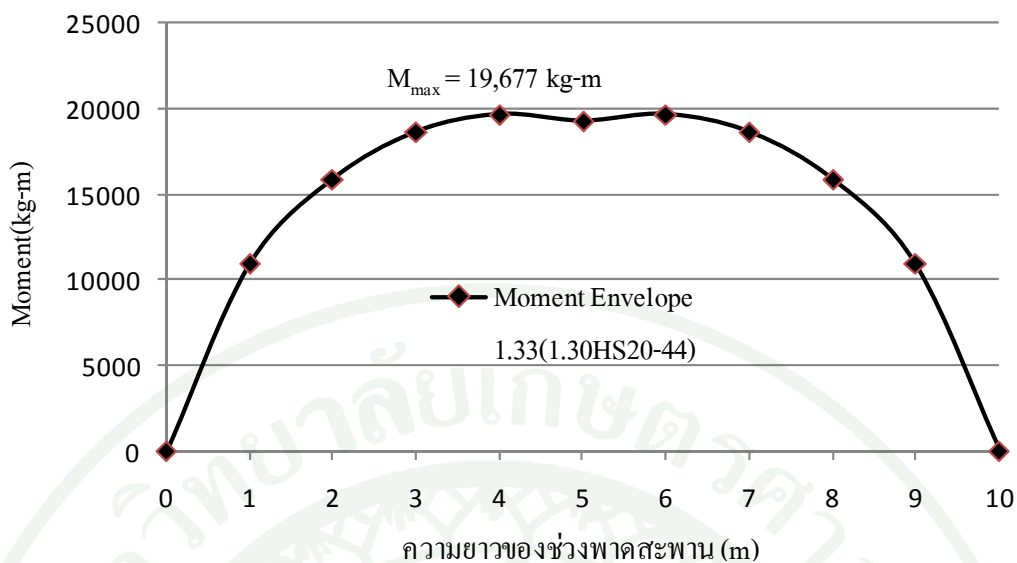
ตารางที่ 54 การพิจารณาค่า K_b

โครงสร้างสะพานสามารถรองรับ น้ำหนักทดสอบเพิ่มอีก 1.33 เท่าได้ หรือไม่		ความสัมพันธ์ระหว่าง T ต่อ W			K_b
ได้	ไม่ได้	$\frac{T}{W} < 0.4$	$0.4 < \frac{T}{W} \leq 0.7$	$\frac{T}{W} > 0.7$	
●		●			0
●			●		0.8
●				●	1
	●	●			0
	●		●		0
	●			●	0.5

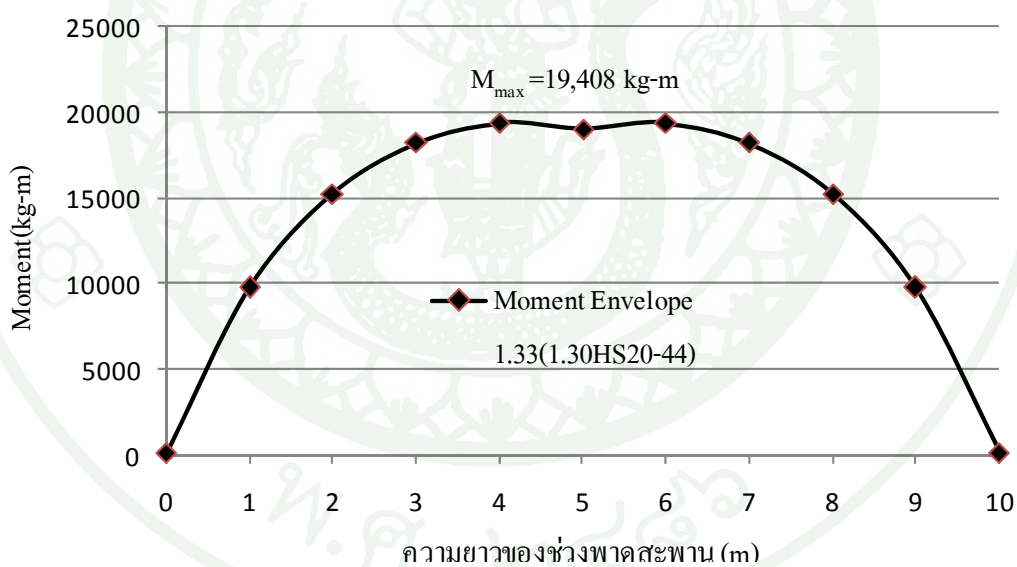
เมื่อ T คือ ผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

W คือ ผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานจากน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44

การวิเคราะห์ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการเพิ่มน้ำหนัก 1.33 เท่าของน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานต้องอยู่ในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Behavior) สำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาวและสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอารมีค่าโมเมนต์สูงสุด (1.33W) เท่ากับ 19,677 กก.-ม. และ 19,408 กก.-ม. ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 130 และ 131 ตามลำดับ เมื่อพฤติกรรมโครงสร้างเกิดการคราก โมเมนต์ดัดครากมีค่าเท่ากับ 18,428 กก.-ม. และ 16,271 กก.-ม. ตามลำดับ แสดงว่าพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่พิจารณาไม่อยู่ในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้นและไม่สามารถรองรับโมเมนต์สูงสุดจากการเพิ่มน้ำหนัก 1.33 เท่าของน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 ได้



ภาพที่ 130 ค่าโมเมนต์คัตสูงสุดจาก 1.33 เท่าของน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 จำนวน 3 คัน สำหรับสะพานข้ามคลองสะพานยาว



ภาพที่ 131 ค่าโมเมนต์คัตสูงสุดจาก 1.33 เท่าของน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 จำนวน 4 คัน สำหรับสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

แบบจำลองโครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่วิเคราะห์หาผลตอบสนองสูงสุดของน้ำหนักบรรทุกจรโดยน้ำหนักบรรทุกทดสอบ HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO และน้ำหนักบรรทุกไทย 25 ตัน ได้แบ่งลักษณะโครงสร้างสะพานไว้ 2 แบบ คือ 1) แบบจำลองโครงสร้างสะพานที่มีโครงสร้างรอง คือ ทางเท้า ราวกันตก และขอบกันตก เนื่องจากโครงสร้างสะพานที่รวมโครงสร้างรองมีความแข็งแกร่ง (Stiffness) มากกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้รวมโครงสร้างรองและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณใต้พื้นสะพานก็จะมีความน้อยกว่า 2) แบบจำลองโครงสร้างสะพานที่ไม่ได้รวมโครงสร้างรองเนื่องจากข้อกำหนดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) ได้มีการแนะนำว่าไม่ควรนำโครงสร้างรองมาพิจารณา เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ไม่ถาวร และมีความไม่ต่อเนื่องกับโครงสร้างหลัก ผลการปรับแก้ค่า RF ที่มีโครงสร้างสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและพื้นคอนกรีตอัดแรง แสดงในตารางที่ 55 ถึง 60 ตามลำดับ

ตารางที่ 55 ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอยน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	$\square_c$ (Microstrain)	$\square_T$ (Microstrain)	K_a	K_b	K	RF_C^*	RF_T
1	สะพานข้ามคลองเตย	80.71	40.53	0.99	0.50	1.50	1.19	1.78
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	81.73	42.76	0.91	0.50	1.46	1.19	1.73
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	84.14	45.16	0.86	0.50	1.43	1.19	1.70
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	105.86	56.81	0.86	0.50	1.43	1.19	1.70
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	92.06	54.86	0.68	0.50	1.34	1.19	1.59
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	85.30	62.87	0.36	0.50	1.18	1.19	1.40
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	85.30	52.00	0.64	0.50	1.32	1.19	1.57
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	125.91	56.93	1.21	0.50	1.61	1.15	1.85
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	93.93	33.33	1.82	0.50	1.91	1.02	1.95
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	119.53	90.44	0.32	0.50	1.16	1.37	1.59

หมายเหตุ : RF_C^* คือ Rating Factor ที่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ตารางที่ 56 ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งซ้าย โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	$\square_C$ (Microstrain)	$\square_T$ (Microstrain)	K_a	K_b	K	RF_C^{**}	RF_T
1	สะพานข้ามคลองเตย	107.72	40.53	1.66	0.50	1.83	1.19	2.18
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	109.08	42.76	1.55	0.50	1.78	1.19	2.11
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	112.30	45.16	1.49	0.50	1.74	1.19	2.07
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	141.29	56.81	1.49	0.50	1.74	1.19	2.07
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	122.87	54.86	1.24	0.50	1.62	1.19	1.93
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	113.84	62.87	0.81	0.50	1.41	1.19	1.67
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	113.84	52.00	1.19	0.50	1.59	1.19	1.90
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	153.71	56.93	1.70	0.50	1.85	1.15	2.13
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	125.37	33.33	2.76	0.50	2.38	1.02	2.43
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	133.10	90.44	0.47	0.50	1.24	1.37	1.69

หมายเหตุ : RF_C^{**} คือ Rating Factor ที่ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ตารางที่ 57 ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอยน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	$\square_c$ (Microstrain)	$\square_T$ (Microstrain)	K_a	K_b	K	RF_C^*	RF_T
1	สะพานข้ามคลองเตย	80.71	59.05	0.37	0.50	1.18	1.02	1.21
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	81.73	31.97	1.56	0.50	1.78	1.02	1.81
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	84.14	65.42	0.29	0.50	1.14	1.19	1.36
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	105.86	44.99	1.35	0.50	1.68	1.02	1.71
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	92.06	30.94	1.98	0.50	1.99	1.19	2.37
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	85.30	51.63	0.65	0.50	1.33	1.19	1.58
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	85.30	68.06	0.25	0.50	1.13	1.02	1.15
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	125.91	84.38	0.49	0.50	1.25	1.15	1.43
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	93.93	30.23	2.11	0.50	2.05	1.02	2.09
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	119.53	90.44	0.32	0.50	1.16	1.37	1.59

หมายเหตุ : RF_C^* คือ Rating Factor ที่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ตารางที่ 58 ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กฝั่งขวา โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	$\square_c$ (Microstrain)	$\square_T$ (Microstrain)	K_a	K_b	K	RF_C^{**}	RF_T
1	สะพานข้ามคลองเตย	107.72	59.05	0.82	0.50	1.41	1.02	1.44
2	สะพานข้ามคลองบางอ้อ	109.08	31.97	2.41	0.50	2.21	1.02	2.25
3	สะพานข้ามคลองสะพานขาว	112.30	65.42	0.72	0.50	1.36	1.19	1.62
4	สะพานข้ามคลองมอญ 1	141.29	44.99	2.14	0.50	2.07	1.02	2.11
5	สะพานข้ามคลองเตาอิฐ	122.87	30.94	2.97	0.50	2.49	1.19	2.96
6	สะพานข้ามคลองบางรัก	113.84	51.63	1.20	0.50	1.60	1.19	1.91
7	สะพานข้ามคลองบางพระครู	113.84	68.06	0.67	0.50	1.34	1.02	1.36
8	สะพานข้ามคลองบางพลัด	153.71	84.38	0.82	0.50	1.41	1.15	1.62
9	สะพานข้ามคลองบางพลู	125.37	30.23	3.15	0.50	2.57	1.02	2.62
10	สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์	133.10	90.44	0.47	0.50	1.24	1.37	1.69

หมายเหตุ : RF_C^{**} คือ Rating Factor ที่ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ตารางที่ 59 ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอยน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	$\square_C$ (Microstrain)	$\square_T$ (Microstrain)	K_a	K_b	K	RF_C^*	RF_T
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	114.48	48.66	1.35	0.50	1.68	1.39	2.33
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	133.44	54.64	1.44	0.50	1.72	1.70	2.93

หมายเหตุ : RF_C^* คือ Rating Factor ที่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ตารางที่ 60 ค่า Rating Factor ปรับแก้จากผลการสอยน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานสำหรับสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

ลำดับ สะพาน	ชื่อสะพาน	$\square_C$ (Microstrain)	$\square_T$ (Microstrain)	K_a	K_b	K	RF_C^{**}	RF_T
11	สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม	144.50	48.66	1.97	0.50	1.98	1.39	2.76
12	สะพานข้ามคลองมอญ 3	159.67	54.64	1.92	0.50	1.96	1.70	3.33

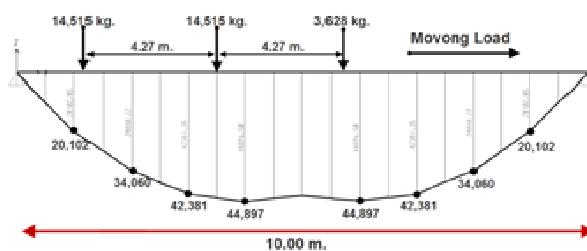
หมายเหตุ : RF_C^{**} คือ Rating Factor ที่ไม่คิดผลกระทบจากทางเท้าและราวสะพาน

จากผลการปรับแก้ค่า Rating Factor จากข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานหลังจากโครงสร้างสะพานได้มีการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP พบว่าสะพานที่มีโครงสร้างพื้นแบบคอนกรีตเสริมเหล็กและพื้นแบบคอนกรีตอัดแรงก่อนซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ที่มีค่า RF น้อยกว่า 1 เมื่อปรับแก้ค่า RF ตามสมการของ AASHTO LRFR (2008) ค่า RF จะมีค่ามากกว่า 1 ทุกสะพานทั้งผลการปรับแก้ RF ที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รวมและไม่รวมโครงสร้างรอง แสดงว่าโครงสร้างสะพานส่วนพื้นหลังจากมีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP สามารถรับน้ำหนักบรรทุก 25 ตันได้อย่างปลอดภัย

จากผลการปรับค่า Rating Factor ที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน โดยที่ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองซึ่งแสดงในตารางที่ 55 ถึง 60 นั้นพบว่าค่า RF ที่ปรับแก้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากแบบจำลองสะพานที่ไม่ได้รวมโครงสร้างรองจะมีความแข็งเกร็ง (Stiffness) น้อยกว่าแบบจำลองที่ได้รวมโครงสร้างรองทำให้การปรับแก้ค่า RF ที่แบบจำลองไม่ได้รวมโครงสร้างรองมีค่าสูงกว่าซึ่งทางข้อกำหนดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) ได้มีข้อเสนอแนะว่าไม่ควรรวมโครงสร้างรองสำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ว่าการปรับแก้ค่า RF ที่แบบจำลองได้รวมโครงสร้างรองจะมีค่า RF ที่ให้ความปลอดภัยกว่า

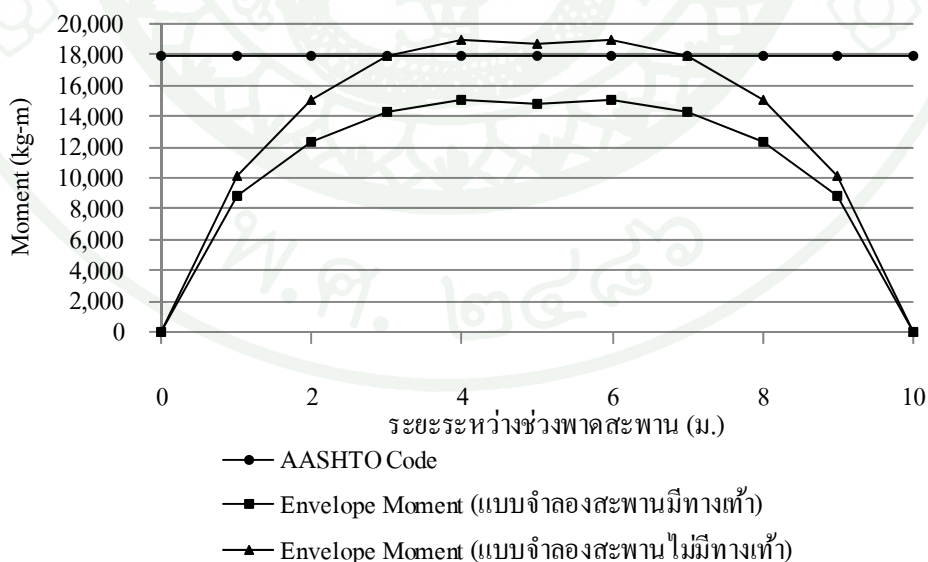
7. การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของช่วงพาดสะพานสามารถคำนวณโดยการหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของน้ำหนักบรรทุกจรที่อยู่ตำแหน่งต่างๆบนคาน 1 มิตี นำค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมาเขียนจะได้เส้นโมเมนต์เอนเวลลอป ตัวอย่างดังภาพที่ 132 ซึ่งแสดงโมเมนต์เอนเวลลอปของคานที่มีความยาว 10 เมตร โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนสะพานจริงเนื่องจากมีแรงกระจายออกทางด้านข้างทางกว้างดังนั้นมาตรฐาน AASHTO จึงเสนอสมการคำนวณการกระจายน้ำหนักของล้อ (Equivalent Width) สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตซึ่งแสดงในสมการที่ 3 และ 4 สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงจะมีสมการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกจร (Distribution Factors) ซึ่งแสดงในสมการในตารางที่ 4 ถึง 9

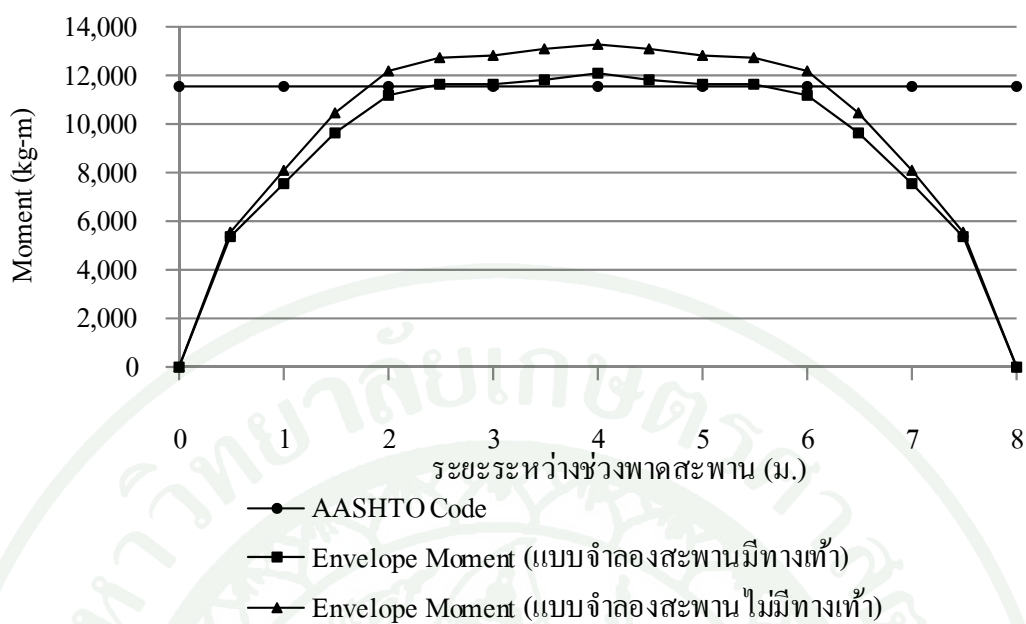


ภาพที่ 132 การวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์เอนเวลลอป (Moment Envelope)

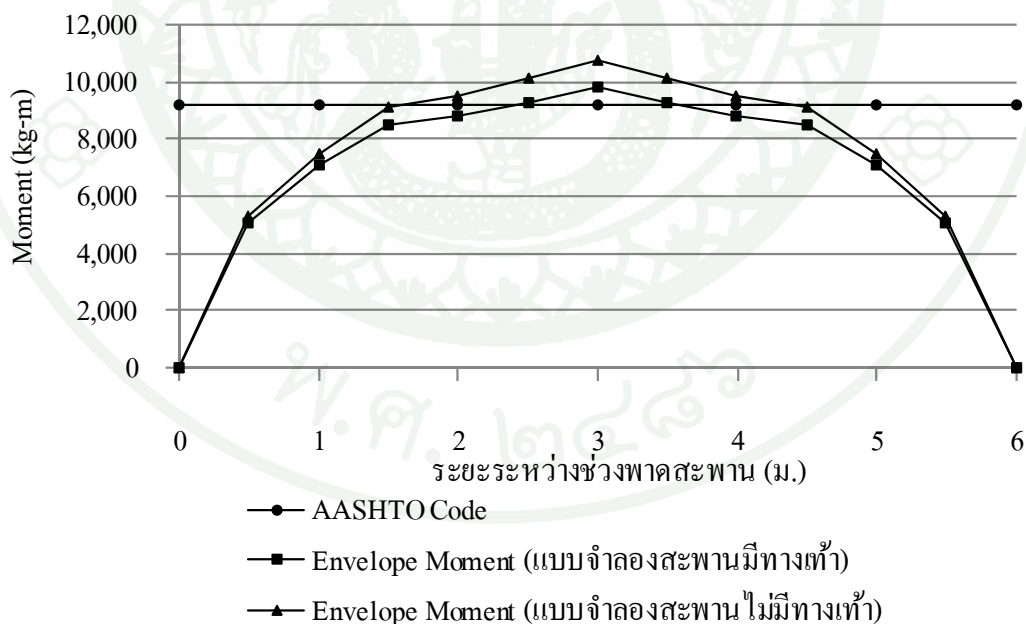
การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับงานวิจัยมีลักษณะทางกายภาพของสะพาน 3 รูปแบบคือ 1) สะพานที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร จำนวน 3 ช่องจราจร 2) สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์ที่มีความยาวช่วงพาด 8 เมตร จำนวน 4 ช่องจราจร 3) สะพานข้ามคลองบางพลัดที่มีความยาวช่วงพาด 6 เมตร จำนวน 3 ช่องจราจร โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาเปรียบเทียบกับสมการของ AASHTO มี 2 ลักษณะคือ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองในพื้นนี้คือทางเท้า ราวสะพาน และขอบกันตก ผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 133 ถึง 135 โดยแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบของสะพานที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร 8 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 133 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร



ภาพที่ 134 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 8 เมตร



ภาพที่ 135 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 6 เมตร

การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร ซึ่งแสดงในภาพที่ 133 พบว่าผลจากการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง มีค่าเท่ากับ 17,867 กิโลกรัม-เมตร 15,040 กิโลกรัม-เมตร และ 19,025 กิโลกรัม-เมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการวิเคราะห์สะพานที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร ด้วยสมการจาก AASHTO มีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง แต่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการจาก AASHTO

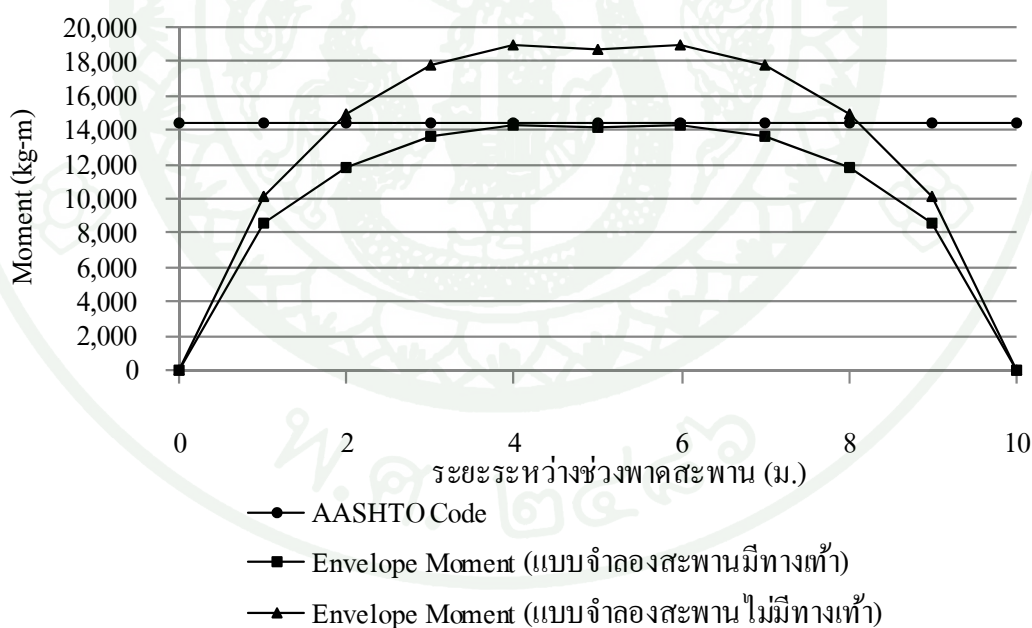
การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 8 เมตร ซึ่งแสดงในภาพที่ 134 พบว่าผลจากการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง มีค่าเท่ากับ 11,510 กิโลกรัม-เมตร 12,302 กิโลกรัม-เมตร และ 13,508 กิโลกรัม-เมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการวิเคราะห์สะพานที่มีความยาวช่วงพาด 8 เมตร ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ AASHTO

การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 6 เมตร ซึ่งแสดงในภาพที่ 135 พบว่าผลจากการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง มีค่าเท่ากับ 9,159 กิโลกรัม-เมตร 9,816 กิโลกรัม-เมตร และ 10,719 กิโลกรัม-เมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการวิเคราะห์สะพานที่มีความยาวช่วงพาด 6 เมตร ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการของ AASHTO

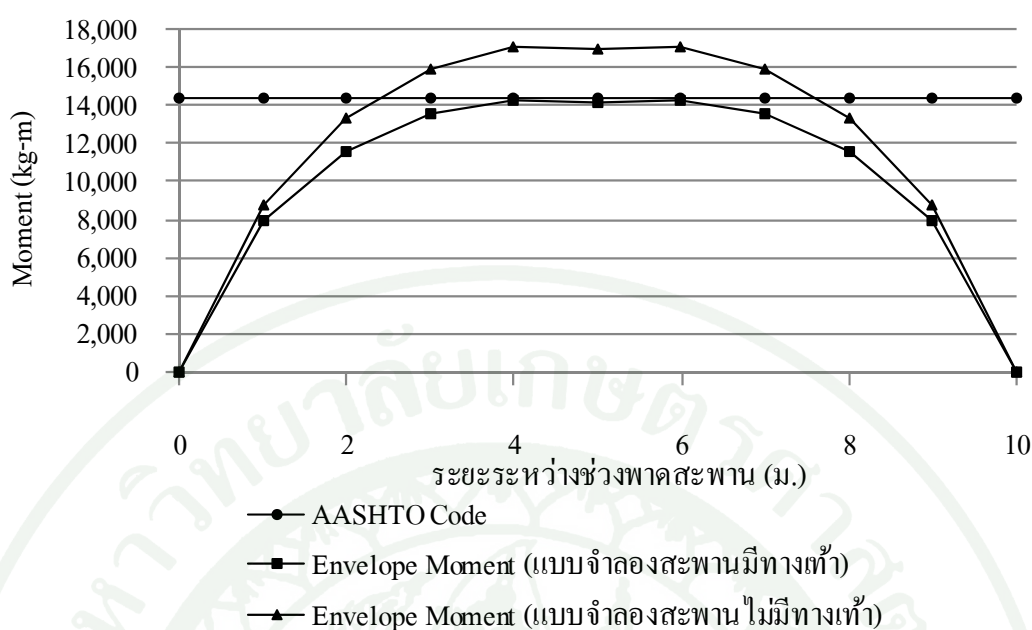
จากผลการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความยาวช่วงพาดตั้งแต่ 6 เมตร 8 เมตร และ 10 เมตร สามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการ AASHTO จะมีค่าความปลอดภัยน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง แต่จะมีความปลอดภัยใกล้เคียงกับการวิเคราะห์

ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมผลกระทบจากโครงสร้างที่มีความยาวช่วงพาด 6 เมตร และ 8 เมตร

สำหรับการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำหรับงานวิจัยมีลักษณะทางกายภาพของสะพาน 2 รูปแบบคือ 1) สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร จำนวน 4 ช่องจราจร มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 16 แผ่น 2) สะพานข้ามคลองมอญ 3 ที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร จำนวน 4 ช่องจราจร มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 19 แผ่น โดยที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาเปรียบเทียบกับสมการของ AASHTO มี 2 ลักษณะคือ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองในที่นี่คือ ทางเท้า ราวสะพาน และขอบกันตก ผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 136 และ 137 โดยแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบของสะพานที่มีจำนวนช่องจราจร 3 ช่อง และ 4 ช่องจราจร ตามลำดับ



ภาพที่ 136 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 16 แผ่น



ภาพที่ 137 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 19 แผ่น

การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร จำนวน 4 ช่องจราจร มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 16 แผ่น ซึ่งแสดงในภาพที่ 136 พบว่าผลจากการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง มีค่าเท่ากับ 14,460 กิโลกรัม-เมตร 14,317 กิโลกรัม-เมตร และ 18,955 กิโลกรัม-เมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการวิเคราะห์สะพานคอนกรีตอัดแรงด้วยสมการจาก AASHTO ที่มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 16 แผ่น มีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง แต่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการจาก AASHTO

การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร จำนวน 4 ช่องจราจร มีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 19 แผ่น ซึ่งแสดงในภาพที่ 137 พบว่าผลจากการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมและไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง มีค่าเท่ากับ 14,421 กิโลกรัม-เมตร 14,319 กิโลกรัม-เมตร และ 17,110 กิโลกรัม-เมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการวิเคราะห์สะพานคอนกรีตอัดแรงด้วยสมการจาก AASHTO ที่มีแผ่นพื้นสะพาน

คอนกรีตอัดแรงจำนวน 19 แผ่น มีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง แต่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีความปลอดภัยมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการจาก AASHTO

จากการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจำนวนแผ่นพื้นคานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 16 แผ่น และ 19 แผ่น สามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการ AASHTO จะมีค่าความปลอดภัยน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง แต่จะมีความปลอดภัยใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองที่มีจำนวนแผ่นพื้นคานคอนกรีตอัดแรง 16 แผ่น และ 19 แผ่น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ค่า Condition Rating แปรผันกับตัวคุณลดกำลังการเสื่อมสภาพ (ϕ_c) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในสมการคำนวณค่าประเมินกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างพื้นสะพาน Rating Factor ที่เป็นค่าบ่งชี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน
2. การประเมินกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างพื้นสะพานด้วยค่า RF หลังจากโครงสร้างสะพานเสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุ CFRP โดย RF มีค่ามากกว่า 1 ทุกสะพานแสดงว่าโครงสร้างส่วนพื้นสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 25 ตันได้อย่างปลอดภัย
3. การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานสำหรับงานวิจัยด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่นอ่อนที่มีความหนา 0.176 มม. เมื่อทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานโดยรถบรรทุกทดสอบหนักประมาณ 25 ตัน พบว่าค่าความเครียดลดลงร้อยละ 2.19 ถึงร้อยละ 11.45
4. การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการขึ้นรูป Solid Element กับ Shell Element ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่พบว่าความเค้นและค่าการโก่งตัวของวิธีการขึ้นรูป Shell Element มีค่าตอบที่ดูเข้าสู่ผลการทดลองที่ขึ้นรูป Solid Element ดังนั้นสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงสำหรับงานวิจัยจึงสามารถประยุกต์ใช้การขึ้นรูป Shell Element แทนการขึ้นรูป Solid Element
5. ผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของสะพานสำหรับงานวิจัยที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าต่ำกว่าผลการวิเคราะห์สัญญาณตรวจวัดที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน แสดงว่าโครงสร้างสะพานจริงมีความแข็งแรง (Stiffness) กว่าแบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
6. การปรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสะพานด้วย Rotation Stiffness ที่ตำแหน่งจุดรองรับพื้นสะพานซึ่งเป็นวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เมื่อปรับค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์สัญญาณตรวจวัดที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพาน พบว่าค่าการโก่งตัวตามแนวดิ่งจะมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมสะพานที่ได้จากการทดสอบ

7. การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาดที่ต่ำกว่า 10 เมตร คือ 8 เมตร และ 6 เมตรมีความปลอดภัยกว่าผลการวิเคราะห์ด้วยสมการจาก AASHTO แต่สำหรับสะพานแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาวช่วงพาด 10 เมตร การคำนวณด้วยสมการของ AASHTO จะมีความปลอดภัยมากกว่าแบบจำลองที่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรอง

8. การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกของสะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงระหว่างการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่รวมผลกระทบจากโครงสร้างรองมีความปลอดภัยกว่าผลการวิเคราะห์ด้วยสมการจาก AASHTO

ข้อเสนอแนะ

1. ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดควรตรวจสอบก่อนติดตั้งว่าเป็นตำแหน่งที่ผิวคอนกรีตเกิดการแตกร้าว (Cracked Section) หรือไม่ เนื่องจากเมื่อวัดค่าความเครียดของคอนกรีตตำแหน่ง Cracked Section จะทำให้มีค่าความเครียดที่สูงผิดปกติ

2. ค่า Condition Rating (CR) ที่พิจารณาสภาพความเสียหายของโครงสร้างสะพานจากหลักเกณฑ์การให้คะแนนของ National Bridge Inventory (NBI) มีเกณฑ์การให้คะแนนไม่ค่อยละเอียดควรจะมีการระบุตำแหน่งความเสียหายที่โครงสร้างมีความเสี่ยงต่อการใช้งาน เช่นระบุตำแหน่งความเสียหายได้พื้นสะพานบริเวณกึ่งกลางช่วงพาดสะพานซึ่งมีผลกระทบต่อกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดโดยตรง ระบุให้คะแนนค่า CR ต่ำกว่าตำแหน่งความเสียหายบนผิวสะพานที่มีพื้นที่ความเสียหายเท่าๆกัน เป็นต้น จะทำให้การประเมินกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างพื้นสะพานด้วยค่า Rating Factor มีความน่าเชื่อถือ และจะทำให้วิธีการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างสะพานมีประสิทธิภาพตามไปด้วย

3. การวัดระยะของตำแหน่งการจอร์จบรรทุกในการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานต้องกำหนดตำแหน่งอ้างอิงในการวัดให้ชัดเจนและการวัดจะต้องมีการตรวจทานทุกครั้งเพื่อไม่ให้เกิดกระทบต่อการนำข้อมูลตำแหน่งจอร์จบรรทุกทดสอบไปใช้สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ นริศ พิเชียรโชติ. 2549. การตรวจสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำตามขวาง. **วิศวกรรมสาร มข.** 33 (5): 525-539.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2008.

Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating of Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials Inc., Washington, D.C., U.S.A.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2007.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 4th Ed. American Association of State Highway and Transportation Officials Inc., Washington, D.C., U.S.A.

American Concrete Institute. 2008. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.** American Concrete Institute, Farmington Hills, U.S.A.

Amer, A., M. Arockiasamy and M. Shahawy. 1999. Load Distribution of Existing Solid Slab Bridges Based on Field Tests. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 4 (1999): 189-193.

Bahram, M.S. and B. Serpil. 2004. Retrofit of a Three-Span Slab Bridge with Fiber Reinforced Polymer Systems-Testing and Rating. **Journal of Composites for Construction** Vol. 8 (2004): 241-247.

Charles, M., S. Bala, M. Fred, M. Dennis and E. William. 2004. New AASHTO Guide Manual for Load and Resistance Factor Rating of Highway Bridges. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 9 (2004): 43-54.

- Erin, H. and I. Rola. 2006. Live-Load Distribution Factors for Prestressed Concrete, Spread Box-Girder Bridge. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 11 (2006): 573-581.
- Eugenio, O. 2009. **Structure Analysis with Finite Element Method Linear Statics**. International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, Spain.
- Giovanna, Z., H. Hong, X. Yong and J.D. Andrew. 2006. Stiffness Assessment through Modal Analysis of an RC Slab Bridge before and after Strengthening. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 11 (2006): 590-601.
- Graeme, P.S. 2007. **Reflective Cracking of Shear Keys in Multi-Beam Bridges**. M.S. Thesis. Texas A&M University.
- Michael, F.P., P. David, A.H. Kent and C.R. Dimitris. 2008. Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Decks Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite Materials. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 13 (2008): 455-467.
- Mabsout, M., K. Tarhini, R. Jabakhanji and E. Awwad. 2004. Wheel Load Distribution in Simply Supported Concrete Slab Bridges. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 9 (2004): 147-155.
- Sherrill, R., B. Andrew, J. Martin, S. Robert and B. Nemy. 2004. Potential Retrofit Methods for Concrete Channel Beam Bridges Using Glass Fiber Reinforced Polymer. **Journal of Bridge Engineering** Vol. 9 (2004): 66-74.
- Park, S.K. and D.S. Yang. 2004. Flexural behavior of reinforced concrete beams with cementitious repair materials. **Journal of Materials and Structures (RILEM)** Vol. 38 (2005): 329-334.

Schiebel, S., R. Parretti, A. Nanni and M. Huck. 2002. Strengthening and Load Testing of Three Bridges in Boone County, Missouri. **Practice Periodical on Structural Design and Construction** Vol. 7 (2002): 156-163.

Stephan, A.D., H. Ernest and X.J. Jessie. 2009. Retrofitting Precast Bridge Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strips for Shear Capacity. **Journal of Performance of Constructed Facilities** Vol. 23 (2009): 219-226.

Alkhrdaji, T., A. Nanni, G. Chen and M. Barker. 1999. Upgrading The Transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with FRP. **Concrete International: Design and Construction** Vol. 21 (1999) : 37-41.







ภาพผนวกที่ ก1 ผิวคอนกรีตหลุดล่อนใต้พื้นสะพานบริเวณช่องระบายน้ำ



ภาพผนวกที่ ก2 ผิวคอนกรีตหลุดล่อนใต้พื้นสะพานจนเห็นเหล็กเสริมบริเวณจุดรองรับพื้นสะพาน



ภาพผนวกที่ ก3 รอยร้าวตามยาวบนผิวจราจร



ภาพผนวกที่ ก4 คอนกรีตหลุดล่อนบนผิวจราจร



ภาพผนวกที่ ก5 คอนกรีตหลุดล่อนบนผิวจราจรจนเห็นเหล็กเสริม



ภาพผนวกที่ ก6 ผิวจราจรมีรอยแตกถายางและวัสดุผิวทางเสื่อมสภาพ



RATING FACTOR ของสะพานข้ามคลองเตย ส่วนLT

ก่อนเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

MOMENT RATING FACTOR

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi_R - (\gamma_{DC})(DC) - \gamma_{DW}(DW)}{(\gamma_L)(LL)(1 + IM)}$$

$$condition\ rating =$$

4

 $\phi_c =$

0.85

 $\phi_s =$

1.00

 $\phi =$

0.90

 $\gamma_{DC} =$

1.25

 $\gamma_{DW} =$

1.50

IM =

1.33

INVENTORY

OPERATING

 $\gamma_L =$

1.75

 $\gamma_L =$

1.35

inventory

RF =

0.78

operating

RF =

1.01

คุณสมบัติของคอนกรีตหน้าตัด

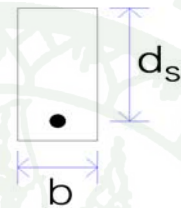
$f_c =$	210.00	ksc.
w คอนกรีต (w_c) =	2,400.00	kg./m ³
พื้นหนา (t_g) =	53.00	cm.
ระยะ covering =	3.00	cm.
$d_s =$	50.00	cm.

คุณสมบัติของเหล็กเสริม

$f_y =$	3,000.00	ksc.
ขนาดและระยะเรียงเหล็ก/1m.		
ขนาดเส้นผ่าน ศ.ก.เหล็ก(cm.)	2.50	ระยะเรียงเหล็ก(cm.)
$A_s =$	54.54	cm ² .

คุณสมบัติของแอสฟัลท์

w แอสฟัลท์ =	2,300.00	kg./m ³



การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกคงที่

1.) ผลจากน้ำหนักโครงสร้าง (DC)

ขนาดและระยะของโครงสร้าง (พิจารณาต่อความกว้าง 1m.)

1.1) พื้นทางเดิน : หนา = 0.25 m. กว้าง = 2.00 m.

1.2) รวทางเดิน : กว้าง = 0.20 m. ลึก = 0.35 m.

1.3) เสารวทางเดิน (ด้านหัวและท้าย) :

กว้าง = 0.35 m. ยาว = 0.40 m.

สูง = 0.55 m. จำนวน = 2 ตัน

1.4) เสารวทางเดิน (ช่วงกลาง) :

กว้าง = 0.20 m. ยาว = 0.20 m.

สูง = 0.55 m. จำนวน = 4 ตัน

1.5) รวกันตก(RC. curb) :

กว้าง = 0.20 m. ลึก = 0.25 m.

1.6) เสารวกันตก (ด้านหัวและท้าย) :

กว้าง = 0.25 m. ยาว = 0.40 m.

สูง = 0.25 m. จำนวน = 2 ตัน

1.7) เสารวกันตก (ช่วงกลาง) :

กว้าง = 0.20 m. ยาว = 0.20 m.

สูง = 0.25 m. จำนวน = 4 ตัน

1.8) ขอบล่าง(RC. curb) :

กว้าง = 0.25 m. ลึก = 0.25 m.

ความกว้างสะพาน (b_g) = 11.45 m.

ความยาวช่วงสะพาน (L) = 10.00 m.

น้ำหนักรวมของพื้นทางเดิน และราวกันตก = 150.02 kg./m.

น้ำหนักพื้นคอนกรีต = 1,272.00 kg./m.

น้ำหนักรวมของโครงสร้างส่วนบน (DC) = 1,422.02 kg./m.

2.) ผลจากน้ำหนักผิวทาง (DW)

ความหนาของแอสฟัลท์ (t_a) = 5.00 cm.

น้ำหนักของแอสฟัลท์ที่หนา = 115.00 kg./m.

104.80	kg./m.
14.67	kg./m.
3.23	kg./m.
1.84	kg./m.
10.48	kg./m.
1.05	kg./m.
0.84	kg./m.
13.10	kg./m.

การวิเคราะห์ค่า moment และ shear ที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง

At mid span

$$M_{DC} = 17,775.20 \text{ kg.-m./m.}$$

$$M_{DW} = 1,437.50 \text{ kg.-m./m.}$$

การวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด(ต่อความกว้าง 1m.)

1.) ความต้านทานการดัด(flexural strength)

$$B = 100.00 \text{ cm.}$$

$$\beta_1 = 0.85 \text{ * หาก } f'_c < 280 \text{ ksc. , } \beta_1 = 0.85$$

$$c = \frac{(A_s)(f_y)}{(0.85)(f'_c)(\beta_1)(b)}$$

$$c = 10.78 \text{ cm.}$$

$$a = 9.17 \text{ cm.}$$

$$M_n = (A_s)(f_y)(d_s - a/2)$$

$$M_n = 7,431,286.46 \text{ kg.-cm./m.}$$

$$M_n = 74,312.86 \text{ kg.-m./m.}$$

การหาค่าE (Equivalent width)

จำนวนเลน = 3

1.) สำหรับ 1ช่องจราจร

$$E = 250 + 0.42 (L_1 W_1)^{1/2}$$

$$L_1 = 10,000.00 \text{ mm.}$$

$$W_1 = 11,450.00 \text{ mm.}$$

$$E = 4,744.20 \text{ mm.}$$

$$E = 4.74 \text{ m.}$$

$$\text{USE } E = 3.27 \text{ m.}$$

2.) สำหรับ 2ช่องจราจรขึ้นไป

$$E = 2100 + 0.12 (L_1 W_1)^{1/2} \leq W / N_L$$

$$L_1 = 10,000.00 \text{ mm.}$$

$$W_1 = 11,450.00 \text{ mm.}$$

$$W = 9,800.00 \text{ mm.}$$

$$N_L = 3 \text{ เลน}$$

$$2100 + 0.12 (L_1 W_1)^{1/2} = 3,384.06 \text{ mm.}$$

$$W / N_L = 3,266.67 \text{ mm.}$$

$$E = 3,266.67 \text{ mm.}$$

$$E = 3.27 \text{ m.}$$

*หมายเหตุ

L_1 = ความยาวช่วงพาดของสะพานมีค่าไม่เกิน 18,000 mm.

W_1 = ความกว้างของสะพานมีค่าไม่เกิน 18,000 mm.

W = ความกว้างของสะพานไม่รวมทางเดินเท้า (clearance)

N_L = จำนวนเลน

ค่า LL

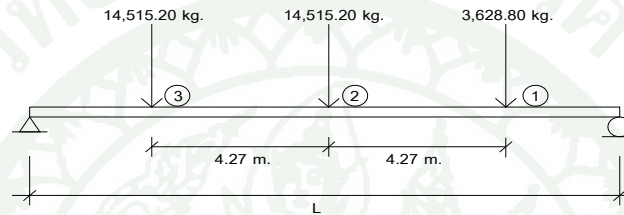
(ผลตอบสนองเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบเพลาดียว หารด้วยค่าE)

truck load (HS20)

1) truck load moment

ใช้น้ำหนักบรรทุกที่มาตรฐาน AASHTO code (HS-20)

maximum moment = 58,366.33 kg.-m.



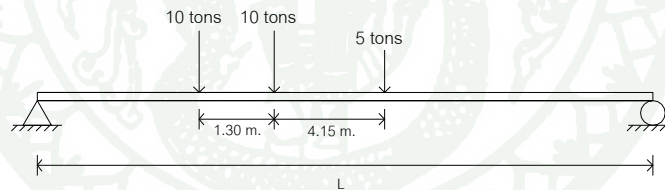
**หมายเหตุ ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดจากรถบรรทุก HS20นี้ได้เพิ่มน้ำหนักอีก30%แล้ว

thai truck load

1) truck load moment

ใช้น้ำหนักบรรทุกที่มาตรฐาน AASHTO code (HS-20)

maximum moment = 45,625.00 kg.-m.



ค่า Design load

1.moment

Design load moment = 58,366.33 kg.-m.

Design load moment / E = 17,867.24 kg.-m./m. (ค่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นที่สะพาน 1m.)

RATING FACTOR ของสะพานข้ามคลองเตย ส่วนLT

หลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

MOMENT RATING FACTOR

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi_{R_n} - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL)(1 + IM)}$$

$$\text{condition rating} = \frac{7}{7}$$

$$\phi_c = 1.00$$

$$\gamma_{DC} = 1.25$$

$$\phi_s = 1.00$$

$$\gamma_{DW} = 1.50$$

$$\phi = 0.90$$

$$IM = 1.33$$

INVENTORY

$$\gamma_L = 1.75$$

OPERATING

$$\gamma_L = 1.35$$

inventory

$$RF = 1.19$$

operating

$$RF = 1.54$$

RATING FACTOR ของสะพานข้ามคลองเตย ส่วนRT

ก่อนการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน

MOMENT RATING FACTOR

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi_r R_n - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL)(1 + IM)}$$

$$\text{condition rating} = \frac{6}{6}$$

$$\phi_c = 1.00$$

$$\gamma_{DC} = 1.25$$

$$\phi_s = 1.00$$

$$\gamma_{DW} = 1.50$$

$$\phi = 0.90$$

$$IM = 1.33$$

INVENTORY

$$\gamma_L = 1.75$$

OPERATING

$$\gamma_L = 1.35$$

inventory

$$RF = 1.02$$

operating

$$RF = 1.32$$

คุณสมบัติของคอนกรีตหน้าตัด

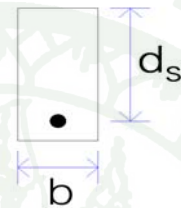
$f_c =$	210.00	ksc.
w คอนกรีต (w_c) =	2,400.00	kg./m ³
พื้นหนา (t_g) =	53.00	cm.
ระยะ covering =	3.00	cm.
$d_s =$	50.00	cm.

คุณสมบัติของเหล็กเสริม

$f_y =$	3,000.00	ksc.
ขนาดและระยะเรียงเหล็ก/1m.		
ขนาดเส้นผ่าน ศ.ก. เหล็ก (cm.)	2.50	ระยะเรียงเหล็ก (cm.)
$A_s =$	54.54	cm ² .

คุณสมบัติของแอสฟัลท์

w แอสฟัลท์ =	2,300.00	kg./m ³



การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกคงที่

1.) ผลจากน้ำหนักโครงสร้าง (DC)

ขนาดและระยะของโครงสร้าง (พิจารณาต่อความกว้าง 1m.)

1.1) พื้นทางเดิน :	หนา = 0.25 m.	กว้าง = 2.00 m.			
1.2) ราวทางเดิน :	กว้าง = 0.20 m.	ลึก = 0.35 m.			
1.3) เสาราวทางเดิน (ด้านหัวและท้าย) :	กว้าง = 0.35 m.	ยาว = 0.40 m.	สูง = 0.55 m.	จำนวน = 2	ต้น
1.4) เสาราวทางเดิน (ช่วงกลาง) :	กว้าง = 0.20 m.	ยาว = 0.20 m.	สูง = 0.55 m.	จำนวน = 4	ต้น
1.5) ราวกันตก(RC. curb) :	กว้าง = 0.20 m.	ลึก = 0.25 m.			
1.6) เสาราวกันตก (ด้านหัวและท้าย) :	กว้าง = 0.25 m.	ยาว = 0.40 m.	สูง = 0.25 m.	จำนวน = 2	ต้น
1.7) เสาราวกันตก (ช่วงกลาง) :	กว้าง = 0.20 m.	ยาว = 0.20 m.	สูง = 0.25 m.	จำนวน = 4	ต้น
1.8) ขอบล่าง(RC. curb) :	กว้าง = 0.25 m.	ลึก = 0.25 m.			
ความกว้างสะพาน (b_s) =	11.45 m.				
ความยาวช่วงสะพาน (L)=	10.00 m.				
น้ำหนักรวมของพื้นทางเดิน และราวกันตก=	150.02	kg./m.			
น้ำหนักพื้นคอนกรีต=	1,272.00	kg./m.			
น้ำหนักรวมของโครงสร้างส่วนบน (DC)=	1,422.02	kg./m.			

2.) ผลจากน้ำหนักผิวทาง (DW)

ความหนาของแอสฟัลท์ (t_a) =	5.00	cm.
น้ำหนักของแอสฟัลท์ที่หนา =	115.00	kg./m.

104.80	kg./m.
14.67	kg./m.
3.23	kg./m.
1.84	kg./m.
10.48	kg./m.
1.05	kg./m.
0.84	kg./m.
13.10	kg./m.

การวิเคราะห์ค่า moment และ shear ที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง

At mid span

$$M_{DC} = 17,775.20 \text{ kg.-m./m.}$$

$$M_{DW} = 1,437.50 \text{ kg.-m./m.}$$

การวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด(ต่อความกว้าง 1m.)

1.) ความต้านทานการดัด(flexural strength)

$$B = 100.00 \text{ cm.}$$

$$\beta_1 = 0.85 \text{ * หาก } f'_c < 280 \text{ ksc. , } \beta_1 = 0.85$$

$$c = \frac{(A_s)(f_y)}{(0.85)(f'_c)(\beta_1)(b)}$$

$$c = 10.78 \text{ cm.}$$

$$a = 9.17 \text{ cm.}$$

$$M_n = (A_s)(f_y)(d_s - a/2)$$

$$M_n = 7,431,286.46 \text{ kg.-cm./m.}$$

$$M_n = 74,312.86 \text{ kg.-m./m.}$$

การหาค่าE (Equivalent width)

จำนวนเลน = 3

1.) สำหรับ 1ช่องจราจร

$$E = 250 + 0.42 (L_1 W_1)^{1/2}$$

$$L_1 = 10,000.00 \text{ mm.}$$

$$W_1 = 11,450.00 \text{ mm.}$$

$$E = 4,744.20 \text{ mm.}$$

$$E = 4.74 \text{ m.}$$

$$\text{USE } E = 3.27 \text{ m.}$$

2.) สำหรับ 2ช่องจราจรขึ้นไป

$$E = 2100 + 0.12 (L_1 W_1)^{1/2} \leq W / N_L$$

$$L_1 = 10,000.00 \text{ mm.}$$

$$W_1 = 11,450.00 \text{ mm.}$$

$$W = 9,800.00 \text{ mm.}$$

$$N_L = 3 \text{ เลน}$$

$$2100 + 0.12 (L_1 W_1)^{1/2} = 3,384.06 \text{ mm.}$$

$$W / N_L = 3,266.67 \text{ mm.}$$

$$E = 3,266.67 \text{ mm.}$$

$$E = 3.27 \text{ m.}$$

*หมายเหตุ

L_1 = ความยาวช่วงพาดของสะพานมีค่าไม่เกิน 18,000 mm.

W_1 = ความกว้างของสะพานมีค่าไม่เกิน 18,000 mm.

W = ความกว้างของสะพานไม่รวมทางเดินเท้า (clearance)

N_L = จำนวนเลน

ค่า LL

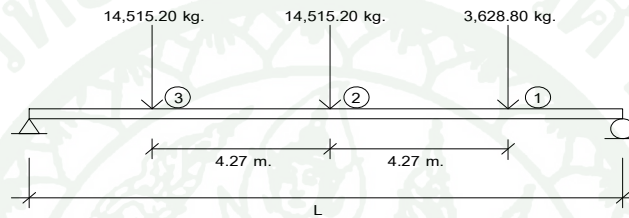
(ผลตอบสนองเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกรูปแบบเพลาดียว หารด้วยค่าE)

truck load (HS20)

1) truck load moment

ใช้น้ำหนักบรรทุกที่มีวิเคราะห้ตาม AASHTO code (HS-20)

maximum moment = 58,366.33 kg.-m.



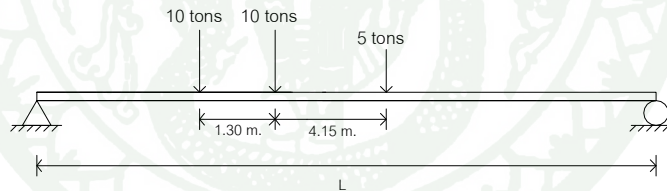
****หมายเหตุ** ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดจากรถบรรทุก HS20นี้ได้เพิ่มน้ำหนักอีก 30%แล้ว

thai truck load

1) truck load moment

ใช้น้ำหนักบรรทุกที่มีวิเคราะห้ตาม AASHTO code (HS-20)

maximum moment = 45,625.00 kg.-m.



ค่า Design load

1.moment

Design load moment = 58,366.33 kg.-m.

Design load moment / E = 17,867.24 kg.-m./m. (ค่าโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรต่อความกว้างของพื้นสะพาน 1m.)

RATING FACTOR ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi_R - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL)(1 + IM)}$$

condition rating =	5		for moment
$\phi_c = 0.95$	$\phi_s = 1.00$		$\phi = 0.90$
$\gamma_{DC} = 1.25$	$\gamma_{DW} = 1.50$		for shear
			$\phi = 0.85$
			IM = 1.33
INVENTORY	OPERATING		
$\gamma_L = 1.75$	$\gamma_L = 1.35$		

MOMENT RATING FACTOR

inventory	RF =	0.89
operating	RF =	1.16

การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกคงที่

1.) ผลจากน้ำหนักโครงสร้าง (DC)

ขนาดและระยะของโครงสร้าง (พิจารณาต่อความกว้าง 1m.)

1.1) พื้นทางเดิน :	หนา =	0.25 m.	กว้าง =	2.00 m.	จำนวน =	2	ตัน	150.00 kg./m.		
1.2) ราวทางเดิน :	กว้าง =	0.20 m.	ลึก =	0.35 m.	จำนวน =	2	ตัน	21.00 kg./m.		
1.3) เสาราวทางเดิน (ด้านหัวและท้าย) :	กว้าง =	0.35 m.	ยาว =	0.40 m.	สูง =	0.55 m.	จำนวน =	4	ตัน	4.62 kg./m.
1.4) เสาราวทางเดิน (ช่วงกลาง) :	กว้าง =	0.20 m.	ยาว =	0.20 m.	สูง =	0.55 m.	จำนวน =	8	ตัน	2.64 kg./m.
ความกว้างพื้นสะพาน (b_s) =		16.00 m.								
ความยาวช่วงสะพาน (L) =		10.00 m.								
น้ำหนักรวมของพื้นทางเดิน และราวกันตก =				178.26 kg./m.						
w คอนกรีต (w_c) =				2,400.00 kg./m ³						
น้ำหนักพื้นคอนกรีต +topping =				1,320.00 kg./m.						
น้ำหนักรวมของโครงสร้างส่วนบน (DC) =				1,498.26 kg./m.						

2.) ผลจากน้ำหนักผิวทาง (DW)

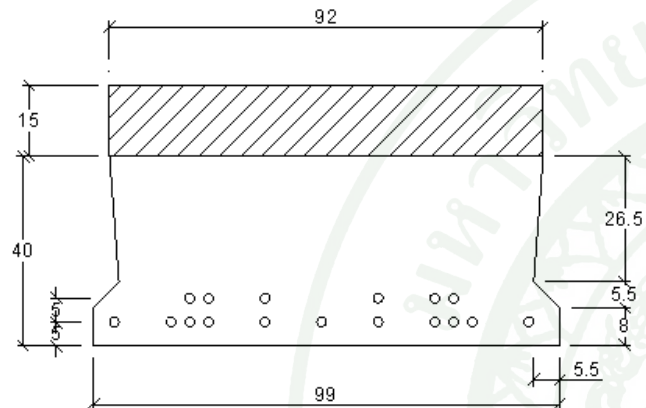
w แอสฟัลท์ =	2,300.00 kg./m ³
ความหนาของแอสฟัลท์ (t_a) =	5.00 cm.
น้ำหนักของแอสฟัลท์ทับหน้า =	115.00 kg./m.

การวิเคราะห์ค่า moment และ shear ที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง

MAXIMUM MOMENT

M_{DC} =	18,728.25 kg.-m./m.
M_{DW} =	1,437.50 kg.-m./m.

การวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด P.C. plank girder



**หน่วยเป็นเซนติเมตร

คุณสมบัติของหน้าตัด

$$A = 5,071.25 \text{ cm}^2$$

$$b = 92.00 \text{ cm}$$

$$\text{พื้นหนา} = 40.00 \text{ cm}$$

$$I_x = 1,314,134.51 \text{ cm}^4$$

$$C_b = 27.26 \text{ cm}$$

$$\text{topping} = 15.00 \text{ cm}$$

$$I_y = 3,606,834.18 \text{ cm}^4$$

$$d_p = 48.24 \text{ cm}$$

$$e = 20.50 \text{ cm}$$

คุณสมบัติของวัสดุ

- คอนกรีต

Modulus of elasticity

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน (plank)

กำลังอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน (topping)

$$E_c = 271,906 \text{ ksc}$$

$$f_c = 320 \text{ ksc}$$

$$f_{ci} = 280 \text{ ksc}$$

$$f_c = 240 \text{ ksc}$$

- ลวดอัดแรง

ลวดลีดอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น เกรด 250 , $\phi 3/8"$ (9.53mm.) ตามมาตรฐาน ASTM A416

The initial prestressing force per tendon after anchoring shall be , $P_j =$

$$6,330 \text{ kg./เส้น} \quad \text{จำนวน } 17 \text{ เส้น}$$

$$A_{ps} = 0.5161 \text{ cm}^2$$

$$E_s = 1,970,000 \text{ ksc}$$

$$P_u = 9,070.00 \text{ kg}$$

$$f_{pu} = 17,574.11 \text{ ksc}$$

$$P_y = 8,163.00 \text{ kg}$$

$$f_{py} = 15,816.70 \text{ ksc}$$

สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว

โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดคอมโพสิต

$$f_{py}/f_{pu} = \boxed{0.90}$$

ดังนั้น $r_p = \boxed{0.28}$

$$\beta_1 = \boxed{0.85} \text{ เนื่องจาก } f'_c < 300 \text{ ksc.}$$

จากสมการ
$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\}$$

$$\rho_p = \boxed{0.001977}$$

$$f_{ps} = \boxed{16,736.00} \text{ ksc.}$$

จาก
$$M_n = A_{ps} f_{ps} (d_p - a/2)$$

โดยที่
$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85 f'_c b}$$

$$a = \boxed{7.82} \text{ cm.}$$

$$M_n = \boxed{65,082.99} \text{ kg.-m.}$$

การหาค่า Distribution factor

1.) Distribution of live loads per lane for moment in interior beams

ช่องจราจร =	2 ช่อง
L =	10,000 mm.
$I_p =$	4.921E+10 mm ⁴ .

1.) สำหรับ 1 ช่องจราจร

$$k \left(\frac{b}{2.8L} \right)^{0.5} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.25}$$

$$DF = 0.22 \text{ lane / web}$$

$$\text{use } DF = 0.25 \text{ lane / web}$$

$N_b =$	16
$I_x =$	1.314.E+10 mm ⁴ .
k =	1.50

2.) สำหรับ 2 ช่องจราจรขึ้นไป

$$k \left(\frac{b}{7,600} \right)^{0.6} \left(\frac{b}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.06}$$

$$DF = 0.25 \text{ lane / web}$$

b =	920 mm.
A =	507,125 mm ² .
J =	3.360E+10

***หมายเหตุ

$$k = 2.5(N_b)^{-0.2} \geq 1.5$$

N_b = number of beams , stringers or girders

b = width of beam (mm.)

L = span of beam (mm.)

I = moment of inertia of beam (mm⁴.)

$$J = \frac{A^4}{40 I_p} \text{ (mm}^4\text{.)}$$

A = area of cross - section (mm².)

I_p = polar moment of inertia (mm⁴.)

การหาค่า LL

truck load

ใช้น้ำหนักบรรทุกทุกที่ที่มีวิเคราะห์ตาม AASHTO code (HS-20)

$$\text{maximum moment} = 58,345.20 \text{ kg.-m.} \quad * \text{ เมื่อเพิ่มน้ำหนักเพลาอีก 30\%}$$

ค่า Design load

1.moment

$$\begin{aligned} \text{Design load moment} &= 58,345.20 \text{ kg.-m.} \\ \text{moment distribution} &= 14,460.25 \text{ kg.-m.} \end{aligned}$$

RATING FACTOR ของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม

หลังเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

$$RF = \frac{\phi_c \phi_s \phi_R - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW)}{(\gamma_L)(LL)(1 + IM)}$$

condition rating = 7

for moment

$\phi_c = 1.00$ $\phi_s = 1.00$ $\phi = 0.90$

$\gamma_{DC} = 1.25$ $\gamma_{DW} = 1.50$

for shear

$\phi = 0.85$

$IM = 1.33$

INVENTORY $\gamma_L = 1.75$

OPERATING $\gamma_L = 1.35$

MOMENT RATING FACTOR

inventory RF = 1.39

operating RF = 1.80



มาตรฐาน ACI E706 (ACI Repair Application Procedures) ได้เสนอวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดการเสื่อมสภาพ คอนกรีตการหลุดร่อน และเหล็กเสริมเกิดสนิมดังนี้

1. ตรวจสอบตำแหน่งที่คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายเพื่อที่จะกำหนดพื้นที่ซ่อมแซมโดยการเคาะด้วยค้อน (Hammer Sounding) บริเวณผิวคอนกรีตที่มีปัญหาด้วยค้อน ซึ่งจะบอกถึงความหนาแน่นของคอนกรีตในบริเวณนั้น
2. กำหนดขอบเขตของการซ่อมแซมโดยการทำเครื่องหมายบริเวณพื้นคอนกรีต และตัดคอนกรีตให้เป็นช่องตามเครื่องหมายที่กำหนดไว้ การตัดคอนกรีตไม่ควรตัดให้มีความลึกกว่าระยะของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ถ้าหากเกิดการแยกชั้นระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนจากสนิมแต่อยู่นอกพื้นที่ที่ได้ตัดคอนกรีตให้ใช้วิธีการสกัดเปิดผิวคอนกรีตไปจนถึงบริเวณที่เหล็กเสริมไม่เกิดสนิมแล้วทำการตัดคอนกรีตเฉพาะบริเวณที่เหล็กเสริมเกิดสนิม ตัวอย่างการตัดคอนกรีตทิศทางแนวราบและแนวตั้งด้วยเลื่อยแสดงดังภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค1 การตัดคอนกรีตโดยเลื่อยตัดทิศทางแนวราบและแนวตั้ง

ที่มา: ACI E706 Repair Application Procedure (2007)

3. สกัดพื้นผิวคอนกรีตโดยใช้ค้อนกระแทก (Jack Hammer) เพื่อเปิดผิวคอนกรีตให้ถึงชั้นเหล็กเสริม ใช้กำลังกระแทกประมาณ 15 ปอนด์ ถึง 30 ปอนด์ ไม่ควรเกินกว่า 30 ปอนด์ เนื่องจากแรงกระแทกที่มีขนาดมากจะไปทำความเสียหายแก่เหล็กเสริม และควรใช้แรงกระแทกประมาณ 15

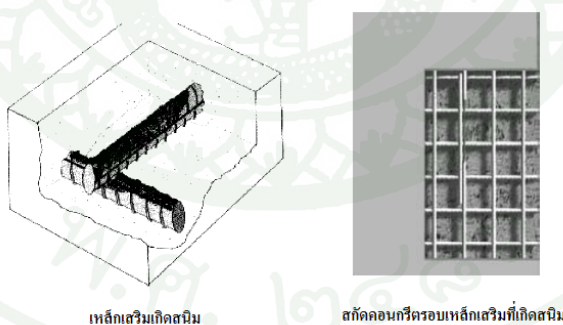
ปอนด์ สำหรับสกัดคอนกรีตในชั้นเดียวกับเหล็กเสริมเพื่อป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดความเสียหาย ตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ ค2



ภาพผนวกที่ ค2 การสกัดพื้นผิวคอนกรีตโดยใช้ค้อนกระแทกทิศทางแนวราบและแนวตั้ง

ที่มา: ACI E706 Repair Application Procedure (2007)

4. เมื่อสกัดคอนกรีตแล้วพบว่าเหล็กเสริมเกิดสนิมต้องทำการสกัดคอนกรีตรอบๆ ผิวเหล็กเสริมออกให้หมดโดยที่มีช่องว่างระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เป็นสนิมประมาณ 3/4 นิ้ว (20 มม.) สกัดจนถึงคอนกรีตที่แตกเนื่องจากการบวมตัวของสนิมตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ ค3



ภาพผนวกที่ ค3 การสกัดพื้นผิวคอนกรีตโดยใช้ค้อนกระแทกทิศทางแนวราบและแนวตั้ง

ที่มา: ACI E706 Repair Application Procedure (2007)

5. ตรวจสอบสภาพเหล็กเสริมคอนกรีตวัดขนาดเหล็กเสริมเปรียบเทียบกับข้อมูลแบบก่อสร้างเพื่อประเมินความรุนแรงของการเกิดสนิม หากพบว่าเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นสนิมทำให้

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงเกินร้อยละ 10 ควรเปลี่ยนเหล็กเสริมนั้นหรือตามเสริมความแข็งแรง ทั้งนี้ให้เป็นไปตามดุลยพินิจของวิศวกร หรือ ผู้ควบคุมงาน

6. ทำความสะอาดผิวคอนกรีตที่ได้ทำการสกัดเปิดผิวจนเห็นเหล็กเสริมเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะติดโดยใช้น้ำฉีดแรงดันสูง (แรงดันน้ำไม่เกิน 350 กก./ซม.²) หรือการขัดด้วยมือโดยใช้แปรง ตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ ค4



ภาพผนวกที่ ค4 การทำความสะอาดคอนกรีตและเหล็กเสริมทิศทางแนวราบและแนวตั้ง

ที่มา: ACI E706 Repair Application Procedure (2007)

7. ก่อนที่จะเทคอนกรีตเพื่อซ่อมแซมจะต้องทาน้ำยาประสานคอนกรีต (Bonding Agents) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตเดิมกับเนื้อคอนกรีตที่จะเทซ่อมแซมให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตที่นำมาซ่อมแซมควรมีกำลังอัดประลัยมากกว่ากำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีตเดิมและไม่ควรต่ำกว่า 4,000 ปอนด์/นิ้ว² (280 กก./ซม.²) ควรบ่มคอนกรีตที่ซ่อมแซมโดยให้ความชื้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน

การซ่อมแซมโครงสร้างสะพานเป็นขั้นตอนแรกก่อนที่จะมีการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้โครงสร้างเดิมมีกำลังรับน้ำหนักได้ดีขึ้น และหลังจากที่ทำการเสริมกำลังไปแล้วจะไม่มีปัญหาตามมา การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตสะพานเป็นไปตามมาตรฐาน มยผ. 1901-51 สำหรับงานวิจัยนี้มีการซ่อมแซมโครงสร้างสะพานก่อนที่จะทำการเสริมกำลัง คือ ค1. ซ่อมแซมคอนกรีตที่มีความเสียหาย ค2. ซ่อมแซมเหล็กเสริมที่มีการชำรุด

ค1. ซ่อมแซมคอนกรีตที่มีความเสียหาย

เมื่อมีการตรวจสอบโครงสร้างแล้วพบคอนกรีตที่มีความเสียหายจะต้องมีการประเมินสภาพคอนกรีตให้ถูกต้องว่ามีความเสียหายจากสาเหตุใด เพื่อให้มีการซ่อมแซมที่ถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพของโครงสร้างที่เกิดความเสียหาย เช่น ความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดจากการหลุดล่อน (Spalling) แสดงดังภาพผนวกที่ ค5 การหลุดล่อนนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่เหล็กเสริมเป็นสนิม ส่วนใหญ่แล้วเมื่อเกิดการหลุดล่อนจะสามารถเห็นเหล็กเสริมได้



ภาพผนวกที่ ค5 ลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับการซ่อมแซมคอนกรีตนั้นจะต้องสกัดคอนกรีตเดิมที่เกิดความเสียหายออกไปจนถึงเนื้อคอนกรีตที่ดี การสกัดคอนกรีตมีวิธีการทำงานหลายวิธีตามลักษณะของโครงสร้างที่เข้าถึง เช่น ใช้เครื่องสกัดคอนกรีตที่ใช้แรงกระแทก แสดงดังภาพผนวกที่ ค6 วิธีนี้จะทำให้คอนกรีตที่ถูกสกัดแตกออกมาเป็นก้อนที่ใหญ่และพื้นที่ ที่ทำการสกัดจะเป็นวงกว้างควบคุมบริเวณการสกัดได้ยาก การตัดคอนกรีตด้วยเลื่อย แสดงดังภาพผนวกที่ ค7 ซึ่งเป็นวิธีที่กำหนดตำแหน่งที่ต้องการสกัดคอนกรีตได้อย่างแม่นยำและ ไม่ก่อให้เกิดแรงกระแทกต่อโครงสร้างที่อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย



ภาพผนวกที่ ค6 การสกัดคอนกรีตด้วยเครื่องสกัดคอนกรีตแบบกระแทก



ภาพผนวกที่ ค7 การตัดคอนกรีตด้วยเลื่อยบริเวณที่มีความเสียหายเพื่อทำการซ่อมแซม

เมื่อสกัดเปิดผิวคอนกรีตที่เกิดความเสียหายออกไปแล้วจะต้องพิจารณาวิธีการซ่อมแซมตามสภาพและตำแหน่งของโครงสร้าง เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณเหนือหัว จะมีวิธีการซ่อมแซมโดยใช้วัสดุที่ใช้ในการฉาบประเภทมอร์ตาร์ทำให้กำลังสูง แสดงดังภาพผนวกที่ ค8 สำหรับโครงสร้างที่อยู่ตำแหน่งที่สามารถเข้าไปทำงานได้ง่ายและสามารถเทคอนกรีตให้ไหลจากที่สูงลงมาด้านล่างได้ ทำการซ่อมแซมโดยการตั้งแบบหล่อคอนกรีต ซึ่งแบบหล่อจะต้องมีความแข็งแรงเพื่อสามารถรับแรงดันคอนกรีตได้ ก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตจะต้องมีการทำความสะอาดผิวคอนกรีตเดิมและผิวของแบบหล่อเพื่อให้เนื้อคอนกรีตใหม่มีความสามารถยึดเหนี่ยวกับผิวคอนกรีตเดิมได้ดี คอนกรีตที่ใช้จะต้องมีความสามารถในการเทที่ดี สำหรับปูนซีเมนต์ที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาซ่อมแซมในส่วน of โครงสร้างคอนกรีตจะเป็นประเภท Non Shrink Grount เนื่องจากสามารถไหล

ได้ดี รับกำลังอัดได้สูงในระยะเวลาสั้น เมื่อผิวหน้าคอนกรีตเกิดการแข็งตัวแล้วจะต้องทำการบ่ม เพื่อเป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเร็วเกินไป การบ่มคอนกรีตมีหลายวิธีซึ่งการเลือกวิธีการบ่มนั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และสภาพของ โครงสร้าง ตัวอย่างการบ่มคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแสดงดังภาพผนวกที่ ค9 ซึ่งเป็นการบ่ม โดยใช้แผ่นพลาสติกคลุม ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานเนื่องจากมีน้ำหนักเบา



ภาพผนวกที่ ค8 วิธีการซ่อมแซมโครงสร้างบริเวณเหนือหัวโดยการฉาบ



ภาพผนวกที่ ค9 การบ่มวัสดุซ่อมแซมคอนกรีตด้วยวิธีใช้แผ่นพลาสติกคลุม

ค2. ซ่อมแซมเหล็กเสริมที่มีการชำรุด

การซ่อมแซมเหล็กเสริมคอนกรีตที่มีการชำรุดส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับสนิมส่วนมาก โครงสร้างที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมจะเป็นโครงสร้างที่สร้างในสภาวะแวดล้อมที่เอื้อต่อการเกิดสนิม เช่น สภาพที่เป็นกรด ตามชายทะเลที่มีไอเกลือเข้มข้น เป็นต้น สนิมเหล็กเป็นสารประกอบระหว่างเหล็กกับออกซิเจนซึ่งกระบวนการเกิดสนิมนี้มีปัจจัยหลักคือ น้ำ+เหล็ก+ออกซิเจน ซึ่งมีชื่อทางเคมีคือ $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$

โครงสร้างสะพานเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กมากเนื่องจากตั้งอยู่ที่สภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง ดังนั้นเมื่อเหล็กที่อยู่ภายในคอนกรีตเกิดสนิม สนิมเหล็กจะกักร่อนหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงจนกระทั่งอาจไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักใช้งาน ตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ ค10 นอกจากนี้การเกิดสนิมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดสนิมและจะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมนั้นเกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น และหากไม่มีการซ่อมแซมเหล็กเสริมที่สนิมกักร่อนก็จะทำให้การแตกร้าวลามไปเป็นบริเวณกว้างได้ ตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ ค11



ภาพผนวกที่ ค10 ลักษณะเหล็กเสริมที่ถูกการกัดกร่อนจากสนิม



ภาพผนวกที่ ค11 ลักษณะโครงสร้างสะพานส่วนพื้นถูกการกัดกร่อนจากสนิมเหล็ก

การซ่อมแซมเหล็กเสริมคอนกรีตที่เกิดจากสนิมเหล็กจะต้องทำการสกัดเปิดผิวคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมที่เป็นสนิมออกไปจนถึงเนื้อเหล็กที่ไม่ได้เกิดสนิมรวมไปถึงคอนกรีตที่บวมตัวจากสนิม ตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ ค12 เมื่อทำการตรวจสอบสภาพผิวเหล็กที่เกิดสนิมหากพบว่าเหล็กเสริมเป็นสนิมที่ผิวเหล็กเพียงเล็กน้อยให้ทำการซ่อมแซมโดยใช้แปรงทองเหลืองหรือใช้เครื่องขัดบริเวณผิวเหล็กที่เกิดสนิมแล้วเคลือบผิวเหล็กด้วยวัสดุที่ป้องกันสนิมแล้วจึงทำความสะอาดผิวคอนกรีตและทำการเทคอนกรีตดังหัวข้อที่ ค1. และหลังจากตรวจสอบสภาพผิวเหล็กพบว่าเหล็กเสริมคอนกรีตเกิดสนิมมากจนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงมากกว่าร้อยละ 10 จะต้องทำการตัดเหล็กเสริมที่เสียหายออกแล้วต่อทาบด้วยเหล็กเสริมใหม่ที่มีขนาดเหล็กเสริมเท่ากัน แสดงดังภาพผนวกที่ ค13 ระยะห่างเหล็กเสริมให้มีระยะห่างตามข้อกำหนด ACI 318 หรือตามตารางผนวกที่ ค1 หลังจากทำการต่อทาบเหล็กเสริมเดิมกับเหล็กเสริมใหม่แล้วทำการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุที่ป้องกันสนิมแล้วจึงทำความสะอาดผิวคอนกรีตและทำการเทคอนกรีตดังหัวข้อที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค12 การสกัดเปิดผิวคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมที่เกิดสนิม



ภาพผนวกที่ ค13 การซ่อมแซมเหล็กเสริมคอนกรีตโดยการต่อทาบเหล็กเสริมใหม่

ตารางผนวกที่ ก1 ระยะทาบเหล็กเสริมโดยประมาณ

ประเภทเหล็กเสริม	กำลังรับแรงดึง ที่จุดคราก (ksc)	ระยะทาบสำหรับเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)		
		รับแรงดึง	รับแรงอัด $f'c \geq 200ksc$	รับแรงอัด $f'c \leq 200ksc$
เหล็กเส้นกลม	2,400	$48d_b$	$40d_b$	$54d_b$
เหล็กข้ออ้อย	3,000	$24d_b$	$20d_b$	$27d_b$
เหล็กข้ออ้อย	4,000	$30d_b$	$24d_b$	$32d_b$
เหล็กข้ออ้อย	5,000	$36d_b$	$30d_b$	$40d_b$

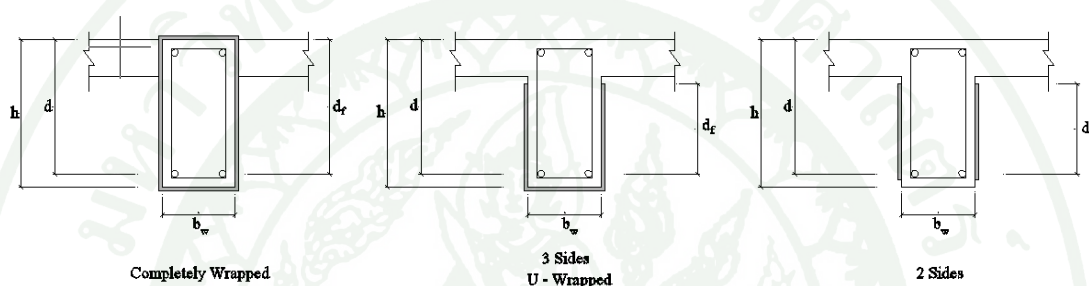
เมื่อ d_b คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

$f'c$ คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2551)



การเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคอมโพสิตมีวิธีเสริมกำลังโดยการหุ้ม (Wrapping) ซึ่งการหุ้มโครงสร้างส่วนที่ต้องการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนมีด้วยกันอยู่ 3 แบบ คือ การหุ้ม FRP แบบรัดรอบ (Completely Wrapped), การหุ้ม FRP เป็นรูปตัวยู (U - Wrapped) หรือ การติด 3 ด้าน และการติด FRP เพียงสองด้าน (2 Sides) แสดงดังภาพผนวกที่ ง1 สำหรับวิธีการติดตั้งในแต่ละแบบนั้นจะพิจารณาจากการเข้าถึงของตัวโครงสร้างที่จะเสริมกำลังว่ามีอุปสรรคมากน้อยเพียงใด สำหรับการออกแบบจะมีตัวคูณประกอบเพื่อลดกำลังซึ่งในแต่ละวิธีการติดตั้งจะมีค่าที่ต่างกัน แสดงดังตารางผนวกที่ ง1



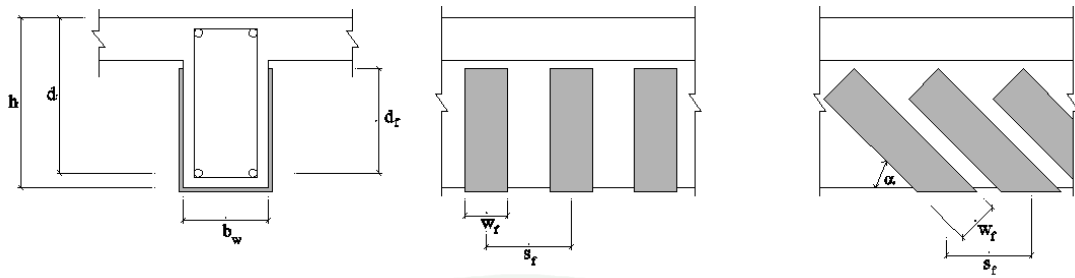
ภาพผนวกที่ ง1 รูปแบบการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนคาน

ตารางผนวกที่ ง1 ตัวประกอบค่าลดกำลังของระบบ FRP ที่มีผลจากวิธีติดตั้งเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน

Reduction Factor	Wrapping Schemes
$\psi_f = 0.95$	Completely Wrapped Member
$\psi_f = 0.85$	U - Wrapped and Two Sides Opposite Schemes

ที่มา: ACI 440.2R-08

สำหรับการคำนวณออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างต้านทานแรงเฉือนจะต้องสำรวจชิ้นส่วนโครงสร้างว่าสามารถเข้าไปติดตั้ง FRP ในลักษณะใดเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบสำหรับการกำหนดความกว้างของแผ่น FRP (w_f), ระยะห่างระหว่างแผ่น FRP (s_f) และความลึกประสิทธิภาพของ FRP (d_f) แสดงดังภาพผนวกที่ ง2



ภาพผนวกที่ ๓๒ ระยะและขนาดของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนหน้าตัดคานรูปตัว U

ความเครียดประสิทธิผลสำหรับการออกแบบเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย FRP เป็นค่าความเครียดที่กำหนดให้ FRP เกิดการวิบัติ สมการคำนวณแบ่งได้ตามลักษณะของการติดตั้ง คือ การหุ้ม FRP แบบรัดรอบ (Completely Wrapped) มาตรฐาน ACI 440.2R-08 ได้กำหนดให้ค่าความเครียดในสภาวะนี้มีค่าไม่เกินร้อยละ 0.4 แสดงดังสมการที่ 31

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \quad (31)$$

สำหรับสมการคำนวณความเครียดประสิทธิผลสำหรับการหุ้ม FRP เป็นรูปตัวยู (U - Wrapped) และการติด FRP เพียงสองด้าน (2 Sides) แสดงดังสมการที่ 32

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (32)$$

โดยที่ค่า k_v เป็นค่าสัมประสิทธิ์ลดกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่าง FRP กับผิวคอนกรีต คำนวณได้จากสมการที่ 33

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad \text{สำหรับหน่วย SI} \quad (33)$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad \text{สำหรับหน่วย นิ้ว - ปอนด์}$$

โดยที่ค่า L_e , k_1 และ k_2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 34 ถึง 36

$$L_e = \frac{23,300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad \text{สำหรับหน่วย SI} \quad (34)$$

$$L_e = \frac{2,500}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad \text{สำหรับหน่วย นิ้ว - ปอนด์}$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad \text{สำหรับหน่วย SI} \quad (35)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{4,000} \right)^{2/3} \quad \text{สำหรับหน่วย นิ้ว - ปอนด์}$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad \text{สำหรับการติดตั้งแบบ U - Wrapped} \quad (36)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} \quad \text{สำหรับการติดตั้งแบบ 2 - Sides}$$

เมื่อ L_e คือ ความยาวประสิทธิผลของการเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือนด้วย FRP

k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลดกำลังการยึดเหนี่ยวจากกำลังของคอนกรีต

k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลดกำลังการยึดเหนี่ยวจากรูปแบบการติดตั้งการเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือนจาก FRP

d_{fv} คือ ความลึกประสิทธิผลของการเสริมกำลังด้านทานแรงเฉือนภายนอกด้วย FRP

การคำนวณค่ากำลังด้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มจากการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP คำนวณได้จากสมการที่ 37

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f} \quad (37)$$

โดยที่

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (38)$$

- เมื่อ V_f คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มจากการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP
 A_{fv} คือ พื้นที่การเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนภายนอกด้วย FRP
 α คือ มุมของการติดตั้งการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนภายนอกด้วย FRP
 S_f คือ ระยะห่างของ FRP จากศูนย์กลางแผ่นถึงศูนย์กลางแผ่น

กำลังต้านทานแรงเฉือนทั้งหมดของหน้าตัดที่เสริมกำลังภายนอกด้วย FRP ประกอบด้วย กำลังต้านทานแรงเฉือนจากหน้าตัดโครงสร้าง กำลังต้านทานแรงเฉือนจากเหล็กปลอก และกำลังต้านทานแรงเฉือนจากการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการที่ 39

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \geq V_u \quad (39)$$

- เมื่อ V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ (Nominal Shear Strength)
 V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนจากหน้าตัดคอนกรีต
 V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนจากเหล็กปลอก
 V_f คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนจากการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP
 V_u คือ แรงเฉือนประลัยจากน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่
 ϕ คือ ตัวประกอบลดกำลังของโครงสร้างรับแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ 0.75
 ψ_f คือ ตัวประกอบลดกำลังของ FRP สำหรับเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนมีค่า

เท่ากับ 0.85

ขีดจำกัดการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP มีข้อกำหนดตามสมการที่ 40

$$V_s + V_f \leq 0.66\sqrt{f'_c}b_w d \quad \text{สำหรับหน่วย SI} \quad (40)$$

$$V_s + V_f \leq 8\sqrt{f'_c}b_w d \quad \text{สำหรับหน่วย นิ้ว - ปอนด์}$$

ภาคผนวก จ

การออกแบบเสริมกำลังต้านทานโมเมนต์คดของโครงสร้างสะพานส่วนพื้นด้วยวัสดุ CFRP

เสริมกำลังโครงสร้างสะพานข้ามคลองเตย ฝั่ง LT ด้วย CFRP

คุณสมบัติของหน้าตัดโครงสร้าง คสล

ความลึกของหน้าตัด	$d_f =$	530	mm	
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	$d =$	500	mm	
ความกว้างของหน้าตัด	$b =$	1,000	mm	
พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม	$A_s =$	5,454	mm^2	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	$f'_c =$	21.41	N/mm^2	
กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริม	$f_y =$	305.81	N/mm^2	
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	$E_c =$	21,745.68	N/mm^2	$E_c = 4,700(f'_c)^{1/2}$
โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม	$E_s =$	207,951.07	N/mm^2	
อัตราส่วนโมดูลัส	$n =$	9.56		$n = E_s / E_c$
อัตราส่วนหน้าตัดพื้นที่เหล็กเสริมต่อคอนกรีต	$\rho =$	0.010908		$\rho = A_s / bd$
ระยะจากขอบบนของหน้าตัดถึงแนวแกนสะเทิน	$kd =$	182.10	mm	$kd = [(\rho n)^2 + 2\rho n]^{1/2} - \rho n$
โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแตกร้าว	$I_{cr} =$	7.28E+09	mm^4	$I_{cr} = [b(kd)^3]/3 + nA_s(d-kd)^2$
กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล.ที่ไม่เสริม CFRP	$\phi M_n \text{ without CFRP} =$	579.51	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักคงที่	$M_{DL} =$	226.49	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น	Factor Moment Mu =	672.40	Kn-m/m	<----- ต้องเสริมกำลังโครงสร้าง

คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

ความหนาต่อ 1 แผ่น

$$t_f = 0.176 \text{ mm}$$

กำลังรับแรงดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$$f_{fu}^* = 3,800 \text{ N/mm}^2$$

ความเครียดดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$$\epsilon_{fu}^* = 0.0155 \text{ mm/mm}$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของ CFRP

$$E_f = 240,000 \text{ N/mm}^2$$

จำนวนชั้น CFRP ที่ใช้

$$n = 2 \text{ Layers}$$

ความกว้างของ CFRP ที่ใช้

$$w_f = 500 \text{ mm}$$

พื้นที่ของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

$$A_f = 176.00 \text{ mm}^2$$

$$A_f = n w_f t_f$$

คำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของ CFRP

ตัวประกอบลดกำลังจากสภาพแวดล้อม

$$C_E = 0.85$$

กำลังรับแรงดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$$f_{fu} = 3,230.00 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

ความเครียดดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$$\epsilon_{fu} = 0.01318 \text{ mm/mm}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

คำนวณค่าความเครียดในสภาวะหน้าตัดคอนกรีตแตกร้าว

ค่าความเครียดของคอนกรีตในสภาวะติดตั้ง CFRP

$$\epsilon_{bi} = 0.00050$$

$$\epsilon_{bi} = M_{DL}(d_f - kd) / I_{cr} E_c$$

คำนวณค่าความเครียดออกแบบของระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

Debonding Failure Mode	$\epsilon_{fd} =$	0.00653	USE	0.00653	$0.41(f'_c / n E_f t_f)^{1/2} \leq 0.90 \epsilon_{fu}$
	$0.9 \epsilon_{fu} =$	0.011858			
ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทินโดยประมาณ	$c =$	128.94	mm		$c \approx 0.20d$

คำนวณค่าความเครียดประสิทธิภาพของวัสดุ CFRP

ความเครียดประสิทธิภาพของ CFRP	$\epsilon_{fe} =$	0.00883	USE	0.00653	$\epsilon_{fe} = [0.003(d_f - c) / c] - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$
ค่าความเครียดของคอนกรีตที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP	$\epsilon_c =$	0.00226			$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[c / (d_f - c)]$
ค่าความเครียดของเหล็กเสริมที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP	$\epsilon_s =$	0.00650			$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[(d - c) / (d_f - c)]$

คำนวณหน่วยแรงของเหล็กเสริมและวัสดุ CFRP

หน่วยแรงของเหล็กเสริม	$f_s =$	1,351.39	N/mm ²		$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$
	ค่า f_s ที่ใช้ =	305.81	N/mm ²		
หน่วยแรงของวัสดุ CFRP	$f_{fe} =$	1,566.37	N/mm ²		$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$

คำนวณผลรวมแรงภายในและตรวจสอบแรงสมดุลของหน้าตัด

อัตราส่วนของความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัด	$\beta_1 =$	0.767			$\beta_1 = (4\epsilon'_c - \epsilon_c) / (6\epsilon'_c - 2\epsilon_c)$
	$\alpha_1 =$	0.918			$\alpha_1 = (3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2) / 3\beta_1 \epsilon_c^2$
ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทิน	$c =$	128.94	mm		$c = (A_s f_s + A_f f_{fe}) / (\alpha_1 f'_c \beta_1 b)$

หากค่า C ที่สมมติมีค่าไม่เท่ากับค่า C ที่ได้จากการคำนวณ ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก
ปรับค่า C ที่สมมติให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดโครงสร้าง คสล ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล

$$M_{ns} = 751.44 \text{ KN-m/m}$$

$$M_{ns} = A_s f_s [d - (\beta_1 c / 2)]$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด ที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุ CFRP

$$M_{nf} = 132.47 \text{ KN-m/m}$$

$$M_{nf} = A_f f_{fc} [d_f - (\beta_1 c / 2)]$$

ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้างต้านทานโมเมนต์ดัด

$$\phi = 0.90$$

ตัวคูณลดกำลังของระบบการเสริมกำลังด้วย FRP

$$\Psi_f = 0.85$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 777.64 \text{ KN-m/m}$$

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + \Psi_f M_{nf})$$

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 777.64 > 672.40$$

$$\phi M_n > M_u \text{ ---> OK}$$

เสริมกำลังโครงสร้างสะพานข้ามคลองบางพลัด ฝั่ง LT ด้วย CFRP

คุณสมบัติของหน้าตัดโครงสร้าง คสล

ความลึกของหน้าตัด	$d_f =$	320	mm	
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	$d =$	350	mm	
ความกว้างของหน้าตัด	$b =$	1,000	mm	
พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม	$A_s =$	3,272	mm ²	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	$f'_c =$	21.41	N/mm ²	
กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริม	$f_y =$	305.81	N/mm ²	
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	$E_c =$	21,745.68	N/mm ²	$E_c = 4,700(f'_c)^{1/2}$
โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม	$E_s =$	207,951.07	N/mm ²	
อัตราส่วนโมดูลัส	$n =$	9.56		$n = E_s / E_c$
อัตราส่วนหน้าตัดพื้นที่เหล็กเสริมต่อคอนกรีต	$\rho =$	0.009349		$\rho = A_s / bd$
ระยะจากขอบบนของหน้าตัดถึงแนวแกนสะเทิน	$kd =$	119.98	mm	$kd = [(\rho n)^2 + 2\rho n]^{1/2} - \rho n$
โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเดกกร้าว	$I_{cr} =$	2.23E+09	mm ⁴	$I_{cr} = [b(kd)^3]/3 + nA_s(d-kd)^2$
กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล.ที่ไม่เสริม CFRP	ϕM_n without CFRP =	263.46	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักคงที่	$M_{DL} =$	64.89	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น	Factor Moment Mu =	282.20	Kn-m/m	<----- ต้องเสริมกำลังโครงสร้าง

คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

ความหนาต่อ 1 แผ่น

$$t_f = 0.176 \text{ mm}$$

กำลังรับแรงดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$$f_{fu}^* = 3,800 \text{ N/mm}^2$$

ความเครียดดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$$\epsilon_{fu}^* = 0.0155 \text{ mm/mm}$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของ CFRP

$$E_f = 240,000 \text{ N/mm}^2$$

จำนวนชั้น CFRP ที่ใช้

$$n = 2 \text{ Layers}$$

ความกว้างของ CFRP ที่ใช้

$$w_f = 500 \text{ mm}$$

พื้นที่ของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

$$A_f = 176.00 \text{ mm}^2$$

$$A_f = n w_f t_f$$

คำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของ CFRP

ตัวประกอบลดกำลังจากสภาพแวดล้อม

$$C_E = 0.85$$

กำลังรับแรงดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$$f_{fu} = 3,230.00 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

ความเครียดดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$$\epsilon_{fu} = 0.01318 \text{ mm/mm}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

คำนวณค่าความเครียดในสภาวะหน้าตัดคอนกรีตแตกร้าว

ค่าความเครียดของคอนกรีตในสภาวะติดตั้ง CFRP

$$\epsilon_{bi} = 0.00027$$

$$\epsilon_{bi} = M_{DL}(d_f - kd) / I_{cr} E_c$$

คำนวณค่าความเครียดออกแบบของระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

Debonding Failure Mode	$\epsilon_{fd} =$	0.00653	USE	0.00653	$0.41(f'_c / n E_f t_f)^{1/2} \leq 0.90 \epsilon_{fu}$
	$0.9 \epsilon_{fu} =$	0.011858			
ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทินโดยประมาณ	$c =$	83.03	mm		$c \approx 0.20d$

คำนวณค่าความเครียดประสิทธิภาพของวัสดุ CFRP

ความเครียดประสิทธิภาพของ CFRP	$\epsilon_{fe} =$	0.00829	USE	0.00653	$\epsilon_{fe} = [0.003(d_f - c) / c] - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$
ค่าความเครียดของคอนกรีตที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP	$\epsilon_c =$	0.00238			$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[c / (d_f - c)]$
ค่าความเครียดของเหล็กเสริมที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP	$\epsilon_s =$	0.00765			$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[(d - c) / (d_f - c)]$

คำนวณหน่วยแรงของเหล็กเสริมและวัสดุ CFRP

หน่วยแรงของเหล็กเสริม	$f_s =$	1,591.69	N/mm ²		$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$
	ค่า f_s ที่ใช้ =	305.81	N/mm ²		
หน่วยแรงของวัสดุ CFRP	$f_{fe} =$	1,566.37	N/mm ²		$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$

คำนวณผลรวมแรงภายในและตรวจสอบแรงสมดุลของหน้าตัด

อัตราส่วนของความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัด	$\beta_1 =$	0.776			$\beta_1 = (4\epsilon'_c - \epsilon_c) / (6\epsilon'_c - 2\epsilon_c)$
	$\alpha_1 =$	0.925			$\alpha_1 = (3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2) / 3\beta_1 \epsilon_c^2$
ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทิน	$c =$	83.03	mm		$c = (A_s f_s + A_f f_{fe}) / (\alpha_1 f'_c \beta_1 b)$

หากค่า C ที่สมมติมีค่าไม่เท่ากับค่า C ที่ได้จากการคำนวณ ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก
ปรับค่า C ที่สมมติให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดโครงสร้าง คสล ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล

$$M_{ns} = 317.97 \text{ KN-m/m}$$

$$M_{ns} = A_s f_s [d - (\beta_1 c / 2)]$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด ที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุ CFRP

$$M_{nf} = 79.33 \text{ KN-m/m}$$

$$M_{nf} = A_f f_{fc} [d_f - (\beta_1 c / 2)]$$

ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้างต้านทานโมเมนต์ดัด

$$\phi = 0.90$$

ตัวคูณลดกำลังของระบบการเสริมกำลังด้วย FRP

$$\Psi_f = 0.85$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 346.86 \text{ KN-m/m}$$

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + \Psi_f M_{nf})$$

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 346.86 > 282.20$$

$$\phi M_n > M_u \text{ ---> OK}$$

เสริมกำลังโครงสร้างสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์ ด้วย CFRP

คุณสมบัติของหน้าตัดโครงสร้าง คสล

ความลึกของหน้าตัด	$d_f =$	530	mm	
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	$d =$	500	mm	
ความกว้างของหน้าตัด	$b =$	1,000	mm	
พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม	$A_s =$	3,776	mm ²	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	$f'_c =$	21.41	N/mm ²	
กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริม	$f_y =$	305.81	N/mm ²	
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	$E_c =$	21,745.68	N/mm ²	$E_c = 4,700(f'_c)^{1/2}$
โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม	$E_s =$	207,951.07	N/mm ²	
อัตราส่วนโมดูลัส	$n =$	9.56		$n = E_s / E_c$
อัตราส่วนหน้าตัดพื้นที่เหล็กเสริมต่อคอนกรีต	$\rho =$	0.007552		$\rho = A_s / bd$
ระยะจากขอบบนของหน้าตัดถึงแนวแกนสะเทิน	$kd =$	157.32	mm	$kd = [(\rho n)^2 + 2\rho n]^{1/2} - \rho n$
โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเดกกร้าว	$I_{cr} =$	5.54E+09	mm ⁴	$I_{cr} = [b(kd)^3]/3 + nA_s(d-kd)^2$
กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล.ที่ไม่เสริม CFRP	ϕM_n without CFRP =	413.66	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักคงที่	$M_{DL} =$	154.21	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น	Factor Moment Mu =	427.29	Kn-m/m	<----- ต้องเสริมกำลังโครงสร้าง

คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

ความหนาต่อ 1 แผ่น

$$t_f = 0.176 \text{ mm}$$

กำลังรับแรงดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$$f_{fu}^* = 3,800 \text{ N/mm}^2$$

ความเครียดดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$$\epsilon_{fu}^* = 0.0155 \text{ mm/mm}$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของ CFRP

$$E_f = 240,000 \text{ N/mm}^2$$

จำนวนชั้น CFRP ที่ใช้

$$n = 2 \text{ Layers}$$

ความกว้างของ CFRP ที่ใช้

$$w_f = 400 \text{ mm}$$

พื้นที่ของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

$$A_f = 140.80 \text{ mm}^2$$

$$A_f = n w_f t_f$$

คำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของ CFRP

ตัวประกอบลดกำลังจากสภาพแวดล้อม

$$C_E = 0.85$$

กำลังรับแรงดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$$f_{fu} = 3,230.00 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

ความเครียดดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$$\epsilon_{fu} = 0.01318 \text{ mm/mm}$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

คำนวณค่าความเครียดในสภาวะหน้าตัดคอนกรีตแตกร้าว

ค่าความเครียดของคอนกรีตในสภาวะติดตั้ง CFRP

$$\epsilon_{bi} = 0.00048$$

$$\epsilon_{bi} = M_{DL}(d_f - kd) / I_{cr} E_c$$

คำนวณค่าความเครียดออกแบบของระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

Debonding Failure Mode	$\epsilon_{fd} =$	0.00653	USE	0.00653	$0.41(f'_c / n E_f t_p)^{1/2} \leq 0.90 \epsilon_{fu}$
	$0.9 \epsilon_{fu} =$	0.011858			
ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทินโดยประมาณ	$c =$	104.63	mm		$c \approx 0.20d$

คำนวณค่าความเครียดประสิทธิภาพของวัสดุ CFRP

ความเครียดประสิทธิภาพของ CFRP	$\epsilon_{fe} =$	0.01172	USE	0.00653	$\epsilon_{fe} = [0.003(d_f - c) / c] - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$
ค่าความเครียดของคอนกรีตที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP	$\epsilon_c =$	0.00172			$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[c / (d_f - c)]$
ค่าความเครียดของเหล็กเสริมที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP	$\epsilon_s =$	0.00651			$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[(d - c) / (d_f - c)]$

คำนวณหน่วยแรงของเหล็กเสริมและวัสดุ CFRP

หน่วยแรงของเหล็กเสริม	$f_s =$	1,353.72	N/mm ²		$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$
	ค่า f_s ที่ใช้ =	305.81	N/mm ²		
หน่วยแรงของวัสดุ CFRP	$f_{fe} =$	1,566.37	N/mm ²		$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$

คำนวณผลรวมแรงภายในและตรวจสอบแรงสมดุลของหน้าตัด

อัตราส่วนของความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัด	$\beta_1 =$	0.734			$\beta_1 = (4\epsilon'_c - \epsilon_c) / (6\epsilon'_c - 2\epsilon_c)$
	$\alpha_1 =$	0.837			$\alpha_1 = (3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2) / 3\beta_1 \epsilon_c^2$
ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทิน	$c =$	104.63	mm		$c = (A_s f_s + A_f f_{fe}) / (\alpha_1 f'_c \beta_1 b)$

หากค่า C ที่สมมติมีค่าไม่เท่ากับค่า C ที่ได้จากการคำนวณ ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก
ปรับค่า C ที่สมมติให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดโครงสร้าง คสล ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล

$$M_{ns} = 533.04 \text{ KN-m/m}$$

$$M_{ns} = A_s f_s [d - (\beta_1 c / 2)]$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด ที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุ CFRP

$$M_{nf} = 108.42 \text{ KN-m/m}$$

$$M_{nf} = A_f f_{fc} [d_f - (\beta_1 c / 2)]$$

ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้างต้านทานโมเมนต์ดัด

$$\phi = 0.90$$

ตัวคูณลดกำลังของระบบการเสริมกำลังด้วย FRP

$$\Psi_f = 0.85$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 562.68 \text{ KN-m/m}$$

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + \Psi_f M_{nf})$$

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 562.68 > 427.29$$

$$\phi M_n > M_u \text{ ---> OK}$$

เสริมกำลังโครงสร้างสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาาม ด้วย CFRP

คุณสมบัติของหน้าตัดโครงสร้าง คอนกรีตอัดแรง

ความลึกของหน้าตัด	$d_f =$	550	mm	
ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด	$d_p =$	475	mm	
ความกว้างของหน้าตัด	$b =$	990	mm	
ระยะจากขอบบนของหน้าตัดถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัด	$y_t =$	275	mm	
พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรง	$A_p =$	877	mm ²	
กำลังอัดประลัยของคอนกรีตอัดแรง	$f'_c =$	28.54	N/mm ²	
กำลังรับแรงดึงครากของลวดอัดแรง	$f_{py} =$	1,612.30	N/mm ²	
กำลังรับแรงดึงประสิทธิภาพของลวดอัดแรง	$f_{pe} =$	1,147.00	N/mm ²	
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	$E_c =$	2.51E+04	N/mm ²	$E_c = 4,700(f'_c)^{1/2}$
โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง	$E_p =$	2.01E+05	N/mm ²	
โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด	$I_g =$	1.37E+10	mm ⁴	
รัศมีจําเริญ	$r =$	158.77	mm	$r = (I_g/A_c)^{1/2}$
ความเครียดประสิทธิภาพของลวดอัดแรง	$\epsilon_{pe} =$	0.00571		$\epsilon_{pe} = f_{pe} / p_e$
แรงดึงประสิทธิภาพ	$P_e =$	1,006,343.39	N	$P_e = A_p f_{pe}$
ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัด	$e =$	200.00	mm	$e = d_p - y_t$
กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คอน.ที่ไม่เสริม CFRP	ϕM_n without CFRP =	567.24	Kn-m/m	
โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักคงที่	$M_{DL} =$	260.62	Kn-m/m	

โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น

Factor Moment Mu = 603.70 Kn-m/m

<----- ต้องเสริมกำลังโครงสร้าง

คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

ความหนาต่อ 1 แผ่น

$t_f = 0.176$ mm

กำลังรับแรงดึงประลัยของวัสดุ CFRP

$f_{fu}^* = 3,800$ N/mm²

Rupture Strain

$\epsilon_{fu}^* = 0.016$ mm/mm

โมดูลัสยืดหยุ่นของ CFRP

$E_f = 240,000$ N/mm²

จำนวนชั้น CFRP ที่ใช้

$n_f = 4$ Layers

ความกว้างของ CFRP ที่ใช้

$w_f = 600$ mm

พื้นที่ของวัสดุเสริมกำลัง CFRP

$A_f = 422.40$ mm²

$$A_f = n_f w_f t_f$$

คำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของ CFRP

ตัวประกอบลดกำลังจากสภาพแวดล้อม

$C_E = 0.95$

กำลังรับแรงดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$f_{fu} = 3,610.00$ N/mm²

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

ความเค้นดึงประลัยออกแบบของวัสดุ CFRP

$\epsilon_{fu} = 0.01473$ mm/mm

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

คำนวณค่าความเครียดในสภาวะหน้าตัดคอนกรีตแตกร้าว

ค่าความเครียดของคอนกรีตในสภาวะติดตั้ง CFRP

$$\epsilon_{bi} = -2.62E-05$$

$$\epsilon_{bi} = (-P_e / E_c A_c)[1 + (e y_b / r^2)] + M_{DL} y_b / E_c I_g$$

คำนวณค่าความเครียดออกแบบของระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

Debonding Failure Mode

$$\epsilon_{fd} = 0.00533$$

USE

$$0.00533$$

$$0.9\epsilon_{fu} = 0.01325$$

$$0.41(f'_c / nE_f t_f)^{1/2} \leq 0.90\epsilon_{fu}$$

ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทินโดยประมาณ

$$c = 123.27 \text{ mm}$$

$$c \approx 0.20d$$

คำนวณค่าความเครียดประสิทธิผลของวัสดุ CFRP

ความเครียดประสิทธิผลของ CFRP

$$\epsilon_{fe} = 0.01041$$

USE

$$0.00533$$

$$\epsilon_{fe} = [0.003(d_f - c) / c] - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$$

ค่าความเครียดของคอนกรีตที่โครงสร้างเสริมกำลังด้วย CFRP

$$\epsilon_c = 0.00153$$

$$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[c / (d_f - c)]$$

ค่าความเครียดของลวดอัดแรง

$$\epsilon_{pnet} = 0.00437$$

$$\epsilon_{pnet} = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi})[(d_p - c) / (d_f - c)]$$

ค่าความเครียดของลวดอัดแรงระบุ (เกรด 250)

$$\epsilon_{ps} = 0.01027$$

USE

$$0.01027$$

$$\epsilon_{ps} = \epsilon_{pe} + (P_e / A_c E_c)[1 + (e^2 / r^2)] + \epsilon_{pnet} \leq 0.035$$

คำนวณหน่วยแรงของลวดอัดแรงและวัสดุ CFRP

หน่วยแรงของลวดอัดแรง

$$f_{ps} = \left\{ \begin{array}{ll} 2,018.60 & \text{N/mm}^2 \\ 1,648.73 & \text{N/mm}^2 \end{array} \right\}$$

สำหรับ

$$f_{ps} = 196,500\epsilon_{ps} \text{ สำหรับ } \epsilon_{ps} \leq 0.0086$$

ลวดอัดแรง

$$f_{ps} = 1,720 - [0.276 / (\epsilon_{ps} - 0.0064)]$$

ค่า f_{ps} ที่ใช้ =

$$1,648.73 \text{ N/mm}^2$$

เกรด 250

$$\text{สำหรับ } \epsilon_{ps} > 0.0076$$

หน่วยแรงของวัสดุ CFRP

$$f_{fe} = 1,278.93$$

$$\text{N/mm}^2$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

คำนวณผลรวมแรงภายในและตรวจสอบแรงสมดุลของหน้าตัด

อัตราส่วนของความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัด

$$\beta_1 = 0.724$$

$$\beta_1 = (4\varepsilon_c' - \varepsilon_c) / (6\varepsilon_c' - 2\varepsilon_c)$$

$$\alpha_1 = 0.788$$

$$\alpha_1 = (3\varepsilon_c' \varepsilon_c - \varepsilon_c^2) / 3\beta_1 \varepsilon_c'$$

ระยะจากขอบหน้าตัดโครงสร้าง คสล ถึงแกนสะเทิน

$$c = 123.27 \text{ mm}$$

$$c = (A_p f_{ps} + A_f f_{fc}) / (\alpha_1 f_c' \beta_1 b)$$

หากค่า C ที่สมมติมีค่าไม่เท่ากับค่า C ที่ได้จากการคำนวณ ต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก
ปรับค่า C ที่สมมติให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดโครงสร้าง คสล ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด คสล

$$M_{np} = 622.58 \text{ KN-m}$$

$$M_{ns} = A_p f_{ps} [d_p - (\beta_1 c / 2)]$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด ที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุ CFRP

$$M_{nf} = 273.02 \text{ KN-m}$$

$$M_{nf} = A_f f_{fc} [d_f - (\beta_1 c / 2)]$$

ตัวคูณลดกำลังของโครงสร้างต้านทานโมเมนต์ดัด

$$\phi = 0.90$$

ตัวคูณลดกำลังของระบบการเสริมกำลังด้วย FRP

$$\Psi_f = 0.85$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 769.18 \text{ KN-m}$$

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + \Psi_f M_{nf})$$

$$\phi M_n \text{ with CFRP} = 769.18 > 603.70$$

$$\phi M_n > M_u \text{ ---> OK}$$



ก่อนทำการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP จะต้องเตรียมผิวคอนกรีตให้มีความเรียบ เพื่อให้ผิวคอนกรีตและ CFRP มีประสิทธิภาพสำหรับแรงยึดเหนี่ยว ขั้นตอนการเตรียมผิวคอนกรีต ก่อนทำการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP มีดังนี้

1. การขัดผิว สำหรับตำแหน่งที่จะทำการเสริมกำลังมีสภาพผิวคอนกรีตที่ขรุขระจะต้องทำการขัดด้วยอุปกรณ์สำหรับขัด เช่น เครื่องขัดแบบจานหมุน ทำการขัดตลอดแนวที่จะทำการติดตั้ง CFRP รวมไปถึงรอยเปื้อนต่างๆที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลัง CFRP ตัวอย่างการขัดผิวคอนกรีตแสดงดังภาพผนวกที่ ฅ1



ภาพผนวกที่ ฅ1 การขัดคอนกรีตโดยการใช้เครื่องขัดแบบจานหมุน

2. การอุดรอยร้าว ต้องทำการอุดรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวคอนกรีตที่มีรอยร้าวขนาดกว้างมากกว่า 0.25 มิลลิเมตร ด้วยการอัดฉีดอีพอกซีเรซินทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนการติดตั้งระบบ CFRP หากว่าตำแหน่งที่ฉีดด้วยอีพอกซีเรซินมีคราบทำให้ผิวที่จะติดตั้ง CFRP มีความขรุขระก็จะต้องทำการขัดผิวให้เรียบ การอุดรอยร้าวด้วยอีพอกซีเรซินนี้มีประโยชน์อีกประการคือ ป้องกันไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในระบบ CFRP อีกด้วย

3. การรองพื้นและการฉาบ ก่อนการติดตั้งระบบ CFRP จะต้องมีวัสดุรองพื้น (Primer) บางๆประมาณ 1 ถึง 2 ชั้น บนผิวคอนกรีต การรองพื้นอาจใช้แปรงหรือลูกกลิ้งที่สะอาดทาบนผิวด้านนอกสุดของคอนกรีต เพื่อให้ผิวภายนอกของคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น และหากว่าจะต้องมี

วัสดุฉาบ (Putty) ฉาบปิดบางๆ เพื่อให้ผิวของคอนกรีตมีความเรียบก่อนการติดตั้งระบบ CFRP
ตัวอย่างแสดงดังภาพผนวกที่ น2 จะต้องทำการฉาบภายในช่วง 7 วันหลังจากทำการรองพื้น



ภาพผนวกที่ น2 การฉาบ (Putty) ปิดผิวคอนกรีตที่มีรูขนาดเล็ก

4. การเตรียมอุปกรณ์และตำแหน่งติดตั้ง CFRP จะต้องทำการเตรียมปริมาณ CFRP ที่
จะต้องนำไปติดตั้ง แสดงดังภาพผนวกที่ น3 โดยตัดขนาดแผ่น CFRP ให้ได้ขนาดความกว้างและ
ความยาวตามที่ได้ออกแบบไว้ ควรจะนำ CFRP ไปเพื่อสำหรับกรณีที่มีความผิดพลาดในขณะติดตั้ง
เพื่อไม่ต้องเสียเวลา และทำเครื่องหมายหรือทำการตีแนวบนผิวคอนกรีตก่อนที่จะติดตั้ง CFRP เพื่อ
ความถูกต้องและแม่นยำขณะติดตั้ง แสดงดังภาพผนวกที่ น4



ภาพผนวกที่ น3 การเตรียมปริมาณ CFRP ที่จะนำไปติดตั้ง

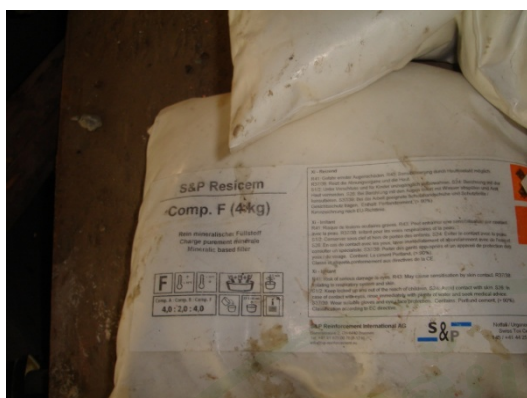


ภาพผนวกที่ ๔ การกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้ง CFRP

5. การผสมวัสดุยึดประสาน (เรซิน) จะต้องผสมส่วนประกอบต่างและระยะเวลาในการผสมให้ได้ตามสัดส่วนที่ผู้ผลิตระบุมา ผสมให้เข้ากันจนกระทั่งมีสีและความเข้มข้นทั่วถึงกัน ตัวอย่างของส่วนผสมและเรซินที่ผสมเสร็จแล้วแสดงดังภาพผนวกที่ ๕ และ ๖ ตามลำดับ โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมส่วนผสมให้เข้ากันอาจใช้เครื่องกวนไฟฟ้าเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน ตัวอย่างการกวนส่วนผสมเรซินด้วยเครื่องกวนไฟฟ้าแสดงดังภาพผนวกที่ ๗ สำหรับการผสมเรซินจะต้องผสมในปริมาณที่เพียงพอกับระยะเวลาการทำงานเนื่องจากเรซินที่ผสมจะมีระยะเวลาการแห้งตัวที่เร็ว ห้ามนำเรซินที่ผสมมีอายุที่เกินช่วงเวลาตามที่ผู้ผลิตกำหนดมาใช้งาน ต่อเนื่องจากจะมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของ CFRP กับคอนกรีต และมีผลต่อคุณภาพของเรซินที่จะไปเคลือบเส้นใย CFRP ได้ไม่ทั่วถึง



ภาพผนวกที่ ๕ ตัวอย่างของส่วนผสมเรซิน



ภาพผนวกที่ ๖ ตัวอย่างเรซินที่ผสมเสร็จแล้ว



ภาพผนวกที่ ๗ การผสมเรซินด้วยเครื่องกวนไฟฟ้า

6. การติดตั้ง CFRP จะต้องตรวจสอบความชื้นทุกครั้งก่อนทำการติดตั้ง เนื่องจากความชื้นเป็นอุปสรรคต่อการยึดเกาะของวัสดุรองพื้นและเรซิน ดังนั้นจะต้องทำการวัดความชื้นที่ผิวของคอนกรีตด้วยเครื่องวัดความชื้น (Moisture Meter) แสดงดังภาพผนวกที่ ๘ โดยที่ค่าความชื้นที่เกิดขึ้นบนผิวคอนกรีตจะต้องไม่เกินร้อยละ 4 หรือตามข้อกำหนดของผู้ผลิต หากว่าช่วงเวลาที่จำเป็นต้องทำการติดตั้ง CFRP เกิดมีฝนตก หรือมีความชื้นในอากาศมากเกินไปเกินข้อกำหนดจะต้องเลื่อนการติดตั้ง CFRP ออกไป



ภาพผนวกที่ ๘ การวัดความชื้นที่ผิวคอนกรีตก่อนการติดตั้ง CFRP ด้วยเครื่อง Moisture Meter

การทาสีประสาน (เรซิน) บริเวณที่จะติดตั้ง CFRP ให้สม่ำเสมอและให้ทั่วถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทาเรซินควรจะเป็นลูกกลิ้งทาสีเพื่อความสะดวกและความคล่องตัวในการทำงาน การติดตั้งแผ่น CFRP จะต้องทาเรซินนำไปก่อน แสดงดังภาพผนวกที่ ๘ แล้วจึงติดแผ่น CFRP ที่เตรียมเอาไว้โดยการติดจะต้องติดให้ตรงแนวที่กำหนด แสดงดังภาพผนวกที่ ๙ ทิศทางของเส้นใยจะต้องเป็นแนวตรงเปียงเบนไม่เกิน 5 องศา เนื่องจากประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย CFRP ชนิดเส้นใยทิศทางเดียวจะขึ้นอยู่กับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยและความตรงของเส้นใย



ภาพผนวกที่ ๙ การลงเรซินนำก่อนการติด CFRP



ภาพผนวกที่ ๑๑๐ การติดตั้ง CFRP ตามแนวยาวใต้โครงสร้างพื้นสะพาน

ขณะที่ติดตั้ง CFRP จะต้องทำการรีดด้วยลูกกลิ้งตามหลังเพื่อไล่ฟองอากาศที่เกิดขึ้น เพื่อให้แผ่น CFRP ยึดติดกับผิวคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ แสดงดังภาพผนวกที่ ๑๑๑ การรีดลูกกลิ้งตามหลังให้รีดไล่ฟองอากาศในทิศทางตามขนานของเส้นใยห้ามรีดตามทิศตั้งฉากกับเส้นใยโดยเด็ดขาดเนื่องจากจะทำให้เส้นใยหักหรือเสียแนวได้ หลังจากนั้นให้ทาเรซินตามมาอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้แน่ใจว่าเส้นใยมีความชุ่มจากรเรซินอย่างทั่วถึง



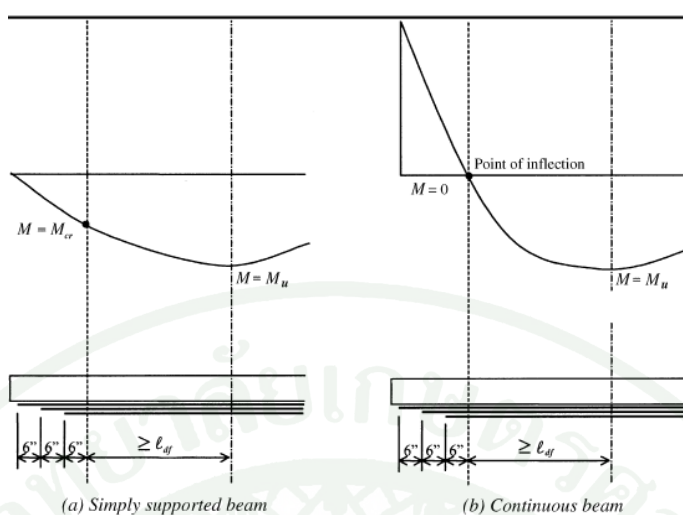
ภาพผนวกที่ ๑๑๑ การรีดแผ่น CFRP เพื่อไล่ฟองอากาศ

กรณีที่มีการออกแบบให้ติดตั้งการเสริมกำลังระบบ CFRP ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ชั้น เนื่องจากการเสริมกำลังด้วย CFRP เพียง 1 ชั้น ไม่พอเพียงกับกำลังที่ต้องการ การติดตั้ง CFRP ในชั้นต่อไปสามารถทำได้ทันทีหลังจากติดตั้ง CFRP ชั้นแรกสมบูรณ์ โดยทาเรซินที่ผิวของ CFRP ชั้นแรกซึ่งจะต้องทาเรซินที่มีปริมาณมากกว่าเดิมประมาณร้อยละ 20 เนื่องจากเรซินจะต้องทับหน้าของชั้นก่อน และเป็นรองพื้นของชั้นถัดไปด้วย ขั้นตอนการติดตั้งในชั้นต่อไปให้ทำตามวิธีการก่อนหน้า ตัวอย่างการติดตั้ง CFRP ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ชั้นแสดงดังภาพผนวกที่ ๑๒



ภาพผนวกที่ ๑๒ การติดตั้ง CFRP ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ชั้น

การติดตั้ง CFRP สำหรับชั้นถัดไปสามารถติดตั้งให้มีระยะเชิงออกไปจากแนวเดิมของแผ่นแรกได้เพื่อความประหยัดในส่วนวัสดุ สำหรับระยะที่สามารถให้เหลื่อมได้นั้นต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของผู้ผลิต อย่างไรก็ตาม ACI ได้แนะนำระยะที่สามารถติดแผ่น CFRP ให้เหลื่อมกันได้สำหรับโครงสร้างแบบช่วงเดียว (Simple Span) ระยะระหว่างโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} (Cracking Moment) ที่บริเวณช่วงปลายจนถึง M_u (Ultimate Moment) ต้องมีช่วงความยาวมากกว่าความยาวประสิทธิภาพของการติดตั้งด้วยระบบ FRP (Development Length, l_{df}) สำหรับโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องกัน (Continuous Span) ระยะระหว่างช่วงที่เกิดโมเมนต์คดกลับ (Point of Inflection) ระหว่างโมเมนต์บวก (Positive Moment) และโมเมนต์ลบ (Negative Moment) ที่บริเวณช่วงปลายโครงสร้างจนถึงตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ประลัยสูงสุด M_u (Ultimate Moment) ต้องมีช่วงความยาวมากกว่า l_{df} แสดงดังภาพผนวกที่ ๑๓



ภาพผนวกที่ 13 ระยะเหลื่อมของการติดตั้ง FRP ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ชั้น

ที่มา: ACI 440.2R-08 (2008)

การคำนวณหาความยาวประสิทธิภาพของการติดตั้งด้วยระบบ FRP (Development Length, l_{df}) แสดงดังสมการที่ 41 และ 42

สำหรับหน่วย นิ้ว-ปอนด์

$$l_{df} = 0.057 \sqrt{\frac{nE_f t_f}{f'_c}} \quad (41)$$

สำหรับหน่วย SI

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{f'_c}} \quad (42)$$

เมื่อ l_{df} คือ ความยาวประสิทธิภาพของการติดตั้งระบบ FRP

n คือ จำนวนแผ่นของ FRP ที่ติดตั้ง

E_f คือ โมดูลัสแรงดึงยืดหยุ่นของ FRP

t_f คือ ความหนาของแผ่น FRP ต่อหนึ่งแผ่น

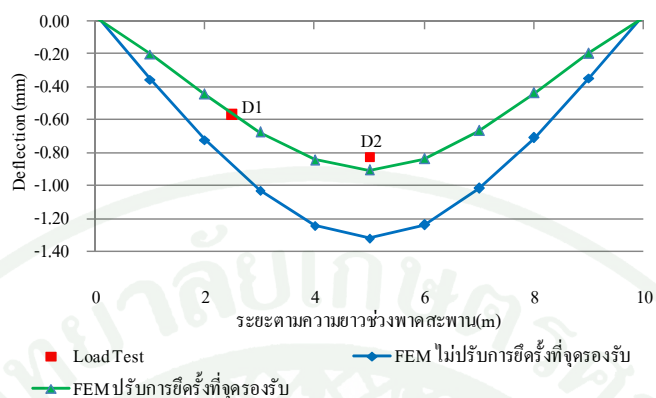
f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน



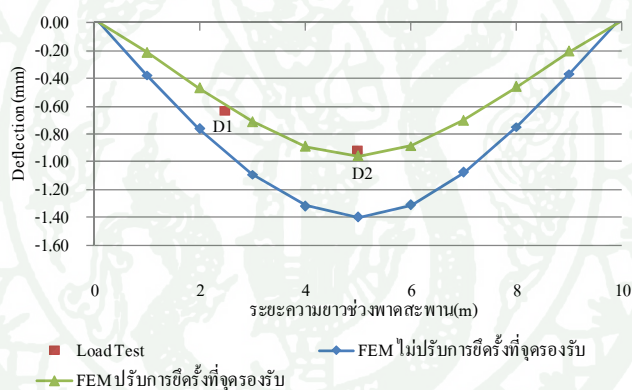
ภาคผนวก ข

ภาพเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลตอบสนองจากการทดสอบ
น้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน

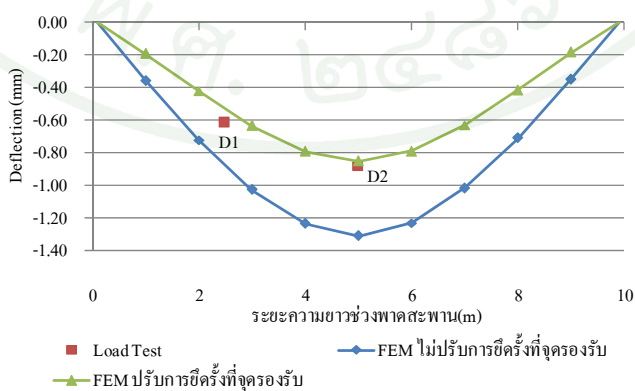
สะพานข้ามคลองเตย ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข1 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า

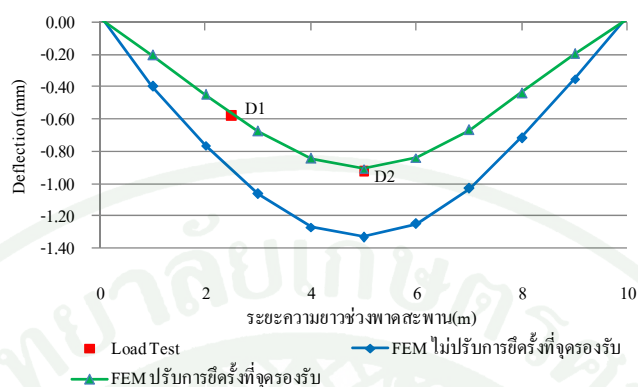


ภาพผนวกที่ ข2 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

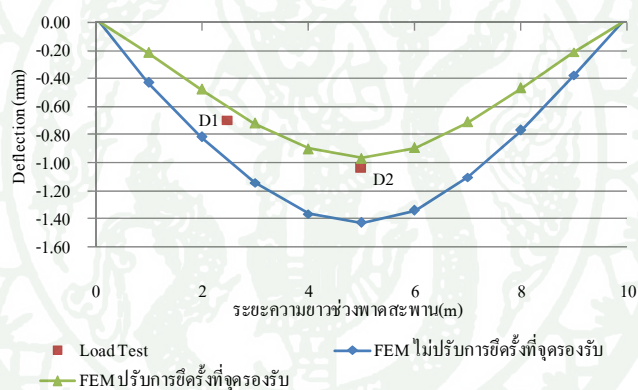


ภาพผนวกที่ ข3 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกชนิดขอบกันตก

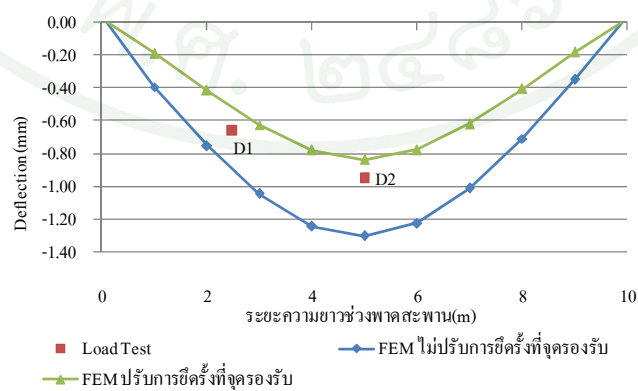
สะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข4 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า

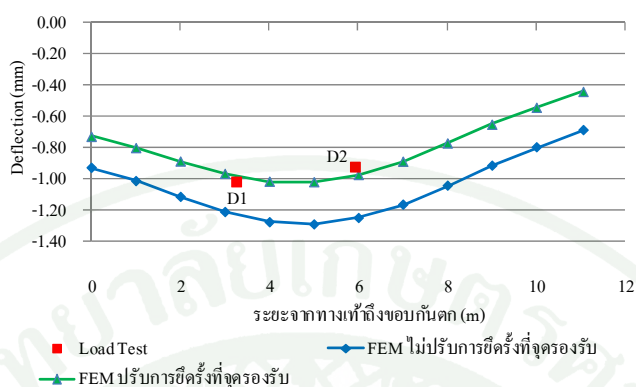


ภาพผนวกที่ ข5 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

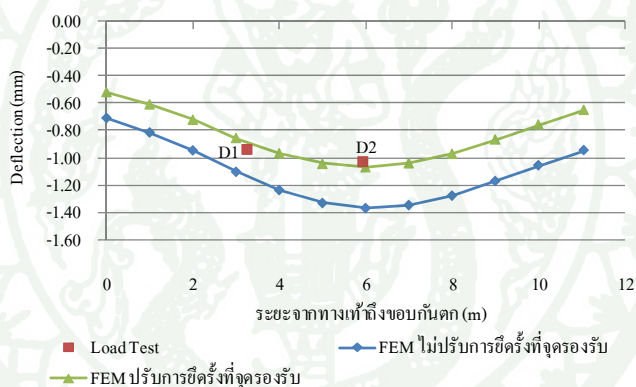


ภาพผนวกที่ ข6 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชนิดขอบกันตก

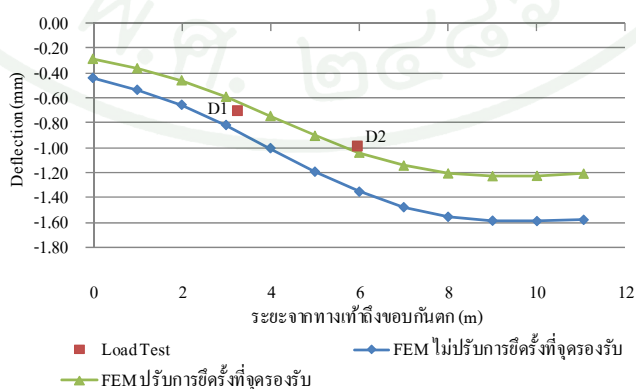
สะพานข้ามคลองบางอ้อ ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข7 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า

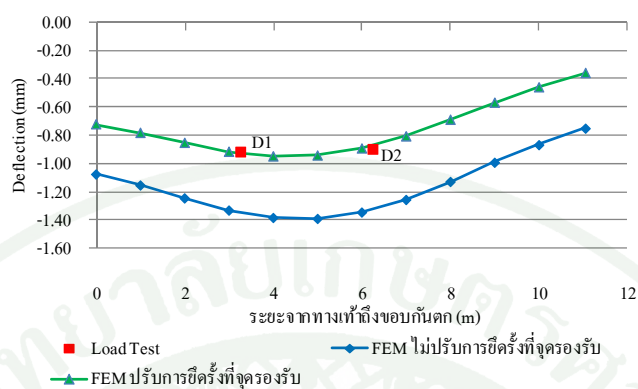


ภาพผนวกที่ ข8 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน

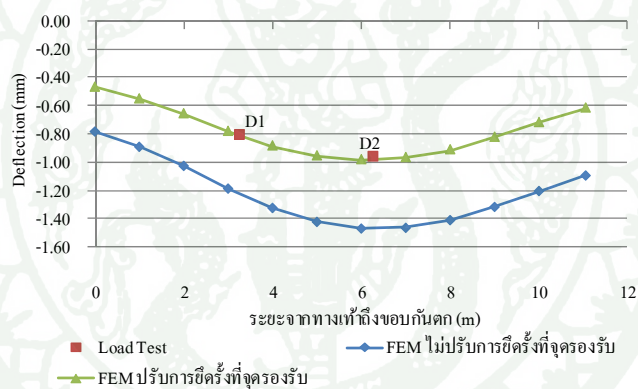


ภาพผนวกที่ ข9 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกันคก

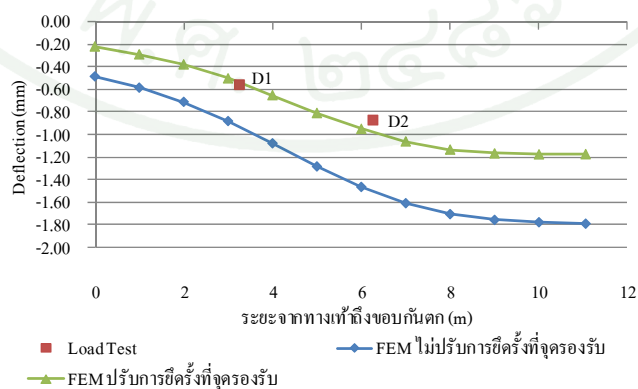
สะพานข้ามคลองบางอ้อ ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข10 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

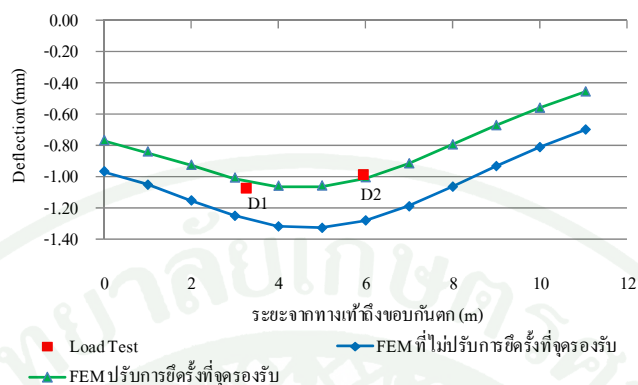


ภาพผนวกที่ ข11 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

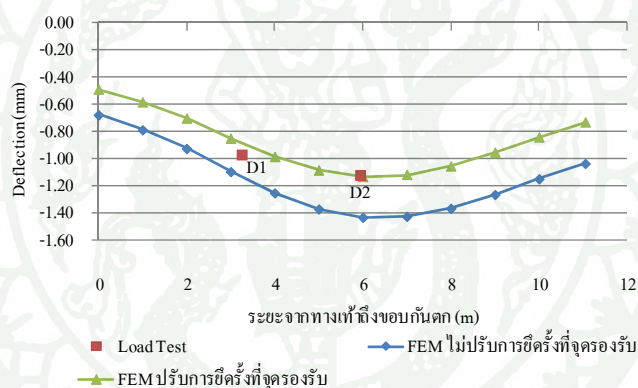


ภาพผนวกที่ ข12 เปรียบเทียบค่าโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก

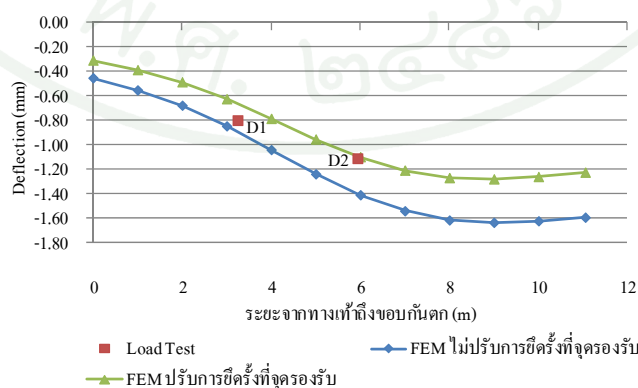
สะพานข้ามคลองสะพานยาว ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข13 เปรียบเทียบค่าโก่งตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

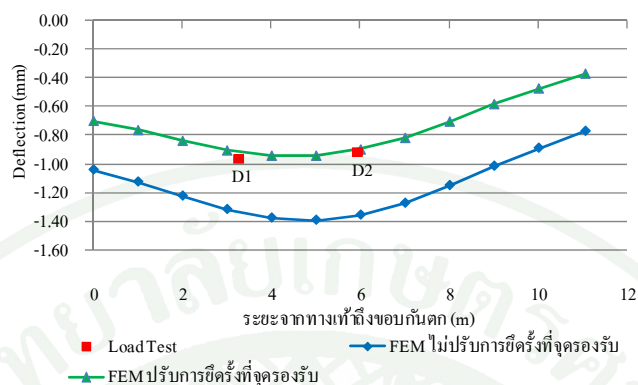


ภาพผนวกที่ ข14 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

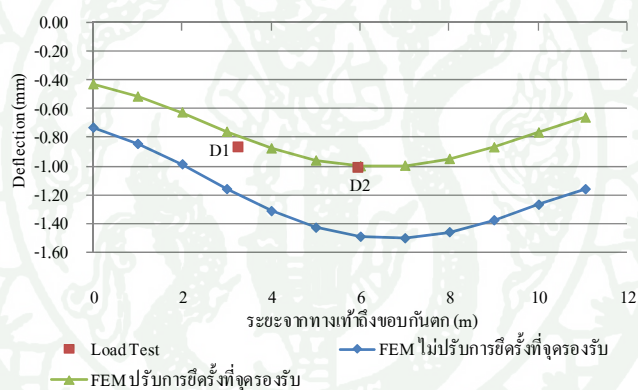


ภาพผนวกที่ ข15 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก

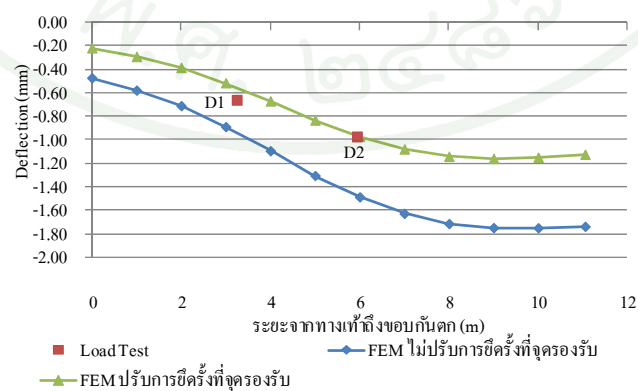
สะพานข้ามคลองสะพานยาว ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข16 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า

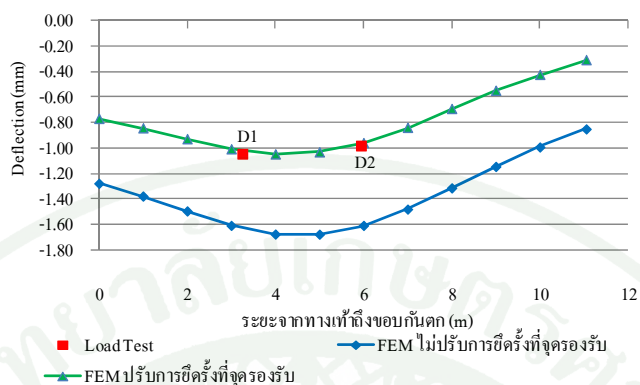


ภาพผนวกที่ ข17 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

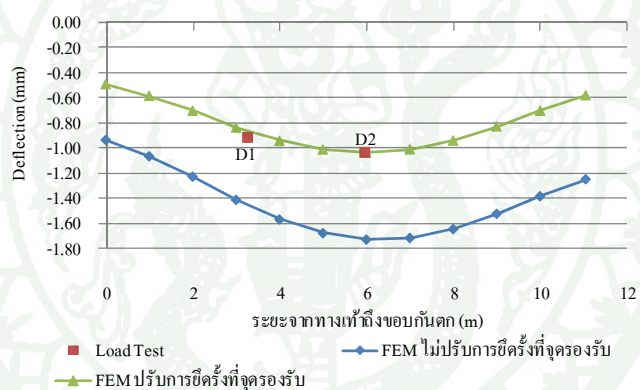


ภาพผนวกที่ ข18 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

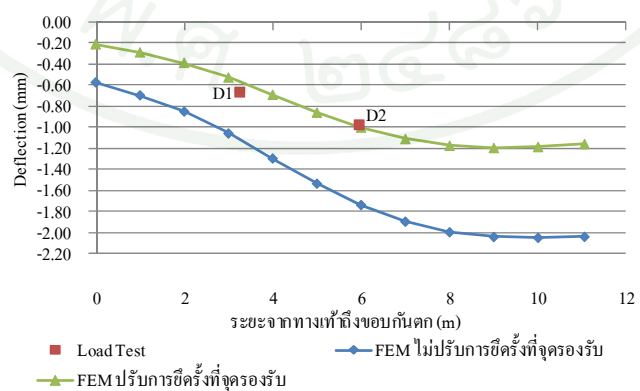
สะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้าย



ภาพผนวกที่ ข19 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้าย น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

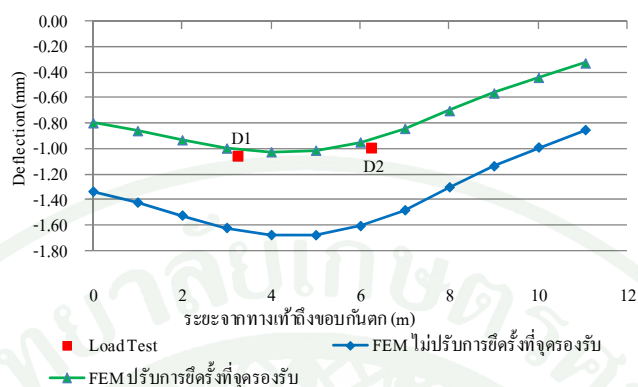


ภาพผนวกที่ ข20 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้าย น้ำหนักกลางสะพาน

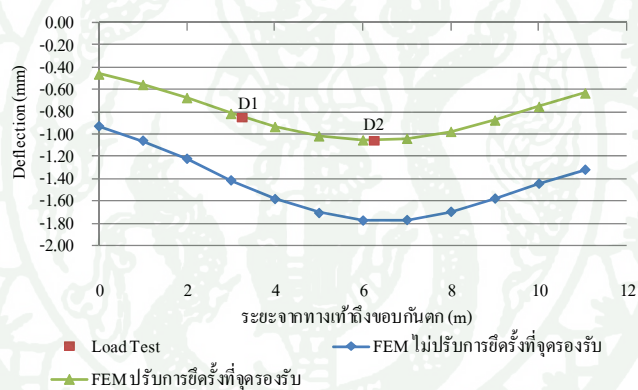


ภาพผนวกที่ ข21 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้าย น้ำหนักชิดขอบกันตก

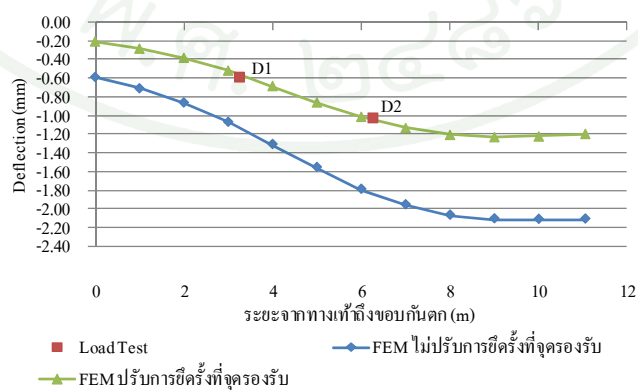
สะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวา



ภาพผนวกที่ ข22 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวาน้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า

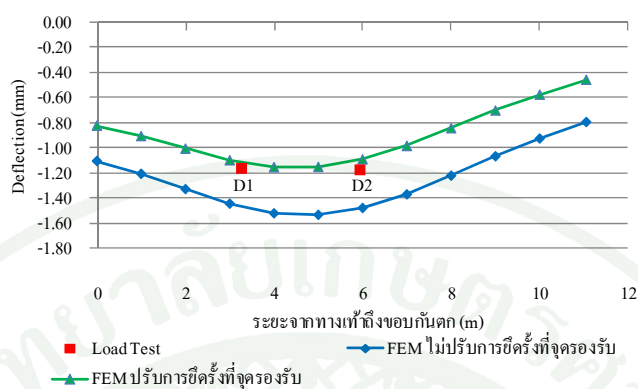


ภาพผนวกที่ ข23 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวาน้ำหนักกลางสะพาน

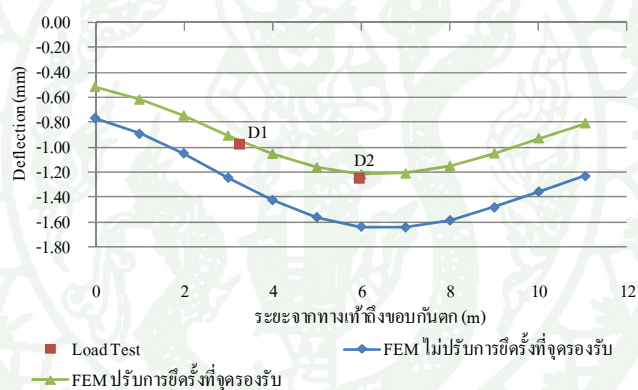


ภาพผนวกที่ ข24 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

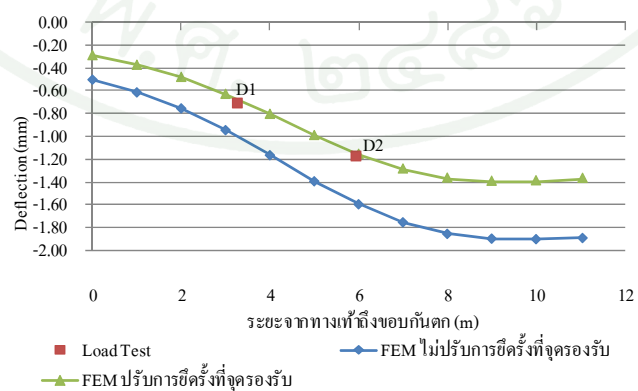
สะพานข้ามคลองเตาอิฐ ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข25 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

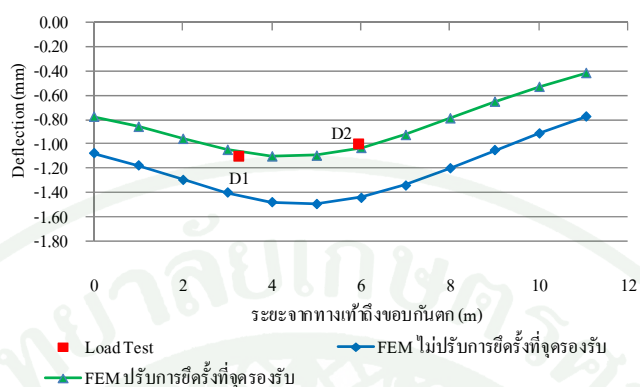


ภาพผนวกที่ ข26 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

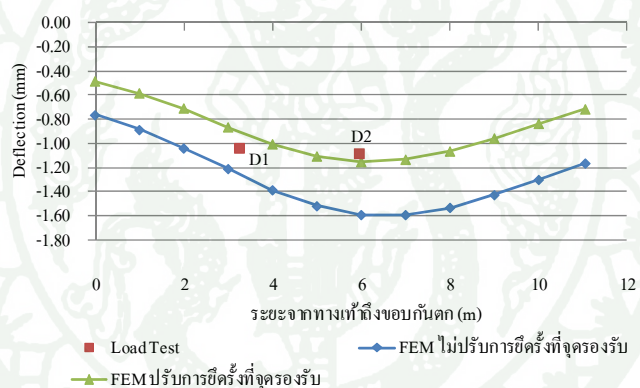


ภาพผนวกที่ ข27 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้าย น้ำหนักชิดขอบกันตก

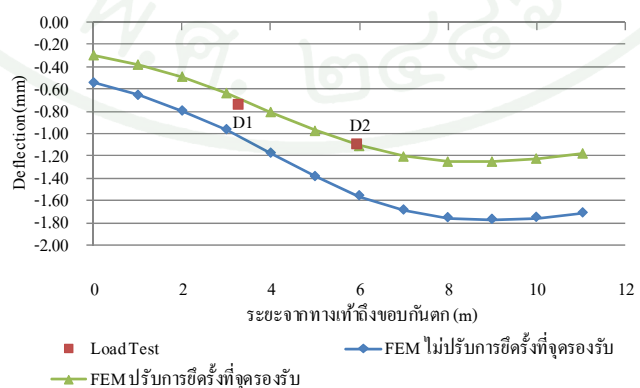
สะพานข้ามคลองเตาอิฐ ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข28 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า

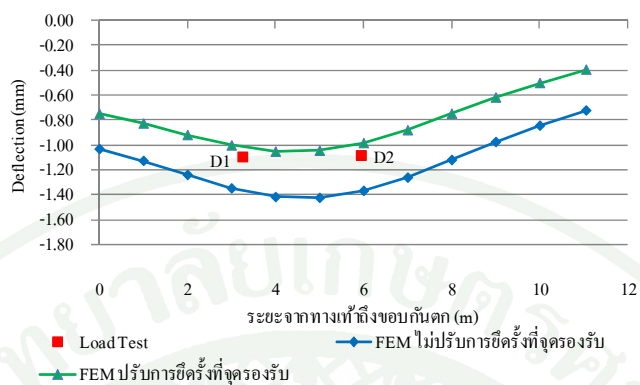


ภาพผนวกที่ ข29 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

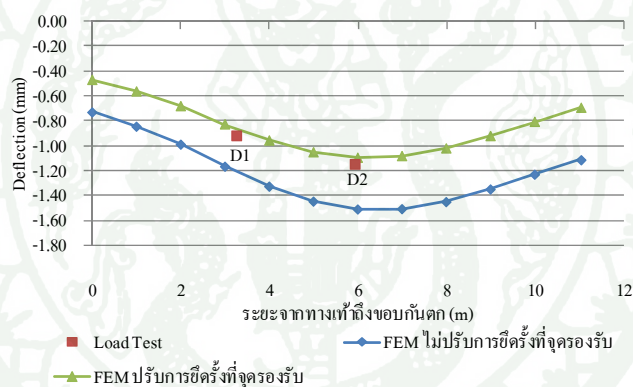


ภาพผนวกที่ ข30 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

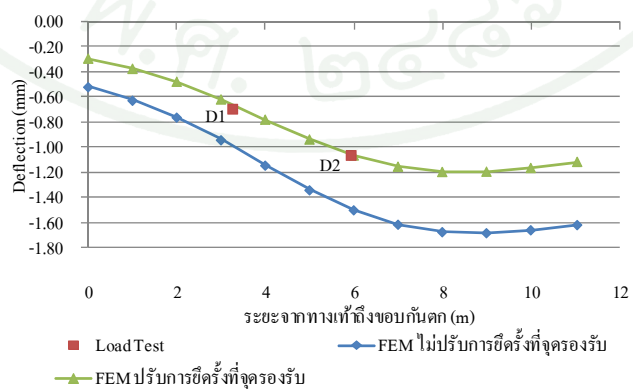
สะพานข้ามคลองบางรัก ผังซ้าย



ภาพผนวกที่ ข31 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทิศทางเท้า

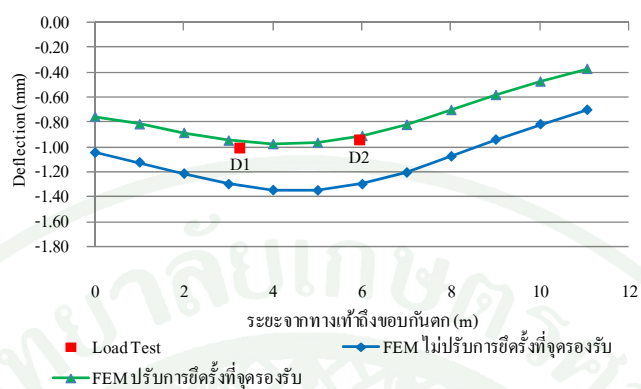


ภาพผนวกที่ ข32 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

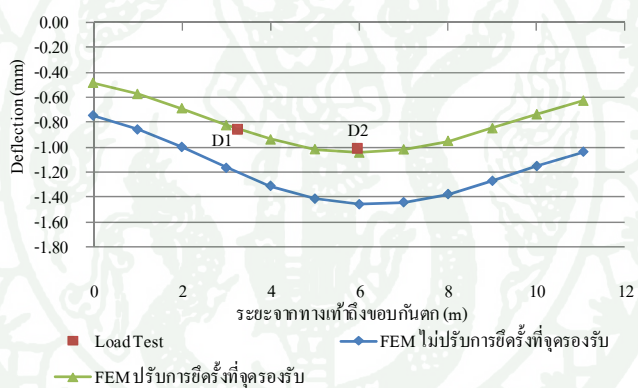


ภาพผนวกที่ ข33 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งซ้าย น้ำหนักชิดขอบกันตก

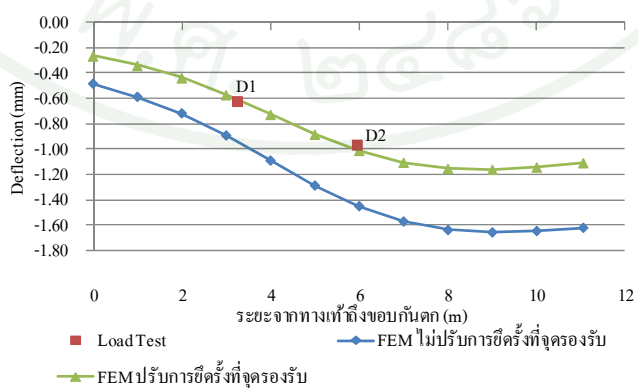
สะพานข้ามคลองบางรัก ผังขวา



ภาพผนวกที่ ข34 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

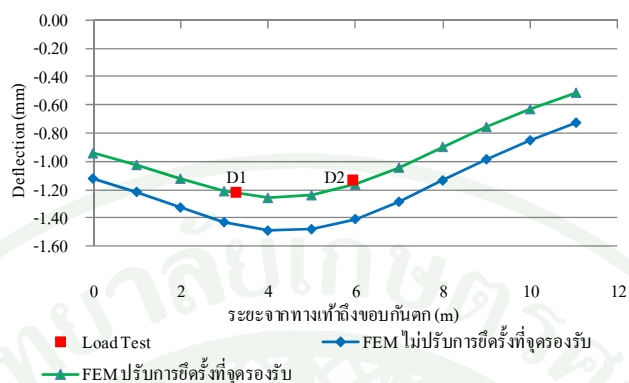


ภาพผนวกที่ ข35 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

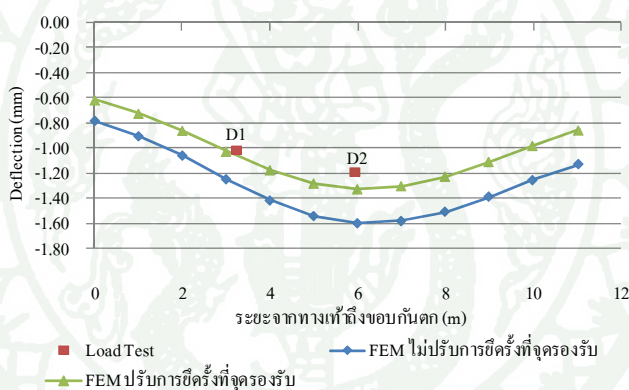


ภาพผนวกที่ ข36 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางรักฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

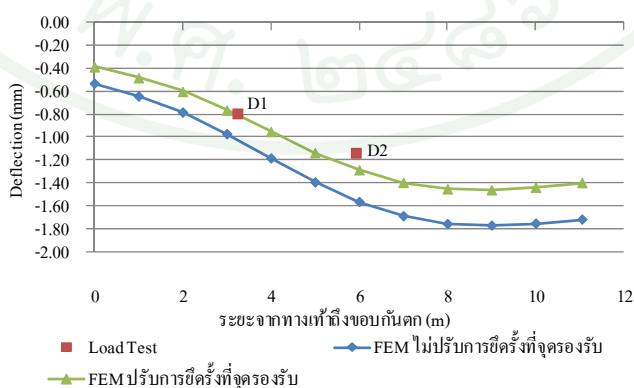
สะพานข้ามคลองบางพระครู ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข37 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

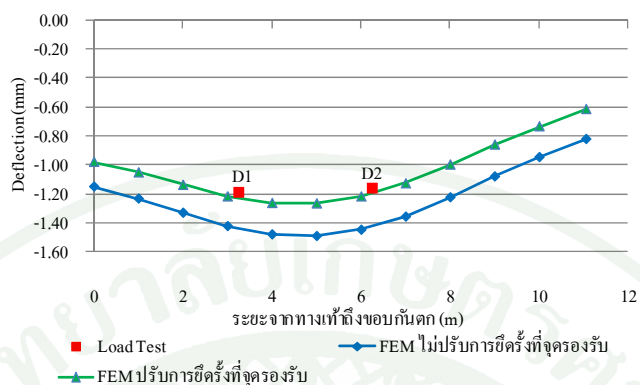


ภาพผนวกที่ ข38 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

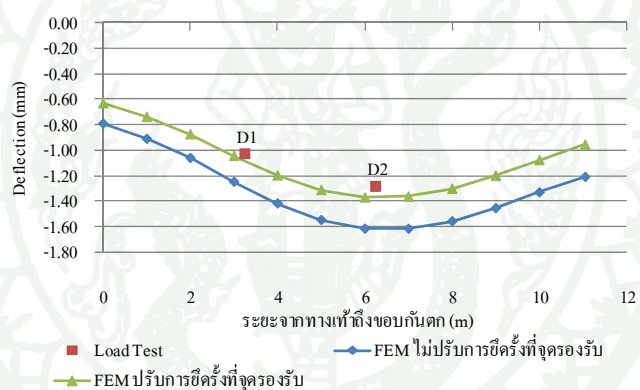


ภาพผนวกที่ ข39 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก

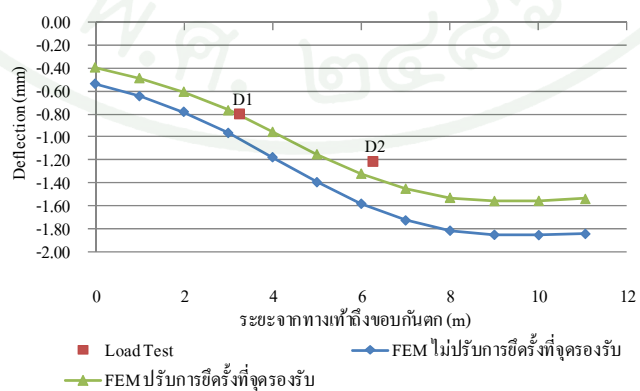
สะพานข้ามคลองบางพระครู ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข40 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า

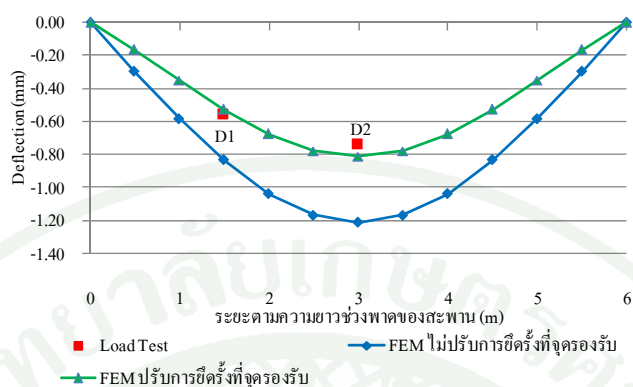


ภาพผนวกที่ ข41 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

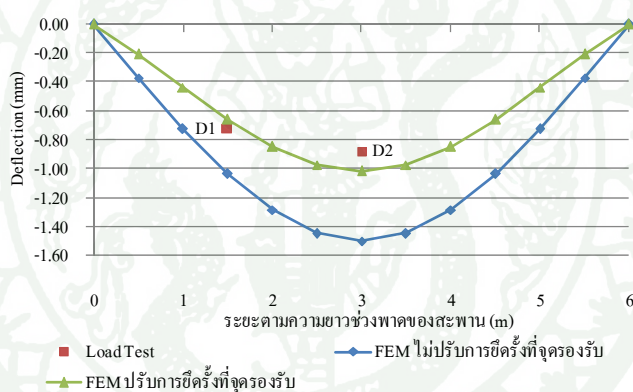


ภาพผนวกที่ ข42 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

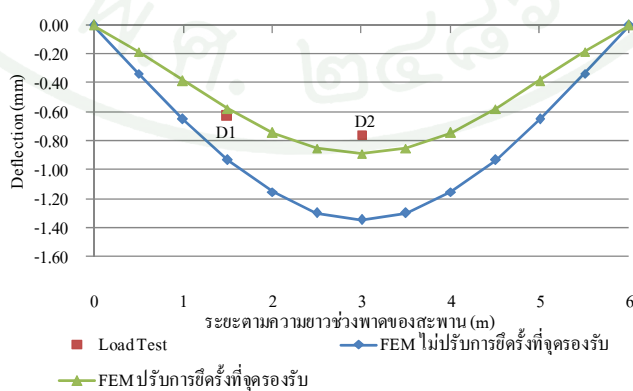
สะพานข้ามคลองบางพลัด ฟุ้งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข43 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งซ้ายน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า

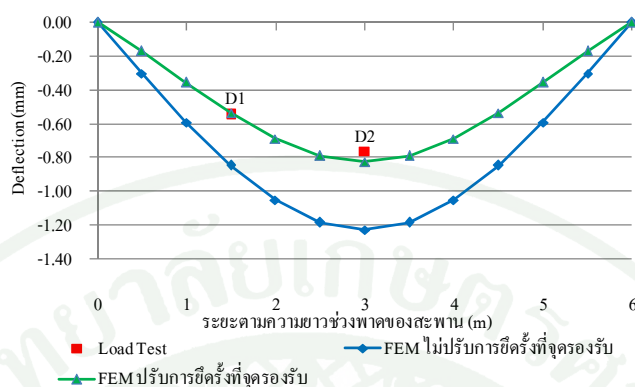


ภาพผนวกที่ ข44 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งซ้ายน้ำหนักรถบรรทุก

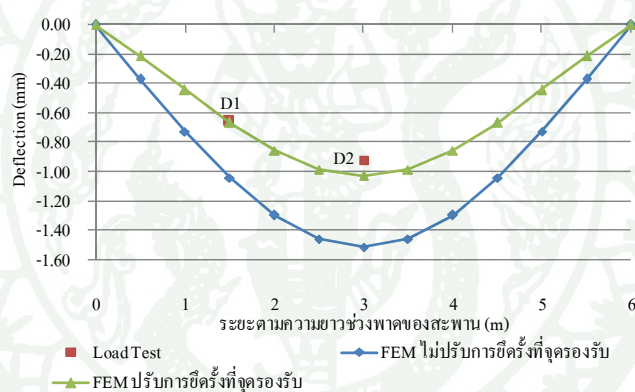


ภาพผนวกที่ ข45 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งซ้ายน้ำหนักรถบรรทุก

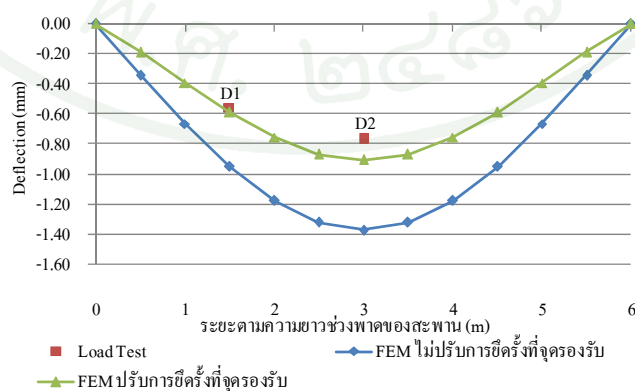
สะพานข้ามคลองบางพลัด ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข46 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกทิศทางเท้า

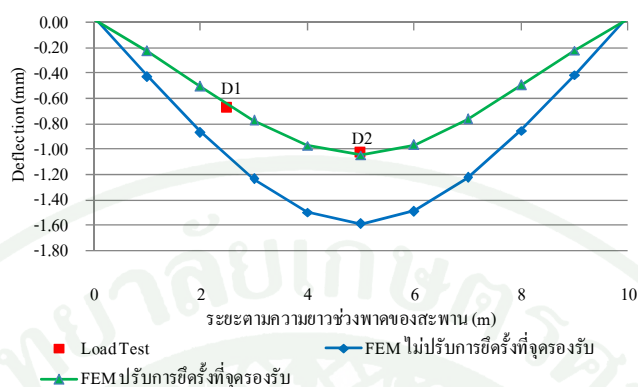


ภาพผนวกที่ ข47 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

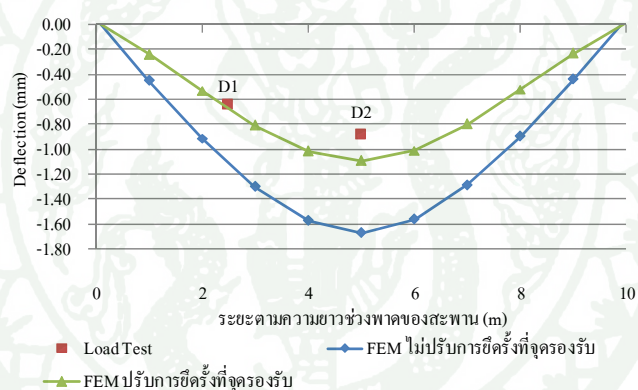


ภาพผนวกที่ ข48 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลัดฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันคก

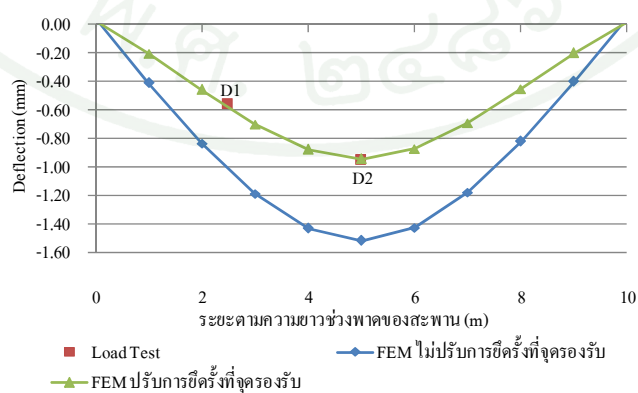
สะพานข้ามคลองบางพลู ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข49 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้าย น้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า

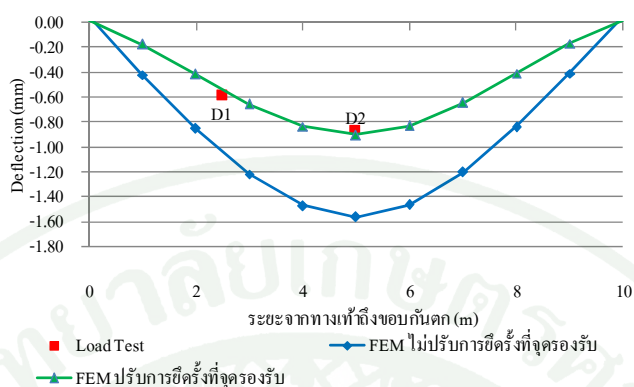


ภาพผนวกที่ ข50 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้าย น้ำหนักกลางสะพาน

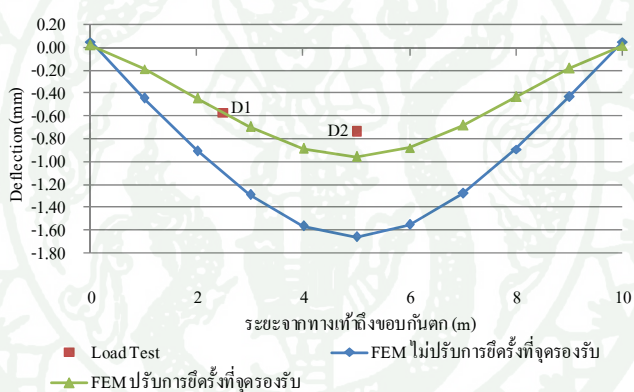


ภาพผนวกที่ ข51 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้าย น้ำหนักชิดขอบกันคค

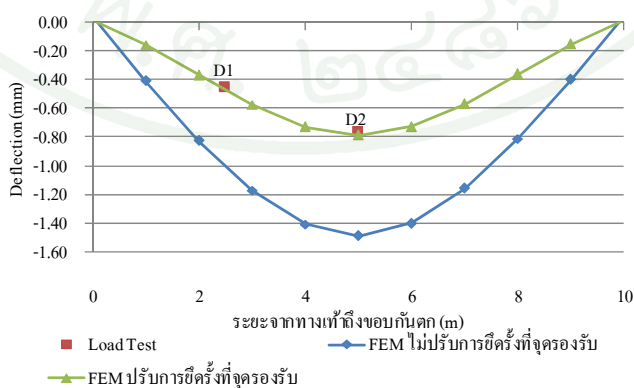
สะพานข้ามคลองบางพลู ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข52 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวา น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

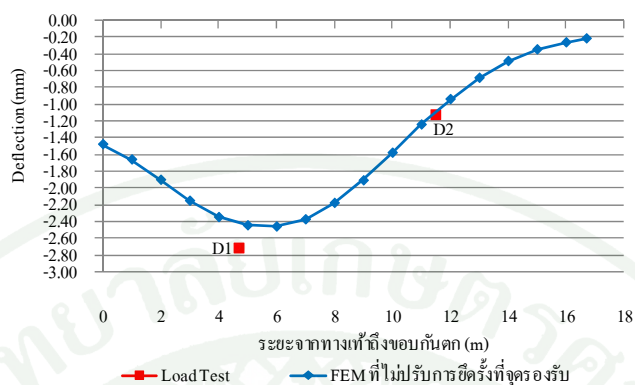


ภาพผนวกที่ ข53 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

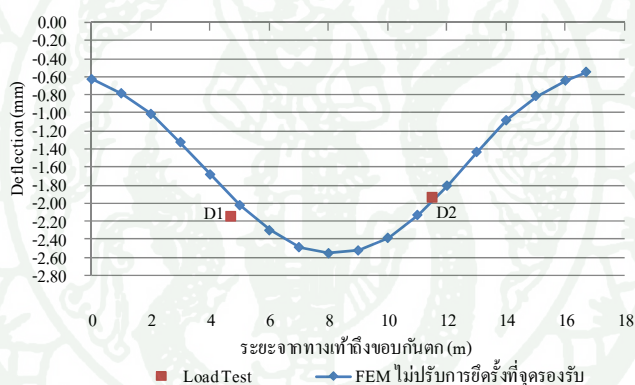


ภาพผนวกที่ ข54 เปรียบเทียบการโก่งตัวสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันดก

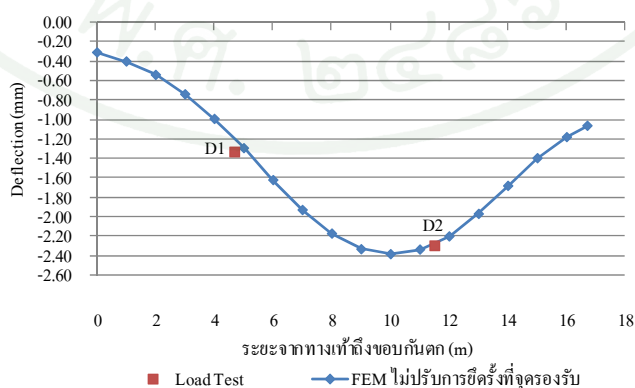
สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์



ภาพผนวกที่ ข55 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์ น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า 1

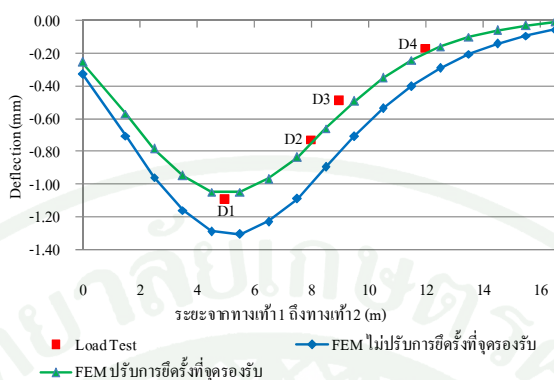


ภาพผนวกที่ ข56 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์ น้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน

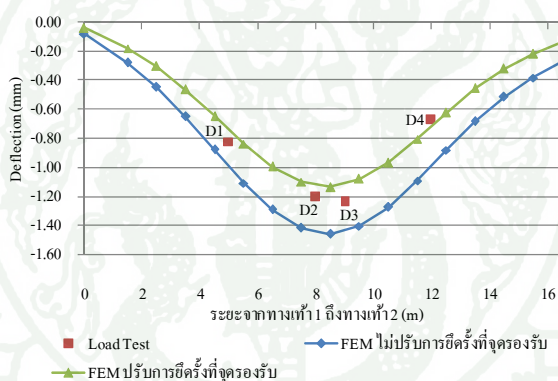


ภาพผนวกที่ ข57 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์ น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า 2

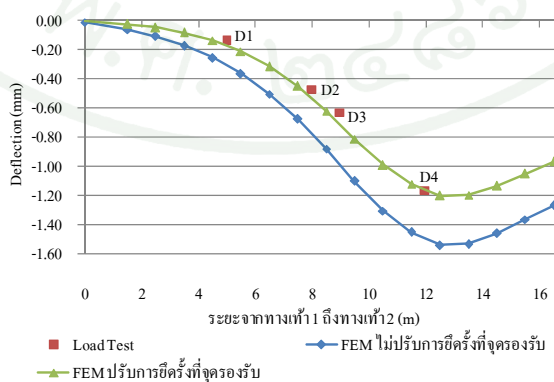
สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม



ภาพผนวกที่ ข58 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า 1

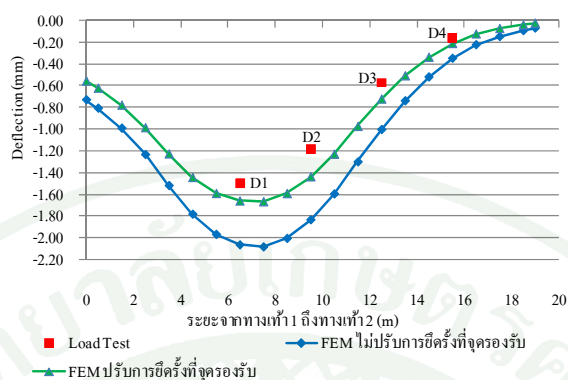


ภาพผนวกที่ ข59 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม น้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

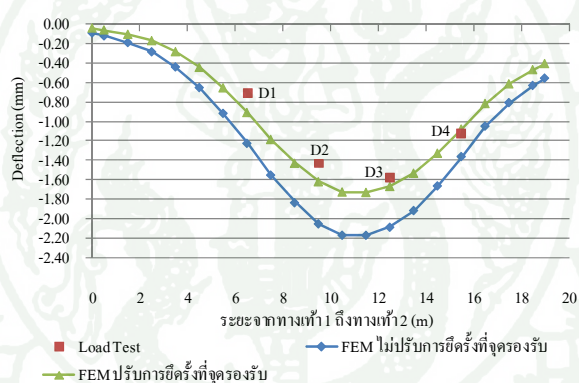


ภาพผนวกที่ ข60 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า 2

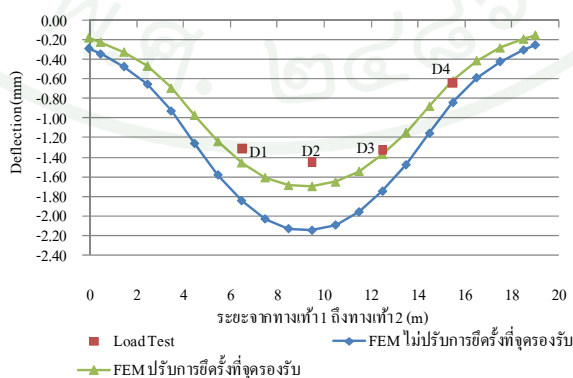
สะพานข้ามคลองมอญ 3



ภาพผนวกที่ ข61 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า 1



ภาพผนวกที่ ข62 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกกลางสะพาน



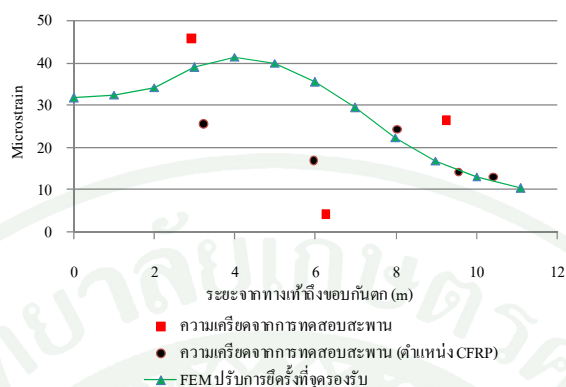
ภาพผนวกที่ ข63 เปรียบเทียบการโก่งตัวของสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกชนิดทางเท้า 2



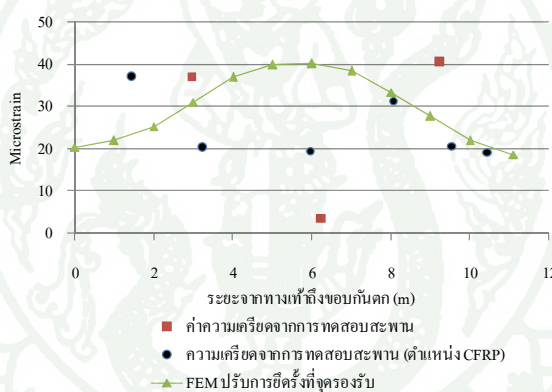
ภาคผนวก ข

ภาพเปรียบเทียบความเครียดทิศทางขวางการจราจรจากผลการวิเคราะห์สะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลตอบสนองจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสะพาน

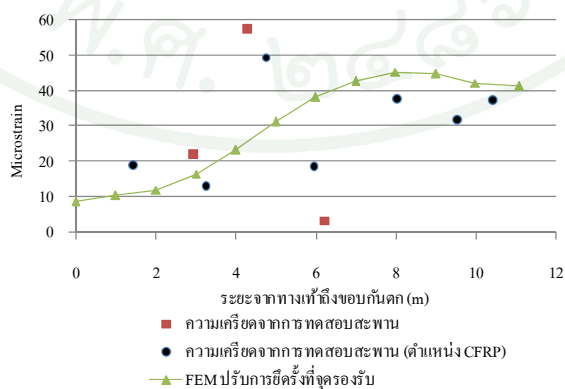
สะพานข้ามคลองเตย ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข1 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้ายน้ำหนักรรทุกชนิดทางเท้า

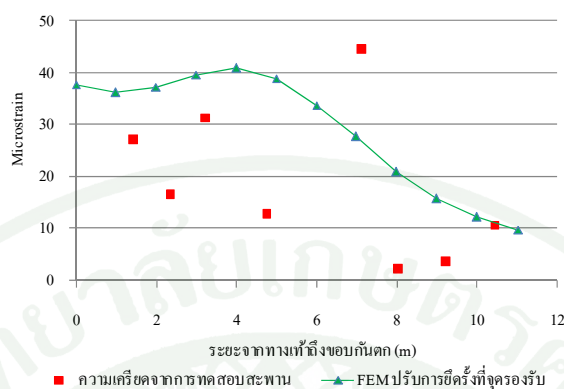


ภาพผนวกที่ ข2 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้ายน้ำหนักรรทุกกลางสะพาน

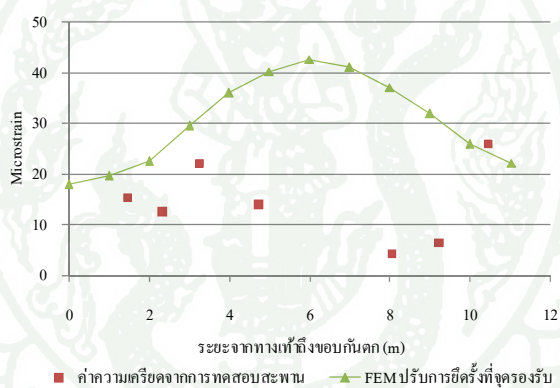


ภาพผนวกที่ ข3 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งซ้ายน้ำหนักรรทุกชิดขอบกันตก

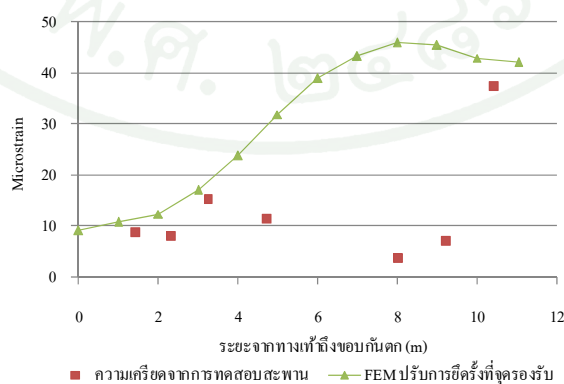
สะพานข้ามคลองเตย ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข4 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

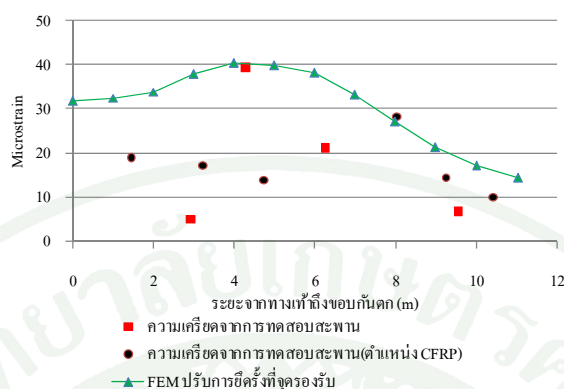


ภาพผนวกที่ ข5 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

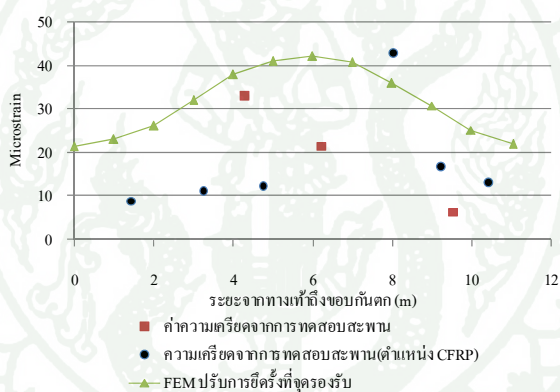


ภาพผนวกที่ ข6 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตยฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันดก

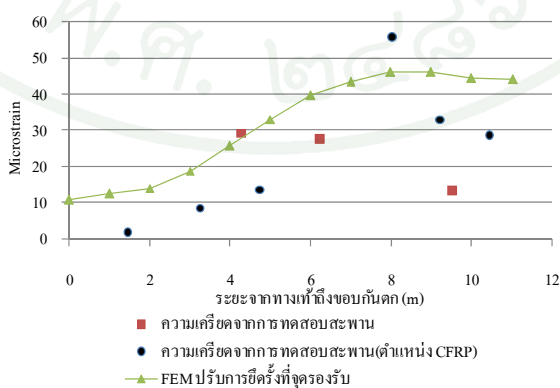
สะพานข้ามคลองบางอ้อ ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ๓๗ เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักรรทุกชิดทางเท้า

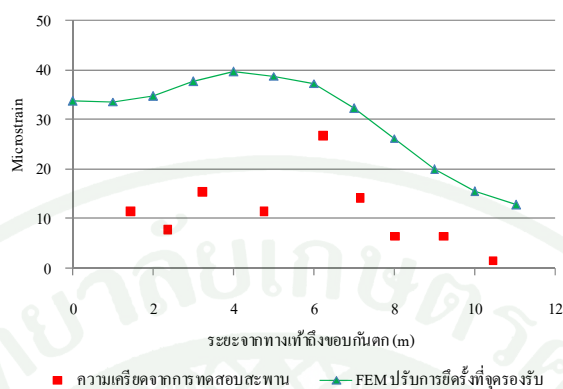


ภาพผนวกที่ ๓๘ เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักรรทุกกลางสะพาน

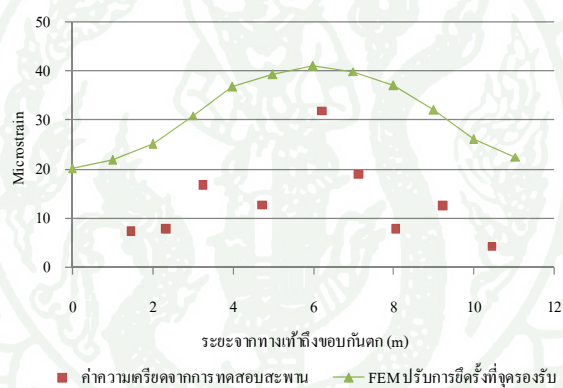


ภาพผนวกที่ ๓๙ เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งซ้ายน้ำหนักรรทุกชิดขอบกันตก

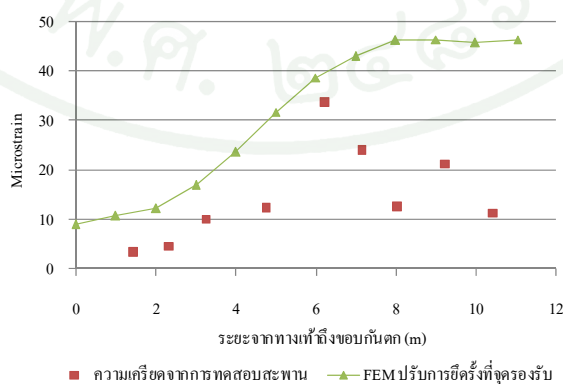
สะพานข้ามคลองบางอ้อ ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข10 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

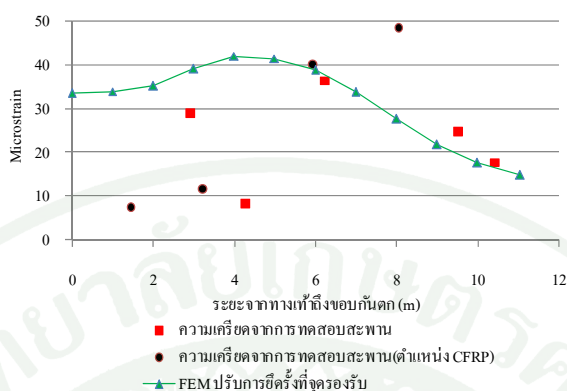


ภาพผนวกที่ ข11 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

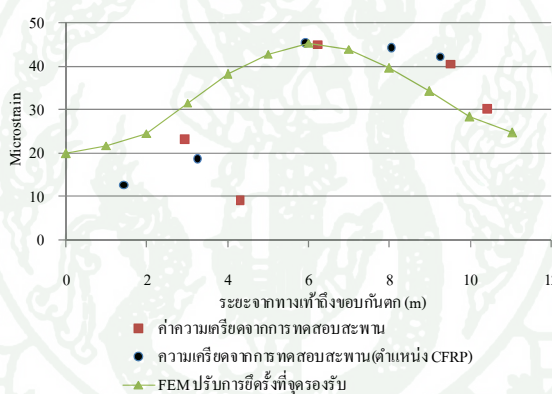


ภาพผนวกที่ ข12 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามบางอ้อฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก

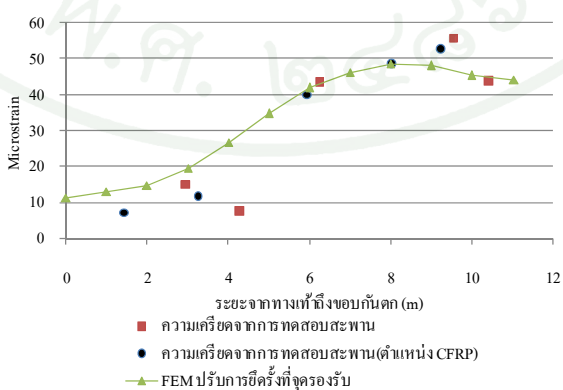
สะพานข้ามคลองสะพานยาว ฟุ้งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข13 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

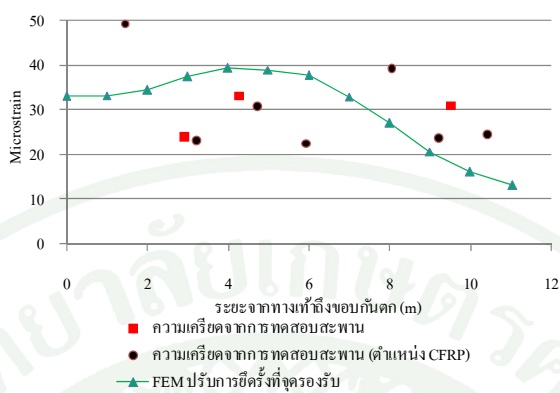


ภาพผนวกที่ ข14 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักกลางสะพาน

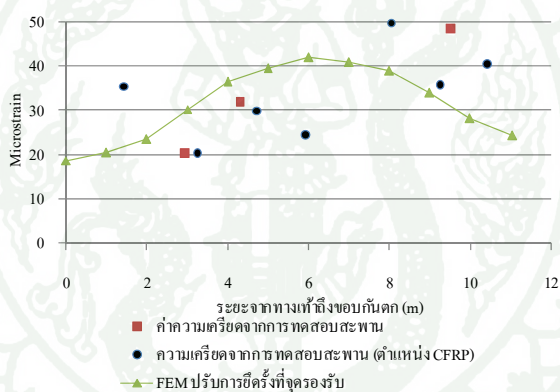


ภาพผนวกที่ ข15 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักชิดขอบกันตก

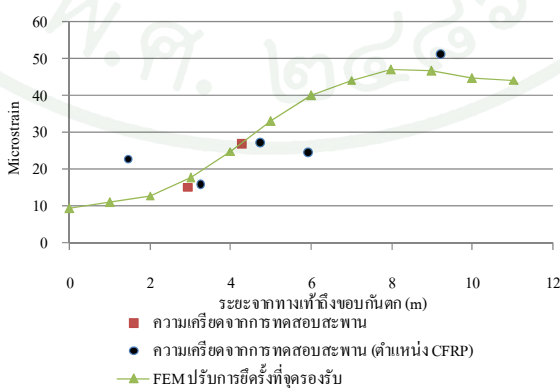
สะพานข้ามคลองสะพานยาว ฟังขวา



ภาพผนวกที่ ข16 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดทางเท้า

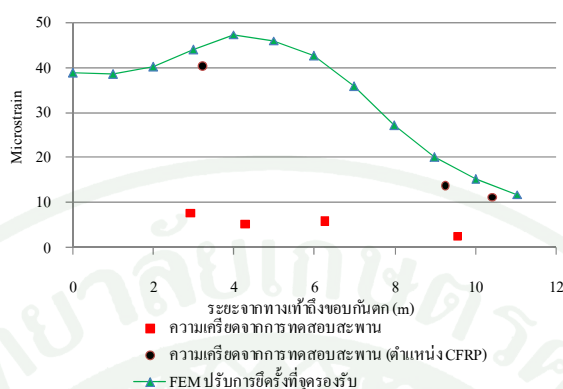


ภาพผนวกที่ ข17 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักกลางสะพาน

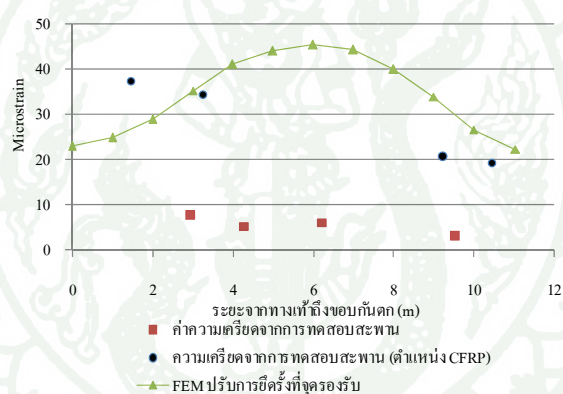


ภาพผนวกที่ ข18 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองสะพานยาวน้ำหนักชิดขอบกันตก

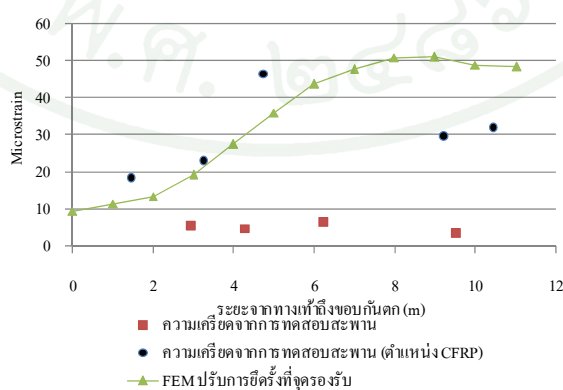
สะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้าย



ภาพผนวกที่ ข19 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

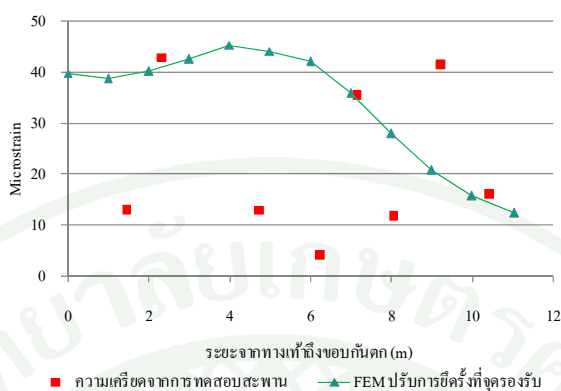


ภาพผนวกที่ ข20 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

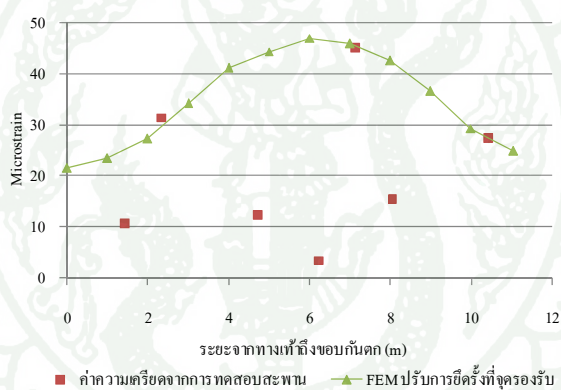


ภาพผนวกที่ ข21 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันคก

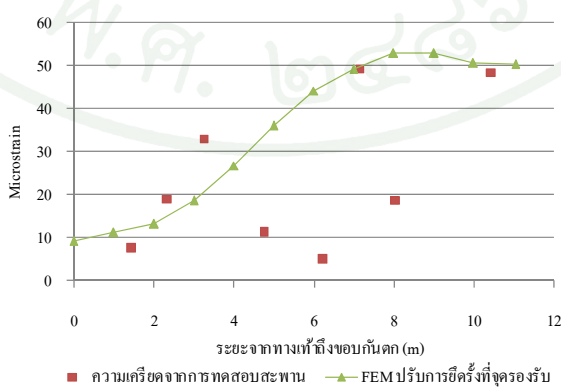
สะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวา



ภาพผนวกที่ ข22 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวาน้ำหนักชิดทางเท้า

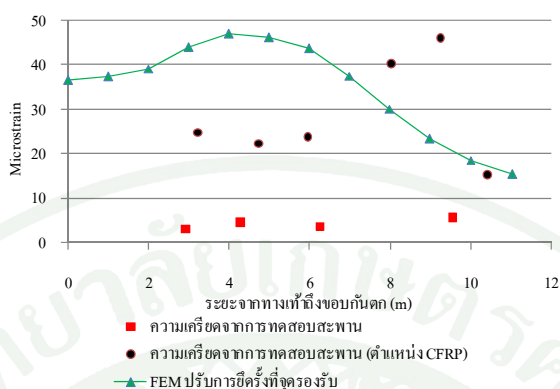


ภาพผนวกที่ ข23 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวาน้ำหนักกลางสะพาน

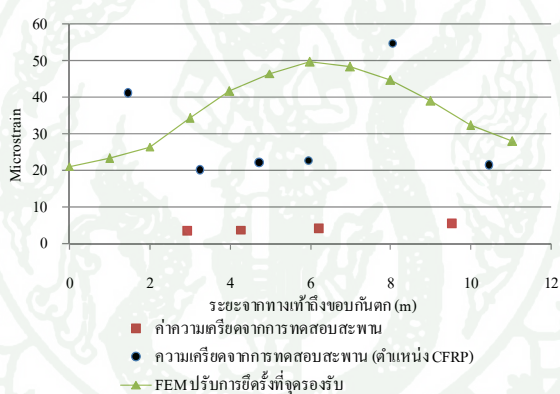


ภาพผนวกที่ ข24 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 1 ฟังขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

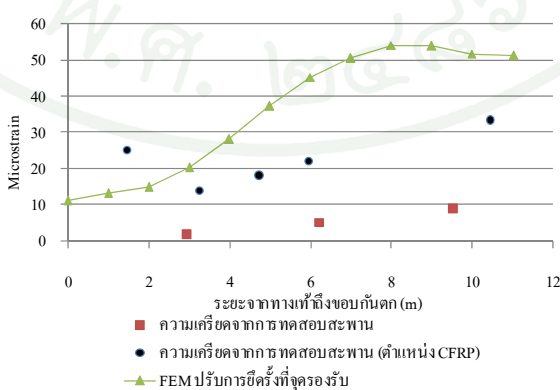
สะพานข้ามคลองเตาอิฐ ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข25 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

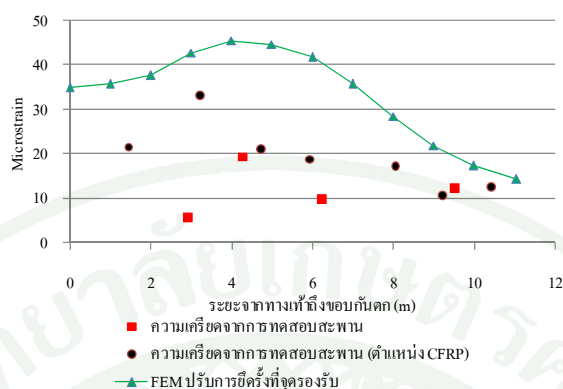


ภาพผนวกที่ ข26 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

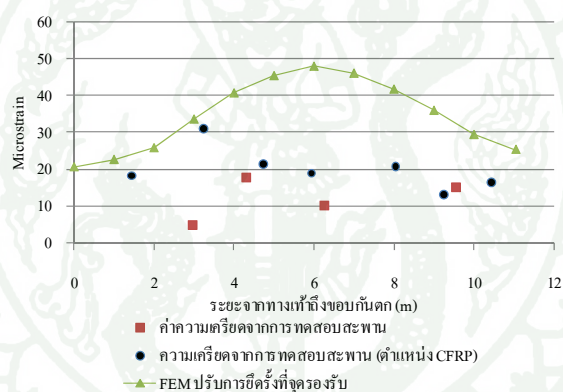


ภาพผนวกที่ ข27 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองเตาอิฐฝั่งซ้ายน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก

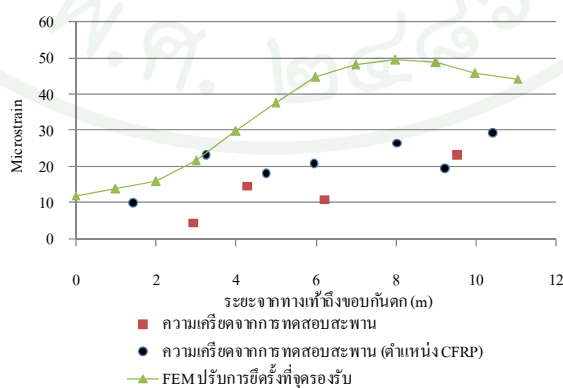
สะพานข้ามคลองเตาอิฐ ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข28 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

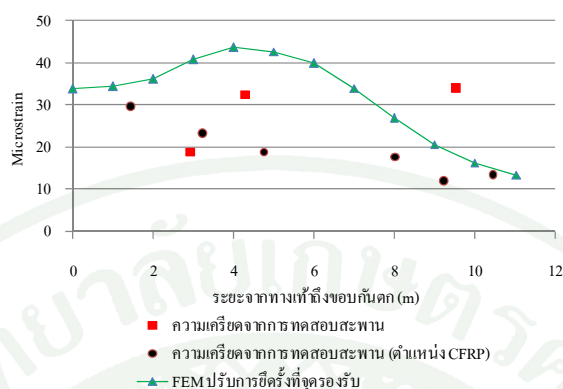


ภาพผนวกที่ ข29 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

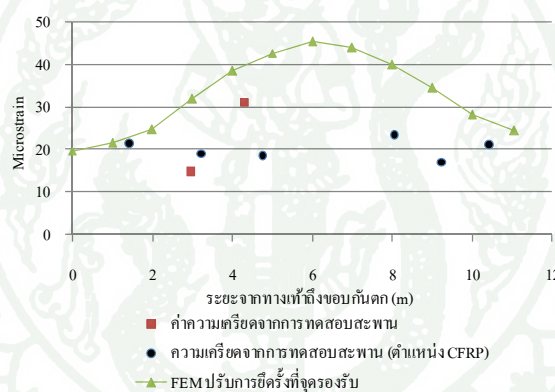


ภาพผนวกที่ ข30 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองเตาอิฐฝั่งขวาน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตก

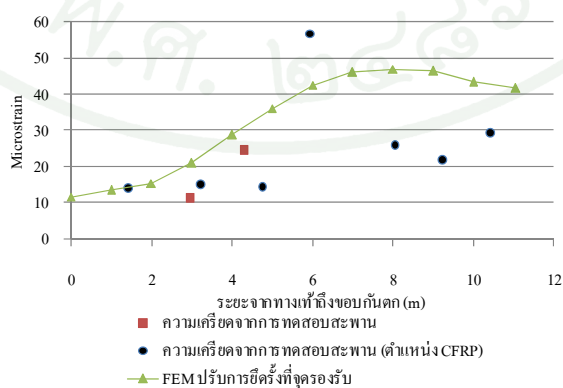
สะพานข้ามคลองบางรัก ฟุ้งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข31 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฟุ้งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

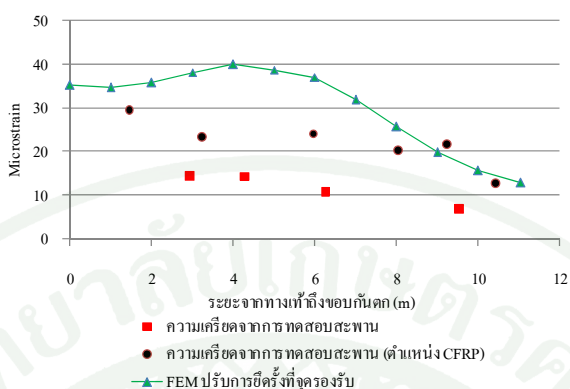


ภาพผนวกที่ ข32 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฟุ้งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

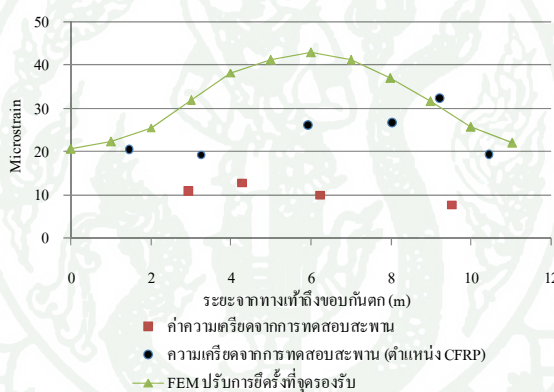


ภาพผนวกที่ ข33 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางรักฟุ้งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก

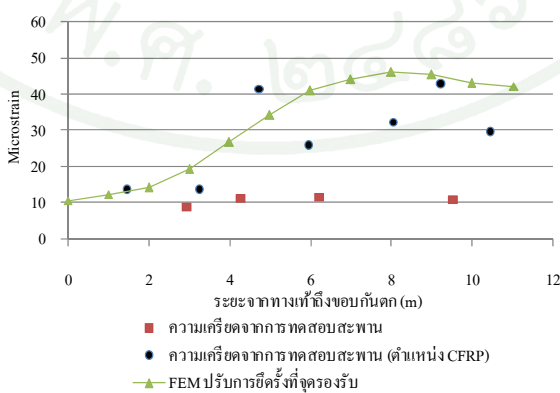
สะพานข้ามคลองบางรัก ฟุ้งขาว



ภาพผนวกที่ ข34 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฟุ้งขาวน้ำหนักชิดทางเท้า

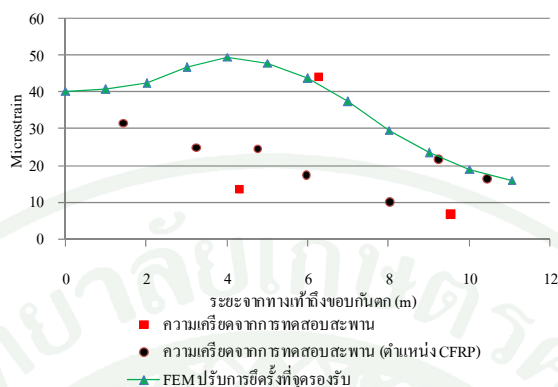


ภาพผนวกที่ ข35 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางรักฟุ้งขาวน้ำหนักกลางสะพาน

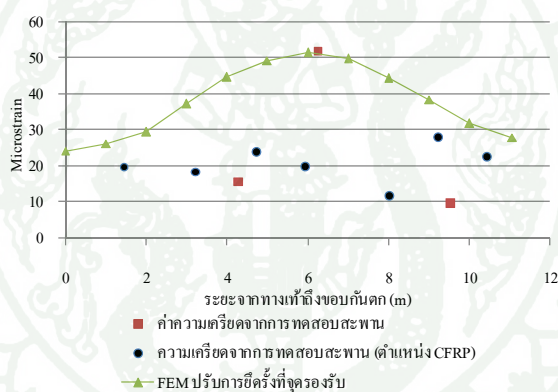


ภาพผนวกที่ ข36 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางรักฟุ้งขาวน้ำหนักรวมทุกชิดขอบกันตก

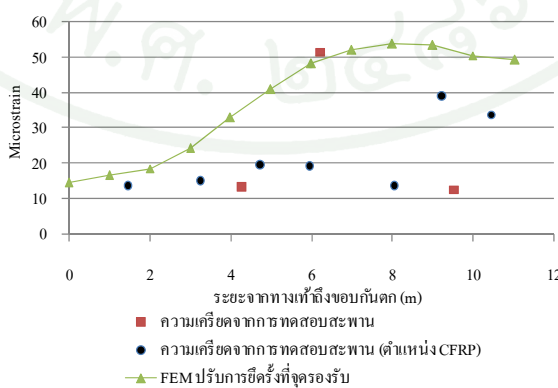
สะพานข้ามคลองบางพระครู ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข37 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

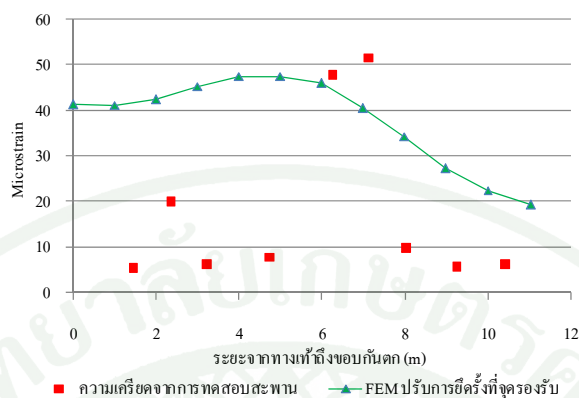


ภาพผนวกที่ ข38 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูน้ำหนักกลางสะพาน

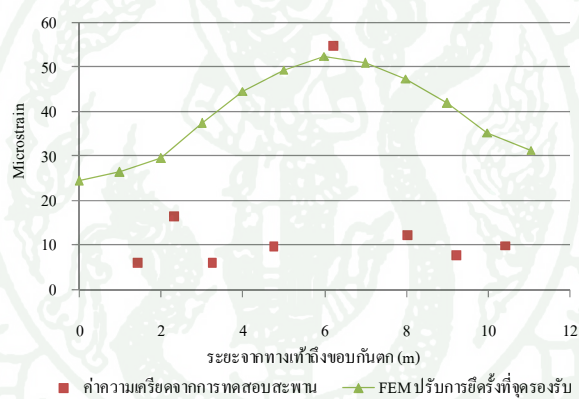


ภาพผนวกที่ ข39 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพระครูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก

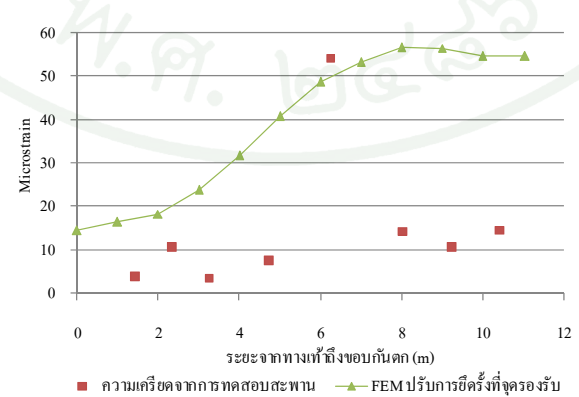
สะพานข้ามคลองบางพระครู ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข40 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า

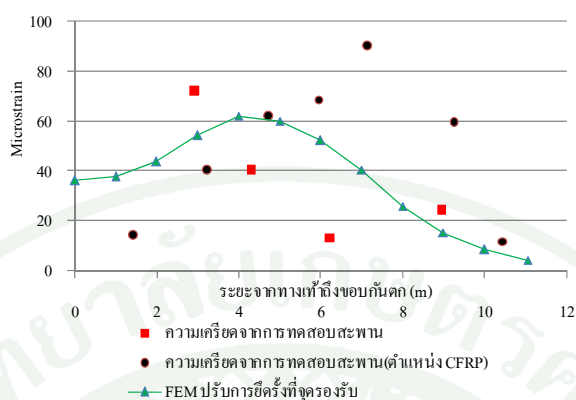


ภาพผนวกที่ ข41 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

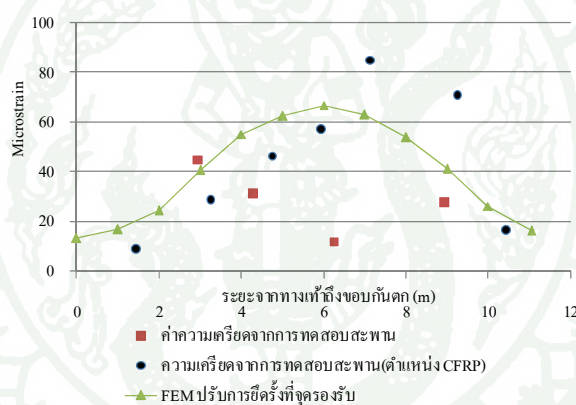


ภาพผนวกที่ ข42 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพระครูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

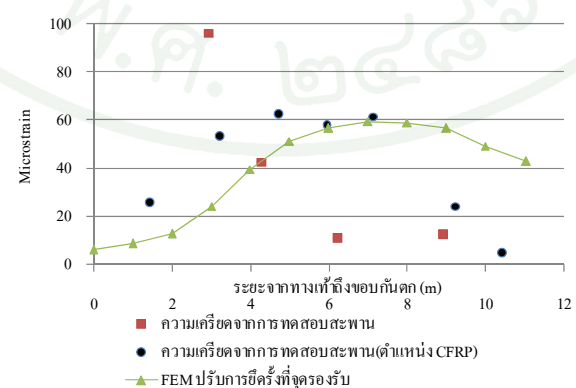
สะพานข้ามคลองบางพลัด ฟุ้งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข43 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

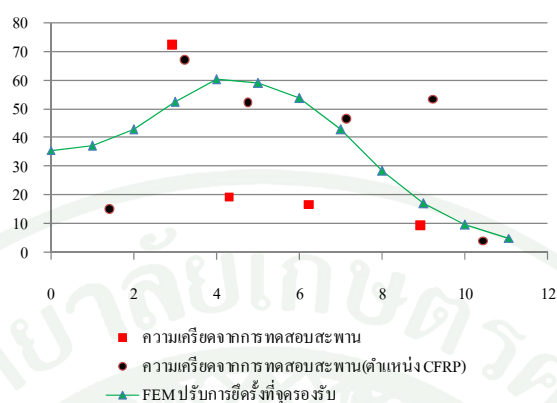


ภาพผนวกที่ ข44 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

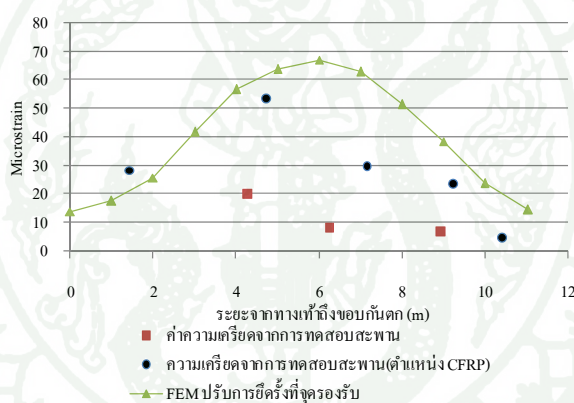


ภาพผนวกที่ ข45 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลัดฟุ้งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก

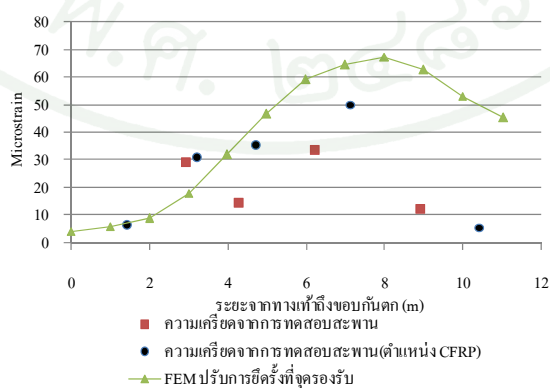
สะพานข้ามคลองบางพลัด ฟุ้งขาว



ภาพผนวกที่ ข46 เปรียบเทียบความเค้นสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งขาวน้ำหนักชิดทางเท้า

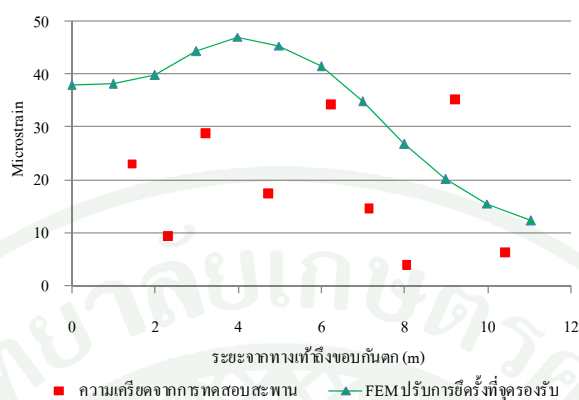


ภาพผนวกที่ ข47 เปรียบเทียบความเค้นสะพานข้ามคลองบางพลัดฟุ้งขาวน้ำหนักกลางสะพาน

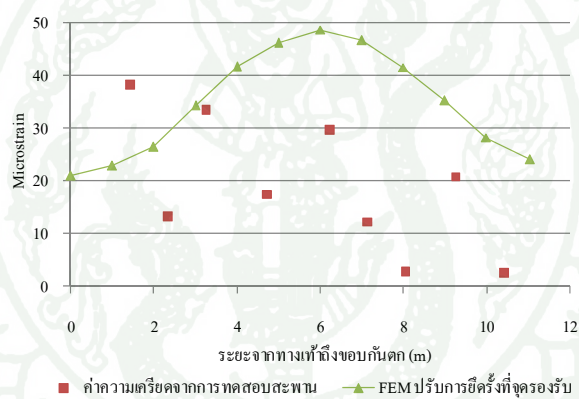


ภาพผนวกที่ ข48 เปรียบเทียบความเค้นสะพานคลองบางพลัดฟุ้งขาวน้ำหนักชิดขอบกันตก

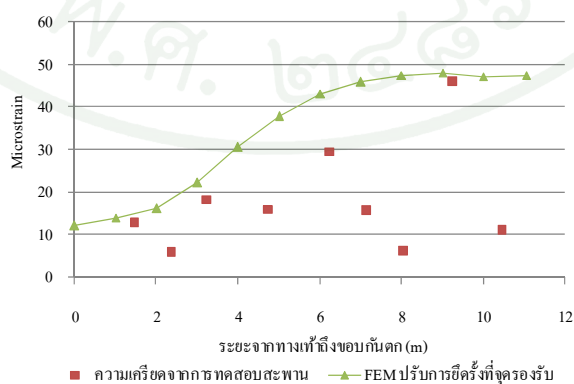
สะพานข้ามคลองบางพลู ฝั่งซ้าย



ภาพผนวกที่ ข49 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดทางเท้า

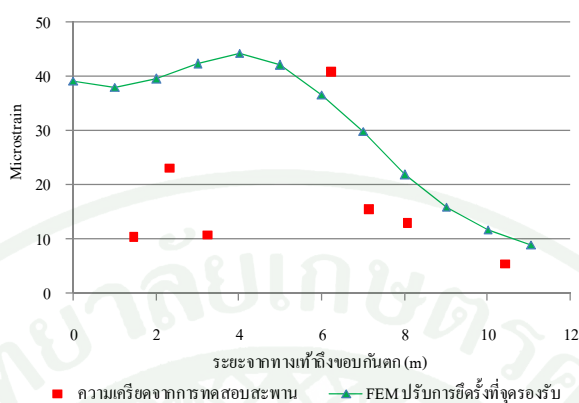


ภาพผนวกที่ ข50 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักกลางสะพาน

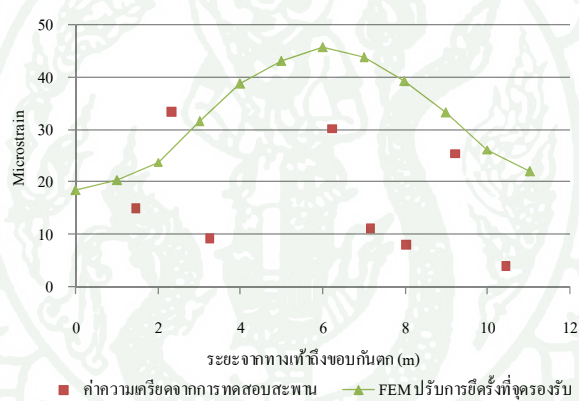


ภาพผนวกที่ ข51 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลูฝั่งซ้ายน้ำหนักชิดขอบกันตก

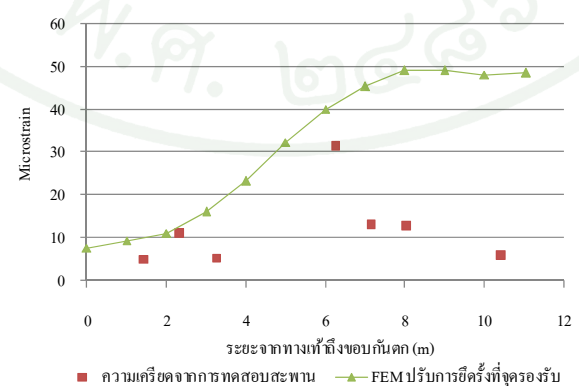
สะพานข้ามคลองบางพลู ฝั่งขวา



ภาพผนวกที่ ข52 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักชิดทางเท้า

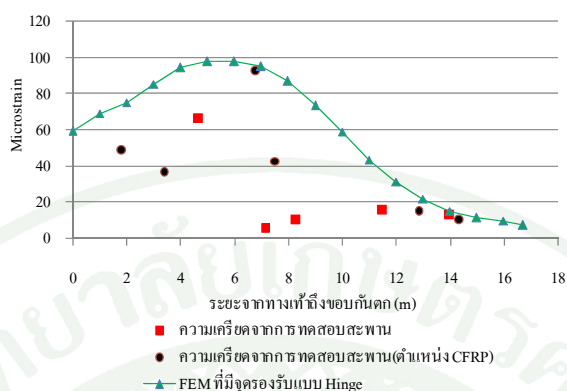


ภาพผนวกที่ ข53 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักกลางสะพาน

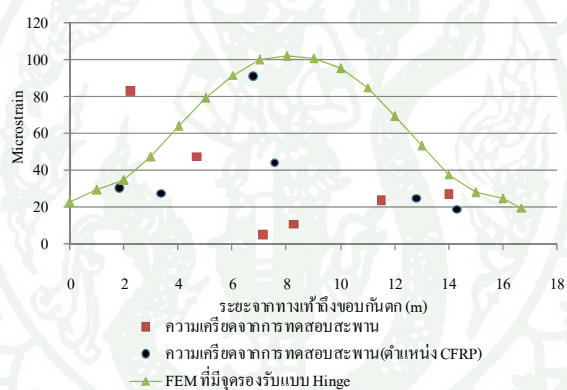


ภาพผนวกที่ ข54 เปรียบเทียบความเครียดสะพานคลองบางพลูฝั่งขวาน้ำหนักชิดขอบกันตก

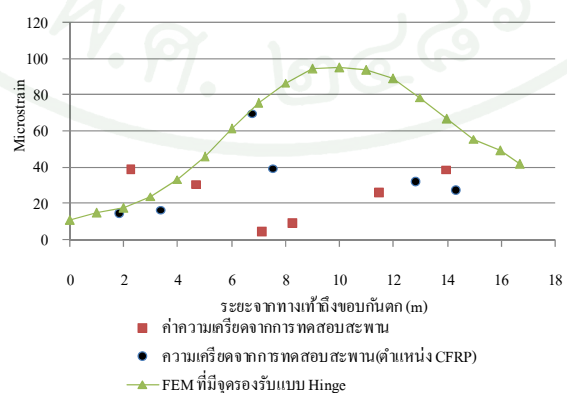
สะพานข้ามคลองบางขุนนนท์



ภาพผนวกที่ ข55 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักชิดทางเท้า 1

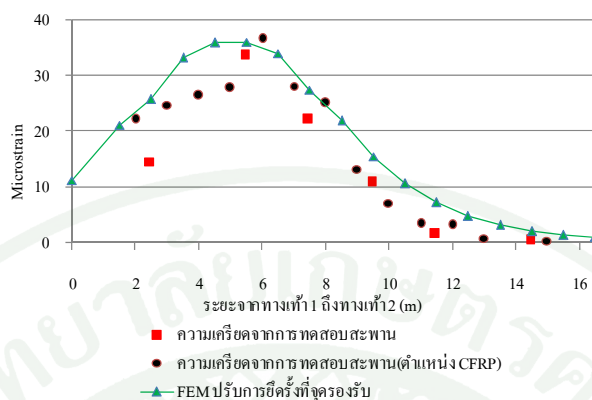


ภาพผนวกที่ ข56 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์ น้ำหนักกลางสะพาน

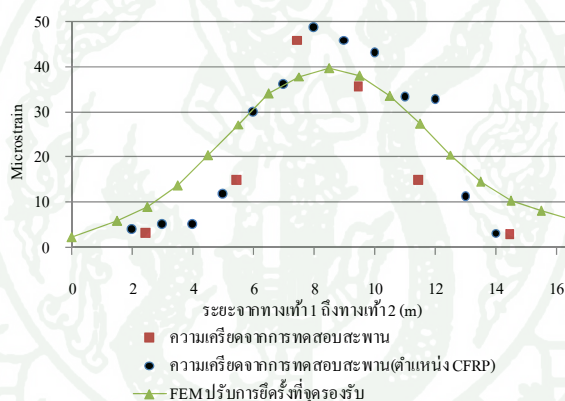


ภาพผนวกที่ ข57 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองบางขุนนนท์น้ำหนักชิดทางเท้า 2

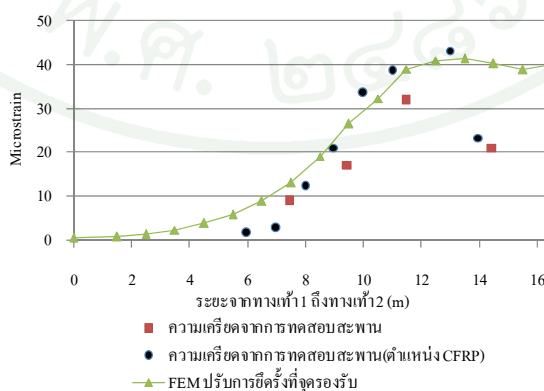
สะพานข้ามคลองวัดเจ้าอาม



ภาพผนวกที่ ข58 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำหนักรรทุกชิดทางเท้า 1

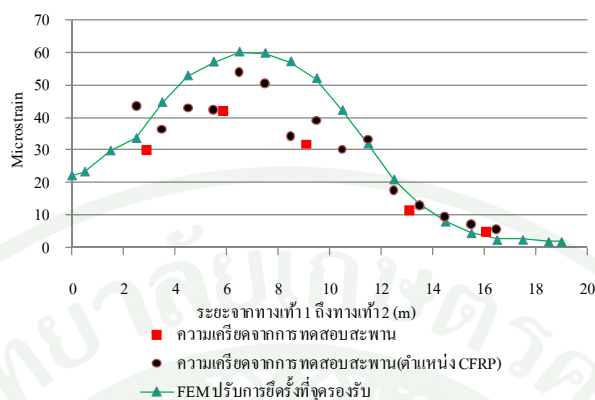


ภาพผนวกที่ ข59 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำหนักรรทุกกลางสะพาน

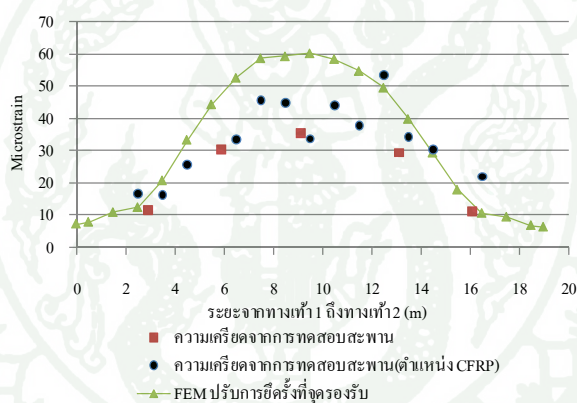


ภาพผนวกที่ ข60 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองวัดเจ้าอามน้ำหนักรรทุกชิดทางเท้า 2

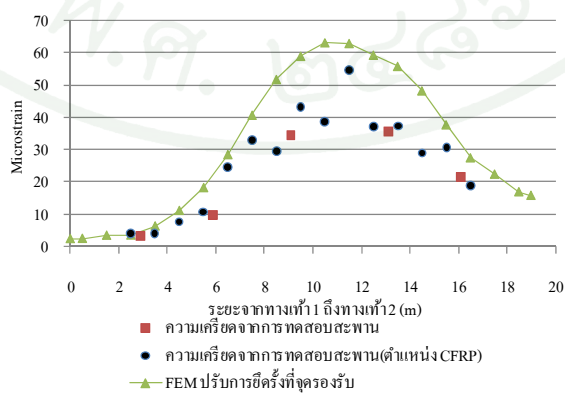
สะพานข้ามคลองมอญ 3



ภาพผนวกที่ ข61 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 1



ภาพผนวกที่ ข62 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน



ภาพผนวกที่ ข63 เปรียบเทียบความเครียดสะพานข้ามคลองมอญ 3 น้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า 2

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายณริศ ไกรสร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันพุธ ที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2549

