



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>**พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน****Behavior of concrete bridges strengthened with CFRP**

นริศ ไกรสร และ ปิยะ โชติกไกร*

Naris Graison and Piya Chotickai*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 10900

Received March 2012

Accepted August 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประเมินสมรรถนะของโครงสร้างสะพานคอนกรีตที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยพิจารณาโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและสะพานคอนกรีตอัดแรง พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่เสริมกำลังประเมินจากการทดสอบ Diagnostic load tests และใช้การจำลองโครงสร้างสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการตรวจสอบการกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นสะพาน ผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนาม และการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอนไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายของน้ำหนักบรรทุกทุกภายในโครงสร้าง อย่างไรก็ตามสมรรถนะการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานสามารถมีค่ากำลังที่สูงขึ้นโดยระบบการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน

คำสำคัญ : สะพานคอนกรีต เสริมกำลัง พลาตัสเสริมเส้นใย ไฟไนต์เอลิเมนต์ การกระจายน้ำหนักบรรทุก

Abstract

The main objective of the study was to evaluate the behavior and performance of concrete bridges strengthened with CFRP composites. The bridges with various superstructure configurations, including reinforced concrete slab and prestressed concrete girder, were studied. The behaviors of strengthened bridges were evaluated using diagnostic load tests. Three-dimensional finite element models were developed to investigate the distribution of wheel loads for various positions on the bridge spans. The results obtained from field testing and FEM models revealed that the overall load distribution was slightly altered from the CFRP strengthening system. However, the performance of bridge structures could considerably be enhanced by the strengthening system.

Keywords : Concrete bridge, Strengthening, FRP, Finite element, Load distribution

*Corresponding author.

Email address: fengpyc@ku.ac.th

1. บทนำ

สะพานคอนกรีตเป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญต่อการคมนาคมขนส่งทางบก ซึ่งต้องรองรับน้ำหนักจราจรจากการขนส่งที่มีแนวโน้มสูงขึ้น จากการออกกฎกระทรวง เมื่อ พ.ศ. 2548 ซึ่งอนุญาตให้เพิ่มน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกจากเดิม ไม่เกิน 21 ตัน เป็น 25 ตัน จึงทำให้ต้องมีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานที่ได้มีการออกแบบและก่อสร้างก่อนหน้านี้ การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานจะช่วยให้สะพานมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถรองรับปริมาณการจราจรและน้ำหนักของรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้อย่างปลอดภัย

วิธีการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานคอนกรีตในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ เช่น การเสริมแผ่นเหล็กใต้พื้นสะพานเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงดัด การเพิ่มหน้าตัดพื้นสะพานโดยการพอกคอนกรีตบริเวณจุดรองรับเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือน หรือการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ซึ่งแต่ละวิธีล้วนมีความแตกต่างทั้งวิธีการติดตั้งวัสดุเสริมกำลังและอายุการใช้งานของวัสดุเสริมกำลังในสภาวะแวดล้อมต่างๆ สำหรับตัวอย่างสะพานคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาได้รับการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงและเป็นวัสดุเสริมกำลังที่สามารถรับแรงได้สูงและมีน้ำหนักเบา [1]

การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างตามหลักวิศวกรรมและแสดงกำลังรับน้ำหนักด้วยค่า Rating Factor (RF) ตามมาตรฐาน AASHTO [2] สำหรับการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจำเป็นต้องอาศัยหลักการดังกล่าวเพื่อเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงกำลังของโครงสร้างสะพานในสภาวะปัจจุบันเทียบกับกำลังของสะพานใหม่ที่ยออกแบบตามมาตรฐาน LRFD [3]

บทความนี้ได้นำเสนอการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างสะพานคอนกรีตที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอนจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน (Diagnostic load tests) และวิเคราะห์จากแบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยสูงสุดของสะพาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินกำลังรับน้ำหนักปลอดภัย

การประเมินกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยใช้วิธีการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกจากสมการ Rating factor (RF) ตามมาตรฐาน AASHTO [2] แสดงดังสมการที่ 1 หากสะพานที่มีค่า RF มากกว่าหรือเท่ากับ 1 แสดงว่าสะพานที่พิจารณามีความปลอดภัยในการใช้งาน หากค่า RF มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าโครงสร้างไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานสำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด

สำหรับการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบมีระดับความปลอดภัย 2 ระดับคือ ระดับ Inventory (IN) เป็นการประเมินโครงสร้างด้วยระดับความปลอดภัยเดียวกับการออกแบบ และระดับ Operating (OP) เป็นการประเมินโครงสร้างด้วยขนาดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ยอมให้ได้สำหรับจำนวนครั้งของการผ่านโครงสร้างที่จำกัด

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

เมื่อ

C คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานซึ่งมีค่าเท่ากับ $\phi_c \phi_s \phi R_n$

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 สำหรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และ 0.85 สำหรับกำลังต้านทานแรงเฉือน

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_L คือ ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร มีค่าเท่ากับ 1.75 สำหรับระดับความปลอดภัยแบบ Inventory (IN) และมีค่าเท่ากับ 1.35 สำหรับระดับความปลอดภัยแบบ Operating (OP)
- LL คือ ผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร
- IM คือ ผลของแรงกระแทกจากน้ำหนักบรรทุกจร มีค่าเท่ากับร้อยละ 33

2.2 การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร

ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรมีความซับซ้อนเนื่องจากการกระจายน้ำหนักของล้อที่กระทำต่อพื้นสะพาน สำหรับสะพานแบบพื้น (Slab Type) ระบบโครงสร้างจะเป็นแบบพื้นตันไปตลอดทั้งแผ่น ความกว้างของสะพานจึงมีผลต่อการกระจายน้ำหนักของล้อ ดังนั้นการกระจายน้ำหนักบรรทุกจรจึงพิจารณาตามความกว้างประสิทธิผล สำหรับสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestressed concrete girder) ระบบโครงสร้างจะเป็นคานคอนกรีตอัดแรงมาวางเรียงกัน รอยต่อระหว่างแผ่นคานจะมีสลักกับแรงเฉือน (Shear key) ทำหน้าถ่ายทอดแรงจากน้ำหนักล้อกระจายสู่คานอื่น ๆ ดังนั้นน้ำหนักล้อที่กระจายลงคานแต่ละตัวจึงได้จากการพิจารณาสัดส่วนการกระจายน้ำหนักบรรทุกจร

การคำนวณค่าการกระจายน้ำหนักของล้อ (Equivalent width, E) สำหรับสะพานแบบพื้น ใช้การพิจารณาการกระจายน้ำหนักล้อที่กระทำลงบนพื้นสะพานและส่งถ่ายแรงไปยังโครงสร้างอื่นๆ ทำให้ผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรลดลง ทั้งนี้ AASHTO [3] ได้กำหนดสมการหาการกระจายน้ำหนักล้อตามแผ่นพื้นทางแนวขวางต่อช่องจราจร สำหรับแรงเฉือนและโมเมนต์ในสะพานที่มีช่องจราจร 2 ช่องขึ้นไป แสดงดังสมการที่ 2

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

เมื่อ

- E คือ ค่าการกระจายน้ำหนักของล้อ (mm)
- L_1 คือ ความยาวช่วงพาดของสะพาน (mm)
- W_1 คือ ความกว้างที่ถูกดัดแปลงของพื้นสะพานจากขอบถึงขอบ (mm)

W คือ ความกว้างทางกายภาพของพื้นสะพานจากขอบถึงขอบ (mm)

N_L คือ จำนวนช่องจราจร

การกระจายน้ำหนักบรรทุกจร (Distribution loads) สำหรับโครงสร้างสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรง ไม่สามารถใช้สมการการกระจายน้ำหนักของล้อได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่ต่างกันรวมไปถึงพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงที่ต่างกันด้วย ทั้งนี้ AASHTO [3] ได้กำหนดสมการหาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกจร (Distribution factors, DF) สำหรับสะพานแบบคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องจราจร 2 ช่องขึ้นไปตามสมการที่ 3

$$DF = k \left(\frac{b}{7,600} \right)^{0.6} \left(\frac{b}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{I}{J} \right)^{0.06} \quad (3)$$

เมื่อ

DF คือ ตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกจร (mm)

k คือ $2.5(N_b)^{-0.2} \geq 1.5$

N_b คือ จำนวนคานคอนกรีตอัดแรง

b คือ ความกว้างของคานคอนกรีตอัดแรง (mm)

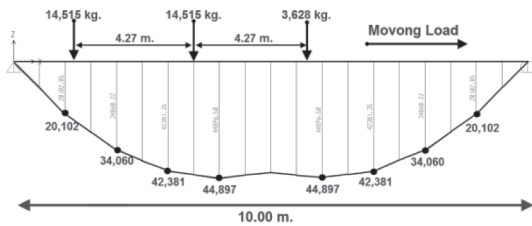
L คือ ความยาวช่วงพาดของสะพาน (mm)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรง (mm⁴)

J คือ แรงบิดความเฉื่อย St. Venant (mm⁴)

2.3 โมเมนต์เอนเวลลอป (Moment Envelope)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวช่วงสะพาน คำนวณโดยการหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดในกรณีน้ำหนักบรรทุกจรอยู่ตำแหน่งต่างๆ บนสะพานเมื่อนำค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมาเขียนจะได้เส้นที่เรียกว่าโมเมนต์เอนเวลลอป ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1 เป็นการหาโมเมนต์เอนเวลลอปของคานที่มีความยาว 10 เมตร โดยใช้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ HS20-44 ตามมาตรฐาน AASHTO [3]

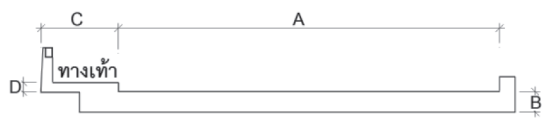


รูปที่ 1 การวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์เอนเวลลอป

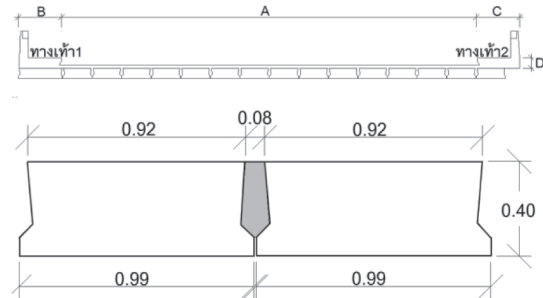
3. วิธีการวิจัย

3.1 รายละเอียดตัวอย่างสะพานทดสอบ

สะพานคอนกรีตที่ได้นำมาศึกษามี 2 ลักษณะ คือ สะพานที่มีโครงสร้างแบบพื้น และสะพานคอนกรีตอัดแรง โดยมีรายละเอียดและรูปตัดของสะพานทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 2 ตารางที่ 1 และ 2



(ก) รูปตัดสะพานแบบพื้น



(ข) รูปตัดและรูปขยายหน้าตัดสะพานคอนกรีตอัดแรง

รูปที่ 2 รูปตัดตามขวางสะพาน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของสะพานแบบพื้น

คุณสมบัติของสะพาน	ขนาด	หน่วย
ความยาวช่วงพาดสะพาน	10	m
ความกว้างพื้นสะพาน (A)	9.9	m
จำนวนช่องจราจร	3	Lane
ความหนาพื้นสะพาน (B)	53	cm
ความกว้างช่องทางเท้า (C)	2	m
ความหนาทางเท้า (D)	25	cm
กำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก	334	ksc
กำลังครากของเหล็กเสริม เกรด SD 30	3,937	ksc
พื้นที่เหล็กเสริม, As	54.54	cm ²

ตารางที่ 2 รายละเอียดของสะพานคอนกรีตอัดแรง

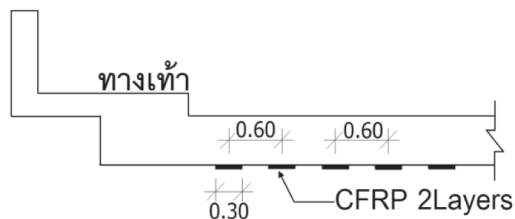
คุณสมบัติของสะพาน	ขนาด	หน่วย
ความยาวช่วงพาดสะพาน	10	m
ความกว้างพื้นสะพาน (A)	14	m
จำนวนช่องจราจร	4	Lane
ความหนาแผ่นพื้นสะพานสำเร็จรูป	35	cm
ความหนาคอนกรีตเทพบนหน้า	10	cm
ความกว้างช่องทางเท้า 1 (B) และ 2 (C)	1.50	m
กำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก	258	ksc
ความหนาพื้นทางเท้า (D)	25	cm
ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น		
เกรด 250 , Ø3/8" (9.53mm.)	14	เส้น

3.2 การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุ CFRP

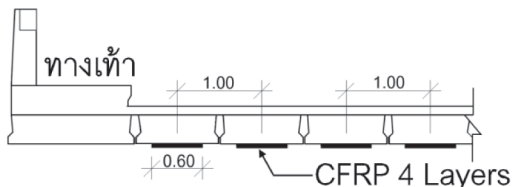
สะพานคอนกรีตที่พิจารณามีการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมและอายุการใช้งานที่ยาวนาน การประเมินกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยด้วย Rating factor จากสมการ 1 สามารถรวมผลกระทบของการเสื่อมสภาพที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของสะพานได้โดยพิจารณาจากค่า Condition rating (CR) ที่ได้จากการประเมินระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างด้วยสายตาโดยทั่วไปการให้คะแนน CR จะพิจารณาจากการบรรยายลักษณะการเสื่อมสภาพโครงสร้างของสะพานตามหลักเกณฑ์ของ AASHTO มีคะแนนตั้งแต่ 0 คือ สภาพที่ไม่สามารถใช้งานได้ จนถึง 9 คือสภาพโครงสร้างดีเยี่ยม โดยค่า CR ของสะพานแบบพื้นที่พิจารณาก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าเท่ากับ 4 คือโครงสร้างมีการเสื่อมสภาพค่อนข้างมาก และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงที่พิจารณาก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าเท่ากับ 5 คือ

โครงสร้างอยู่ในสภาพปานกลาง ในการคำนวณ RF ใช้รถบรรทุก 2 แบบ คือ รถบรรทุกไทย 25 ตัน และ 1.3HS20-44 โดยโมเมนต์ที่วิเคราะห์จากน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 ให้ค่าสูงกว่ารถบรรทุกไทย 25 ตัน จากการคำนวณด้วยสมการ Rating factor ของสะพานแบบพื้นพบว่าค่า RF มีค่าเท่ากับ 0.78 และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงพบว่าค่า RF มีค่าเท่ากับ 0.89 เมื่อใช้น้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 มาวิเคราะห์ ซึ่งน้อยกว่า 1 จึงต้องซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง

การออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ได้ใช้ข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 [4] สำหรับรายละเอียดการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานแบบพื้นมีดังนี้ วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์มีความกว้าง 300 mm ความยาว 9.50 m ความหนา 0.176 mm จำนวน 2 ชั้น มีกำลังรับแรงดึง 3,800 MPa และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 240 GPa กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดปลายของหน้าตัดที่เสริมกำลังด้วย CFRP เท่ากับ 593.70 KN-m/m สำหรับรายละเอียดการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงมีดังนี้ วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์มีความกว้าง 600 mm ความยาว 9.50 m ความหนา 0.176 mm จำนวน 4 ชั้น กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดปลายของหน้าตัดที่เสริมกำลังด้วย CFRP เท่ากับ 664.50 KN-m/m ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3



(ก) การเสริมกำลัง CFRP ของสะพานแบบพื้น



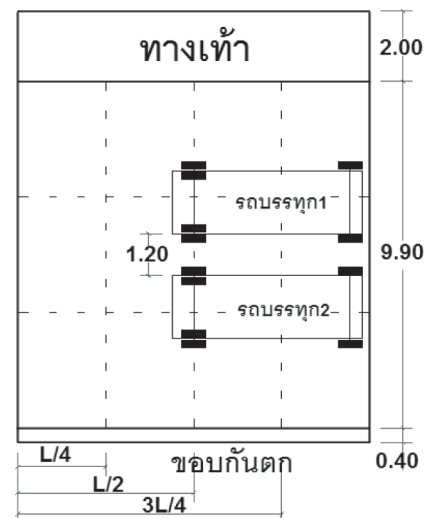
(ข) การเสริมกำลัง CFRP ของสะพานคอนกรีตอัดแรง

รูปที่ 3 การเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วย CFRP

3.3 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพาน

การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างสะพานเป็น การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้าง สำหรับ ตัวอย่างสะพานทั้งสองแบบได้ทดสอบแบบวิธี Diagnostic Load Test ซึ่งเป็นทดสอบหาการตอบสนองของโครงสร้าง สะพานภายใต้ น้ำหนักของรถบรรทุก โดยกำหนดน้ำหนักรถบรรทุกทดสอบไว้ที่ประมาณ 25 ตัน จำนวน 2 คันแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต (Static load test) และการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต (Dynamic load test)

การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง เช่น การโก่งตัว และความเครียดของโครงสร้าง สำหรับการวางตำแหน่งรถบรรทุกในการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต ได้กำหนดไว้ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ ขีดขอบแต่ละด้านเพื่อดูผลของทางเท้าและราวกันตกที่มีต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพาน และที่ตำแหน่งวิกฤติกลางสะพาน การวางตำแหน่งล้อรถบรรทุกได้กำหนดระยะตามมาตรฐาน AASHTO [3] คือ ระยะระหว่างขอบทางเดินหรือขอบกันตกถึงกึ่งกลางของล้อรถบรรทุกได้กำหนดระยะตามมาตรฐาน AASHTO [3] คือ ระยะระหว่างขอบทางเดินหรือขอบกันตกถึงกึ่งกลางของล้อรถบรรทุกเพลาหลัง เท่ากับ 60 cm และระยะห่างระหว่างกึ่งกลางล้อรถบรรทุกที่อยู่ติดกันมีระยะห่างไม่ต่ำกว่า 120 cm สำหรับระยะหยุดรถตามความยาวสะพานมีอยู่ 3 ตำแหน่ง คือ 1/4, 1/2 และ 3/4 ของความยาวช่วงพาดสะพาน ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวางตำแหน่งรถบรรทุกกลางสะพาน ช่วง L/2

การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต เป็นการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างสะพานส่วนพื้น ที่เกิดจากน้ำหนักของรถบรรทุกเคลื่อนที่เป็นหน้ากระดานไปและกลับด้วยความเร็วคงที่คือ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่ไม่ต้องพิจารณาผลจากแรงกระแทก (Impact load) ความเร็ว 30 และความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่รถบรรทุกทดสอบจำนวน 2 คันวิ่งได้อย่างปลอดภัยบนสะพาน

ผลจากการตรวจวัดการสั่นไหวในแนวดิ่งของโครงสร้างพื้นสะพานสามารถนำไปหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ ค่าความถี่ธรรมชาติบ่งบอกถึงความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับสะพานที่มีขนาดและลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความถี่ธรรมชาติมีค่ามากแสดงว่าสะพานที่พิจารณานั้นมีความแข็งแกร่งมากกว่าสะพานที่มีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า ตัวอย่างการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสะพานทั้งการโก่งตัวของโครงสร้างจากการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิต และค่าความถี่การสั่นไหวของโครงสร้างสะพานจากการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลวัตนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Natural frequency) โดยวิธี Fast fourier transformation (FFT) ซึ่งข้อมูลทั้งสองนี้มีความสำคัญสำหรับการปรับแก้แบบจำลองของโครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) สามารถทำได้โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของสะพาน โดยแบบจำลองวิเคราะห์บนพื้นฐานสมมติฐานว่าวัสดุคอนกรีตอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Linear elasticity) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) ที่ระบุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้จากการพิจารณาตามมาตรฐาน ACI แสดงดังสมการที่ 4 โดยกำลังอัดคอนกรีตได้มาจากการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างบริเวณส่วนพื้นสะพานแล้วนำไปทดสอบหากำลังอัดในห้องปฏิบัติการ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตของสะพานแบบพื้นและคอนกรีตอัดแรงมีค่าเท่ากับ 275,963 ksc และ 242,542 ksc ตามลำดับ สำหรับขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของโครงสร้างสะพานได้มาจากการวัดขนาดจริงจากภาคสนาม และข้อมูลจากแบบก่อสร้างสะพาน

$$E_c = 15,100\sqrt{f_c'} \quad (4)$$

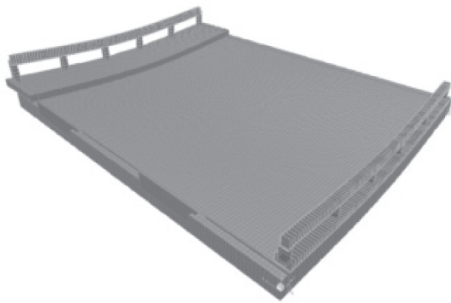
เมื่อ

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (ksc)

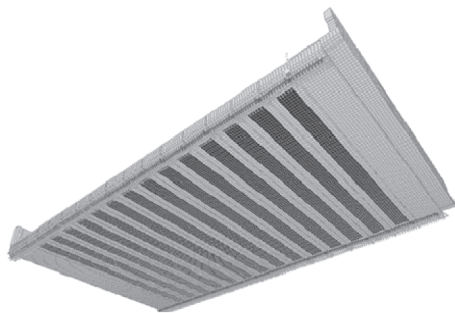
f_c' คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (ksc)

โครงสร้างสะพานแบบพื้นได้จำลองพื้นสะพาน พื้นทางเดินโดยเอลิเมนต์แบบแผ่นเปลือกบาง (Thin shell element) ซึ่งมีการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) ขนาด 10 x 10 cm รวสะพานและเสาของราวสะพานได้มีการจำลองโดยใช้เอลิเมนต์แบบโครงข้อแข็ง (Frame element) ในส่วนของพื้นทางเดินที่ยึดกับพื้นสะพานได้มีการเชื่อมจุดต่อ (Node) โดยวิธียึดจุดต่อ (Constraint node) ในการศึกษาได้พิจารณาแบบจำลองใน 2 ลักษณะ คือ จุดรองรับ (Boundary condition) เป็นแบบ Pin-Pin ตามสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ และจุดรองรับที่มีการยึดรั้งเนื่องจากรายละเอียดของที่รองรับไม่ได้เป็นแบบ Pin-Pin โดยสมมุติฐานสำหรับการจำลองโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงได้มีการจำลองโดยเอลิเมนต์แบบแผ่นเปลือกบางจำนวน 2 ชั้น และใช้วิธียึดรั้งจุดต่อระหว่างชั้นบนและชั้นล่างซึ่งได้ปรับเปลี่ยนให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการจำลองแบบเอลิเมนต์ของแข็ง 3 มิติ (Solid element) สำหรับการจำลองของสลักรับแรงเฉือน (Shear key) โดยเอลิเมนต์แบบแผ่นเปลือกบางที่มีความหนา (Thick shell element) แสดงดังรูปที่ 6(ค) และใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่มีความแตกต่างกับ พื้นสะพานคอนกรีตอัดแรง (5) สำหรับการจำลองวัสดุเสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)

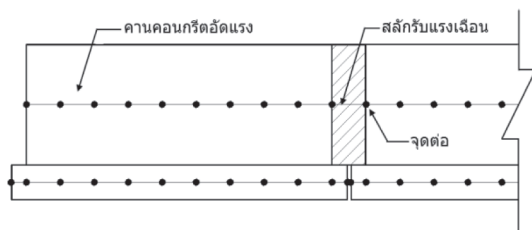
ได้มีการจำลองโดยใช้เอลิเมนต์แบบแผ่นเปลือกบาง (Thin shell element) โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุตามที่ผู้ผลิตระบุ ได้มีการเชื่อมจุดต่อระหว่าง CFRP กับพื้นโดยการยึดรั้งจุดต่อ เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาวะแบบวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) มากที่สุด [6] ตัวอย่างการจำลองสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 6



(ก) การจำลองโครงสร้างสะพานแบบพื้น



(ข) การจำลองโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง



(ค) รูปขยายการจำลองโครงสร้างสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

รูปที่ 6 การจำลองสะพานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

หลังจากการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วย CFRP และทดสอบหาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักของรถบรรทุกแล้วได้นำข้อมูลผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสถิตและภายใต้แรงกระทำ

แบบพลวัตมาใช้ปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3 และ 4

การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ทำโดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์วัดความเร่งตามแนวดิ่งของพื้นสะพาน (Accelerometer) ที่ถูกบันทึกด้วยความถี่ 300 Hz แสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 7 ข้อมูลที่แสดงนี้เป็นข้อมูลของสะพานแบบพื้นโดยใช้รถบรรทุกวิ่งคู่ขนานด้วยความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง นำข้อมูลความเร่งในช่วงการสั่นไหวแบบอิสระมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยวิธี FFT ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 8 โดยที่ตำแหน่งความถี่ (Frequency) ที่มีแอมพลิจูด (Amplitude) สูงที่สุดคือค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ตารางที่ 3 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบสะพานแบบพื้นกรณีวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

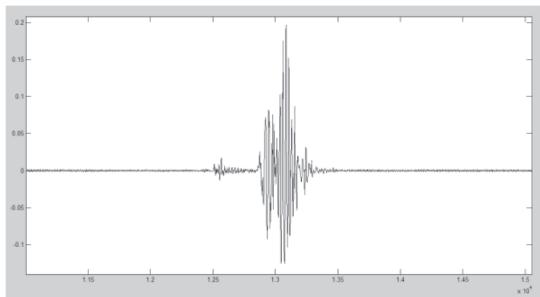
อุปกรณ์ทดสอบ	ระยะโก่งตัว	หน่วย
LVDT1	-1.127	mm
LVDT2	-0.971	mm
ความถี่ธรรมชาติ	13.25	Hz

สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดการโก่งตัวของโครงสร้างสะพานแบบพื้นได้ติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วงสะพาน ซึ่งอุปกรณ์ LVDT1 อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางทางขวางสะพาน (Center line) เนื่องจากตำแหน่งนี้มีค่าโก่งตัวสูงสุดสำหรับการทดสอบกรณีรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งกลางสะพาน จำนวน 2 คัน และอุปกรณ์ LVDT2 มีระยะห่างจากกึ่งกลางทางขวางสะพานเท่ากับ 2.70 m

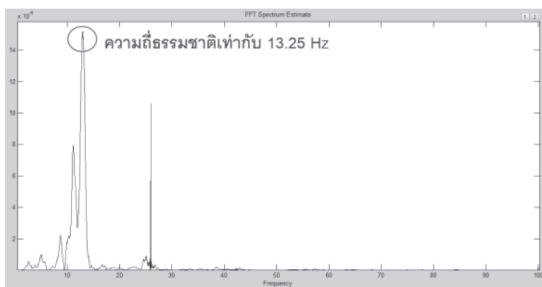
ตารางที่ 4 ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง กรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

อุปกรณ์ทดสอบ	ระยะโก่งตัว	หน่วย
LVDT1	-1.163	mm
LVDT2	-0.630	mm
LVDT3	-0.401	mm
LVDT4	-0.081	mm
ความถี่ธรรมชาติ	14.35	Hz

สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดการโก่งตัวของโครงสร้างของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงได้ติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวช่วงสะพานซึ่งอุปกรณ์ LVDT1, LVDT2, LVDT3 และ LVDT4 มีระยะห่างจากขอบทางเท้า1 เท่ากับ 3.50 m, 6.50 m, 7.50 m และ 10.50 m ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่งอุปกรณ์ LVDT1 และ LVDT4 นี้มีค่าโก่งตัวสูงสุดกรณีรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งชิดขอบทางเท้า จำนวน 2 คัน สำหรับอุปกรณ์ LVDT2 และ LVDT3 มีค่าโก่งตัวสูงสุดกรณีรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งกลางสะพาน จำนวน 2 คัน



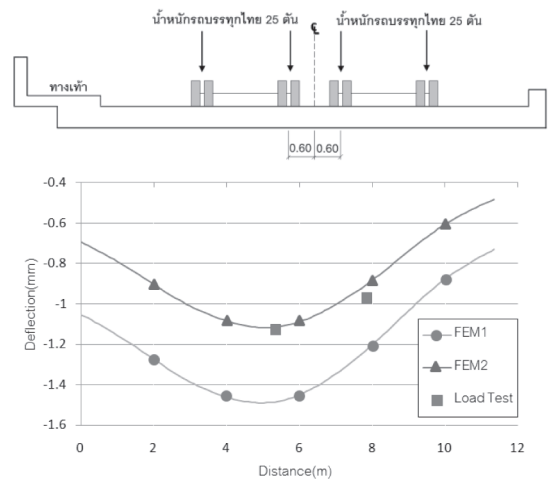
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาของสะพานแบบพื้น (Slab type)



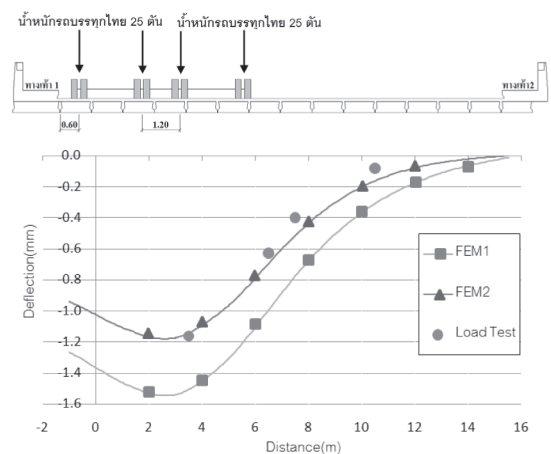
รูปที่ 8 การหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยวิธี FFT ของสะพานแบบพื้น (Slab type)

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุและมิติจากแบบแปลนของสะพานที่พิจารณานำมาปรับแก้ให้มีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของโครงสร้างสะพานมากที่สุดโดยการปรับให้จุดรองรับของพื้นสะพานเป็นแบบสปริง (Rotational spring) เพื่อให้โครงสร้างส่วนพื้นของแบบจำลองมีค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น [7] การปรับแก้แบบจำลองสะพานเพื่อให้ค่าความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับผลทดสอบแสดงดังตารางที่ 5 และ 6 โดยที่สะพานที่มีโครงสร้างแบบพื้นได้ปรับค่า

Rotational stiffness เท่ากับ 0.65×10^6 kg-m/rad มีความแตกต่างจากผลทดสอบสะพานร้อยละ 5.43 สำหรับสะพานที่มีโครงสร้างแบบคอนกรีตอัดแรงได้ปรับค่า Rotational stiffness เท่ากับ 1.80×10^6 kg-m/rad มีความแตกต่างจากผลทดสอบสะพานร้อยละ 0.69 การโก่งตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงค่าการโก่งตัวของโครงสร้างก่อนการปรับแก้แบบจำลอง (FEM1) และหลังจากการปรับแก้แบบจำลอง (FEM2) ของสะพานทั้งแบบพื้นและแบบคอนกรีตอัดแรง



(ก) ค่าการโก่งตัวของสะพานแบบพื้น



(ข) ค่าการโก่งตัวของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของสะพานตามทิศทางขวางการจราจร

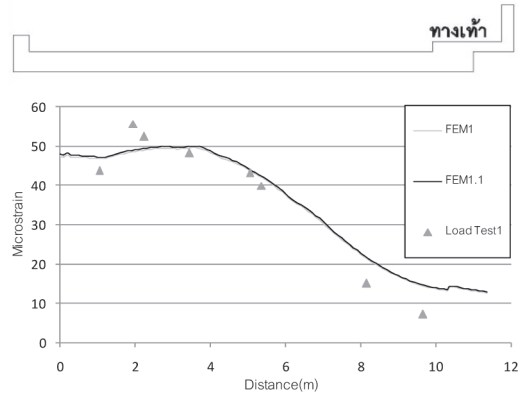
ตารางที่ 5 การปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบพื้น

การวิเคราะห์	ความถี่ธรรมชาติ	Rotational Stiffness	ความต่าง	หมายเหตุ
ผลทดสอบ	13.25	-	-	-
สะพาน	Hz	-	-	-
ไฟไนต์เอลิเมนต์	12.53	0.65×10^6	ร้อยละ 5.43	แบบจำลองปรับแก้
	Hz	kg-m/rad		

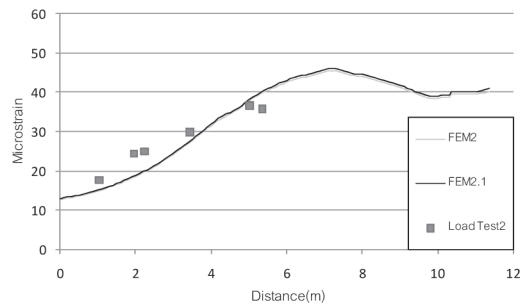
ตารางที่ 6 การปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

การวิเคราะห์	ความถี่ธรรมชาติ	Rotational Stiffness	ความต่าง	หมายเหตุ
ผลทดสอบ	14.35	-	-	-
สะพาน	Hz	-	-	-
ไฟไนต์เอลิเมนต์	14.45	1.80×10^6	ร้อยละ 0.69	แบบจำลองปรับแก้
	Hz	kg-m/rad		

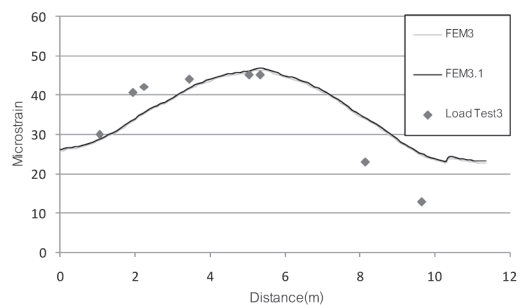
ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลังจากปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบสะพานแบบพื้น แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าค่าความเครียดจากผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยรวมมีความใกล้เคียงกัน แต่ข้อมูลความเครียดจากการทดสอบบางค่ามีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดอาจจะติดตรงตำแหน่งหน้าตัดคอนกรีตแตกร้าว (Crack section) สำหรับการเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง แสดงดังรูปที่ 11 พบว่าค่าความเครียดจากผลการทดสอบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยรวมมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน แต่ข้อมูลความเครียดจากการทดสอบบางข้อมูลมีค่าความเครียดที่ต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากการถ่ายแรงที่ไม่สมบูรณ์ของสลักรับแรงเฉือน



(ก) ค่าความเครียดของสะพานกรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดขอบกันตง

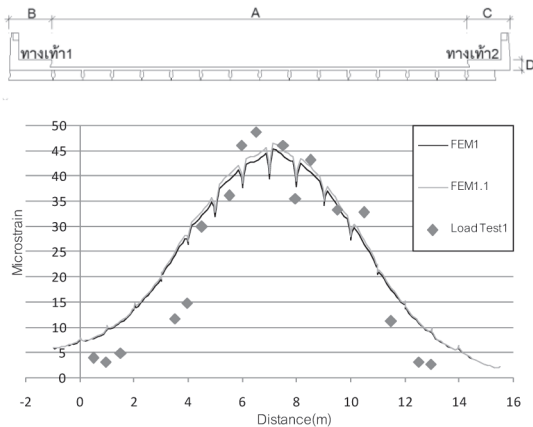


(ข) ค่าความเครียดของสะพานกรณีวางน้ำหนักบรรทุกชิดทางเท้า

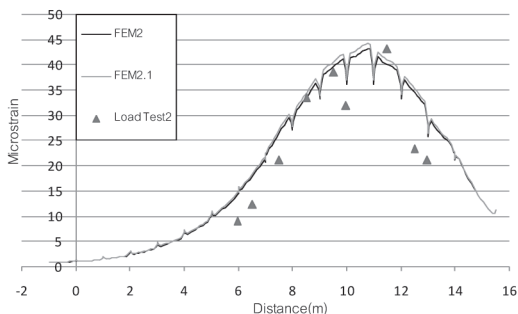


(ค) ค่าความเครียดของสะพานกรณีวางน้ำหนักบรรทุกกลางสะพาน

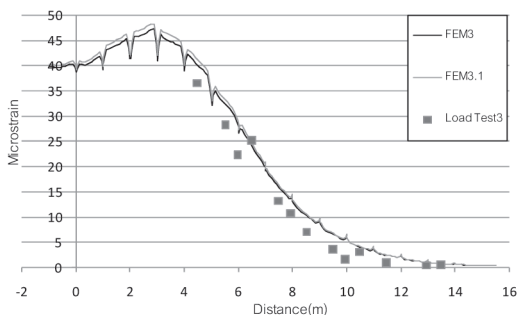
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบพื้นตามทิศทางขวางการจราจร



(ก) ค่าความเครียดของสะพานกรณีวางน้ำหนักบรรทุก
กึ่งกลางสะพาน



(ข) ค่าความเครียดของสะพานกรณีวางน้ำหนักบรรทุก
ชิดทางเท้า 2



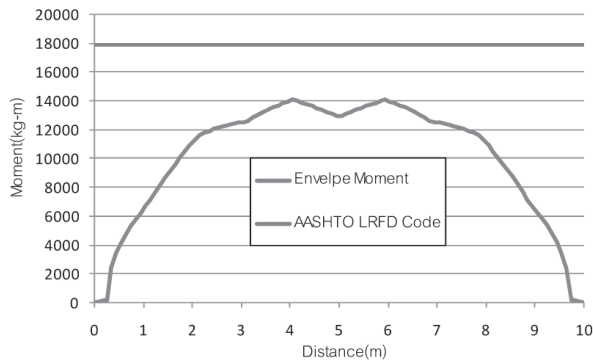
(ค) ค่าความเครียดของสะพานกรณีวางน้ำหนักบรรทุก
ชิดทางเท้า 1

รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของสะพานแบบ
คอนกรีตอัดแรงตามทิศทางขวางการจราจร

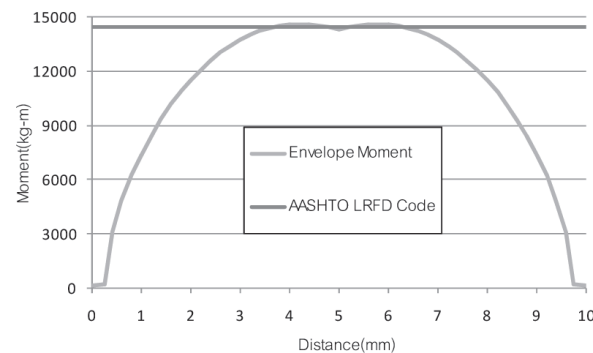
จากการปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ
สะพานที่เสริมกำลังโครงสร้างด้วย CFRP และมีผลที่ใกล้
เคียงกับผลการทดสอบแล้ว นำแบบจำลองที่พิจารณามา
วิเคราะห์หาค่าความเครียดจากแบบจำลองสะพานที่ไม่ได้มี
การเสริมกำลังด้วย CFRP นำผลการวิเคราะห์ความเครียด
ของแบบจำลองทั้งสองมาเปรียบเทียบหาสมรรถนะของ
โครงสร้างสะพานที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP สำหรับ
สะพานแบบพื้น แสดงดังรูป 10 สัญลักษณ์ในรูปมีดังนี้ FEM1
และ FEM1.1 คือ การวางน้ำหนักบรรทุกทุกชิดขอบกัน
ตกบนแบบจำลองที่มีการเสริมกำลังและไม่มีการเสริมกำลัง
ตามลำดับ Load test 1 คือค่าความเครียดจากการทดสอบ
น้ำหนักบรรทุกทุกตำแหน่งชิดขอบกันตก, FEM2 และ FEM 2.1
คือการวางน้ำหนักบรรทุกทุกชิดทางเท้าบนแบบจำลองที่มีการ
เสริมกำลังและไม่มีการเสริมกำลัง ตามลำดับ Load test 2
คือค่าความเครียดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกตำแหน่ง
ชิดทางเท้า, FEM3 และ FEM 3.1 คือการวางน้ำหนักบรรทุก
กึ่งกลางสะพานบนแบบจำลองที่มีการเสริมกำลังและไม่มีการ
เสริมกำลัง ตามลำดับ Load test 3 คือค่าความเครียดจาก
การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน, การ
พิจารณาความแตกต่างของค่าความเครียดจากแบบจำลอง
ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกค่าความเครียดที่มีความต่าง
กันที่มากที่สุด โดยที่ FEM3 มีค่าเท่ากับ 36.53 Microstrain
กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ FEM3.1 มีค่าเท่ากับ 38.38
Microstrain แสดงว่าสะพานแบบพื้นเสริมกำลังด้วย CFRP
จำนวน 2 Layers ที่พิจารณานั้นมีความเครียดลดลง ร้อยละ
4.82

สำหรับการตรวจสอบการกระจายน้ำหนักจากล้อรถ
บรรทุกที่ตำแหน่งต่างๆบนพื้นสะพาน ผลการวิเคราะห์ด้วย
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิธีหาค่า Moment
Envelope คือโมเมนต์ที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ณ ตำแหน่ง
ต่างๆของสะพานที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนตำแหน่งของน้ำหนัก
บรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO นำผลการวิเคราะห์เปรียบ
เทียบกับเทียบกับการคำนวณด้วยสมการของ AASHTO
สำหรับสะพานแบบพื้น แสดงดังภาพที่ 12 พบว่าการ
วิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกจากสมการ
AASHTO Code (Equivalent width, E) มีความปลอดภัย
กว่าการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับ
สะพานแบบพื้นคอนกรีตอัดแรง แสดงดังภาพที่ 13 พบว่า

การวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกโดยสมการ AASHTO (Distribution factor, DF) มีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 12 การกระจายโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 ของสะพานแบบพื้น



รูปที่ 13 การกระจายโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 ของสะพานแบบคอนกรีตอัดแรง

การประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกจากสมการ Rating factor (RF) หลังจากเสริมกำลังโครงสร้างสะพานด้วย CFRP พิจารณาจากค่าความเครียดของสะพานที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกหลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP และค่าความเครียดของสะพานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงการวิเคราะห์กำลังต้านทานของหน้าตัดพื้นสะพานที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP และจาก Condition rating (CR) โดยปรับแก้ให้ค่า CR มีค่าเท่ากับ 7 เนื่องจากสะพานได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วย CFRP ค่า Rating factor ที่ปรับแก้หลังจากการเสริมกำลังแสดงดังตารางที่ 7 พบว่าค่า Rating factor หลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าโครงสร้างสะพานมีความปลอดภัยสำหรับน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44

ตารางที่ 7 ค่า Moment Rating Factor ของสะพาน

ลักษณะสะพาน	ก่อนเสริมกำลัง		หลังเสริมกำลังด้วย CFRP	
	IN	OP	IN	OP
สะพานแบบพื้น	0.78	1.01	1.21	1.54
สะพานแบบคอนกรีตอัดแรง	0.89	1.16	1.46	1.89

5. สรุป

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมและการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างสะพานคอนกรีตที่เสริมกำลังภายนอกด้วยวัสดุเสริมเส้นใย CFRP ซึ่งประเมินจากการทดสอบ Diagnostic load test และการจำลองโครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า สะพานแบบพื้นเมื่อเสริมกำลังด้วย CFRP จำนวน 2 Layers มีความเครียดลดลงร้อยละ 4.82 และมีค่า Rating factor เพิ่มขึ้นจาก 0.78 เป็น 1.21 และสะพานแบบคอนกรีตอัดแรงเมื่อเสริมกำลังด้วย CFRP จำนวน 4 Layers มีความเครียดลดลงร้อยละ 4.70 และมีค่า Rating factor เพิ่มขึ้นจาก 0.89 เป็น 1.46 สำหรับค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพานที่มีค่าที่น้อย เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่ใช้มีน้ำหนักไม่มากพอที่จะทำให้โครงสร้างนั้นอยู่ในช่วงประลัย (Ultimate) จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของความเครียดสะพานที่เสริมกำลังด้วย CFRP อย่างชัดเจนแต่อย่างไรก็ตามสะพานที่พิจารณาทั้งสองสะพานนั้นมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก 1.3HS20-44 ได้อย่างปลอดภัย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้แต่งขอขอบคุณบริษัท IMMS สำหรับการรวบรวมข้อมูลการทดสอบสะพาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Seangatith S, Pichianchote N. Investigation on Precast Prestressed Concrete Slabs Strengthened with CFRP Plates Subjected to Transverse Loads. *KKU Engineering J.* 2006; 33: 525-539. (In Thai)
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials. 1st ed. *The Manual for Bridge Evaluation*. Washington DC;2008.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. *Bridge Design Specifications*. 4th ed. Washington DC; 2007.
- [4] American Concrete Institute . *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. 1st ed. Farmington Hills; 2008.
- [5] Sharpe GD. *Reflective Cracking of Shear Keys in Multi-Beam Bridges* [Master of Science Thesis]. Texas:Texas A&M University; 2007.
- [6] Zanardo G, Hao H, Xia Y, Andrew J. Stiffness Assessment through Modal Analysis of an RC Slab Bridge before and after Strengthening. *ASCE Journal of Bridge Engineering*. 2006; 11: 590-601.
- [7] Marcuzzi A, Morassi A. Dynamic Identification of a Concrete Bridge with Orthotropic Plate-Type Deck. *ASCE Journal of Structural Engineering*. 2010; 136: 586-602.