



ผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยต่อหน่วยแรงฉีกของสะพานชนิดคอมโพสิต

EFFECT OF FRP STRENGTHENING ON FATIGUE STRENGTH OF
COMPOSITE BRIDGE

ชาคริตห์ ไม้พันธ์ (Chachrit Maiphan)¹

สุชาติ อิมกัตญู (Suchart Limkatunyu)²

กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย (Kittisak Kuntiyawichai)³

¹นักศึกษาริทยูอาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี taam14@gmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ suchart.l@psu.ac.th

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี kittisak.ubu@gmail.com

บทคัดย่อ : สืบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและการเสื่อมสภาพของสะพานชนิดคอมโพสิต ทำให้ต้องมีการเพิ่มความสามารรถในการรับน้ำหนักให้แก่สะพานเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการรับหน่วยแรงฉีกของสะพาน ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ที่มีต่อหน่วยแรงฉีกที่เกิดขึ้นในสะพานชนิดคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนต์อิเลเมนต์โปรแกรม ABAQUS โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์และหน่วยแรงฉีกที่เกิดขึ้นในสะพานอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ที่แน่นอน ในการศึกษานี้จะพิจารณาวิธีการเสริมกำลัง 2 วิธี คือ วิธีการติดแผ่น FRP ที่บริเวณท้องคานเหล็ก และวิธีการแทนที่พื้นคอนกรีตด้วย FRP deck ให้แก่สะพานทั้งชนิดที่ไม่มีรอยแตกเริ่มต้น และชนิดที่มีรอยแตกเริ่มต้นขนาด 3 mm. และ 6 mm. ตามลำดับ ซึ่งผลของจำนวนของคานเหล็กของสะพานก็ได้พิจารณาในการศึกษานี้ ผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่เปลี่ยนพื้นสะพานไปเป็น FRP deck จะทำให้ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ (ค่าความเค้นและการแอ่นตัว) และค่าหน่วยแรงฉีกที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่งผลให้จำนวนรอบของความล้าที่สามารถรับได้มีค่าเพิ่มขึ้น

ABSTRACT : Due to the increasing of traffic load and deterioration of composite bridge, bridge strengthening is required in order to increase fatigue strength of the bridge. Therefore the main objective of this paper is to study the effect of FRP strengthening on fatigue strength of composite bridge using finite element program ABAQUS. In the analysis process, dynamic behavior and fatigue strength due to truck load based on AASHTO standard are investigated. Two types of FRP strengthening techniques, i.e. FRP patch and FRP deck are applied to both damaged and undamaged bridge. For the case of undamaged bridge, two crack sizes, i.e. 3 mm. and 6 mm. in depth, are assumed at the mid-span of the steel girder. Furthermore, effect of the number of steel girders on dynamic behavior and fatigue strength are also considered. The results show that by replacing the concrete deck with FRP composite deck, maximum stresses and deflection at steel girders reduce and consequently increase the fatigue life of the steel girders.

KEYWORDS : Composite bridge, Fatigue strength, Dynamic response, Fatigue life, Finite element

1. บทนำ

สืบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและการเสื่อมสภาพของสะพานชนิดคอมโพสิต ทำให้ต้องมีการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักให้แก่สะพานเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน ทำให้มีผู้ที่สนใจศึกษาพฤติกรรมของสะพานชนิดนี้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าได้มีการศึกษาจากตัวสะพานจริง การศึกษาจากแบบจำลองที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ หรือว่าจะเป็นการทดสอบโดยใช้น้ำหนักแบบคงที่หรือใช้น้ำหนักแบบเคลื่อนไหวในการพิจารณา ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

Alampalli และ Lund [1] ได้ทำการศึกษาสะพานเหล็กแบบโครงข้อหมุน ที่ทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นจากคอนกรีตเสริมเหล็กไปเป็น FRP deck โดยจะใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกจริงในการวิ่งผ่านสะพาน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสะพานนั้นจะมีการแอ่นตัวลดลงเมื่อทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นของสะพานเป็น FRP deck ต่อมา Chiewanichakorn และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของสะพานเหล็กแบบโครงข้อหมุนที่ได้มีการเปลี่ยนพื้นของสะพานไปเป็น FRP deck และพิจารณาความถี่ที่เกิดขึ้นในโครงข้อหมุนของสะพาน โดยจะนำค่าของความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในการหาอายุการใช้งานของสะพาน โดยใช้มาตรฐานของ AASHTO ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของสะพานที่มีพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วจะเห็นว่าสะพานเหล็กที่เปลี่ยนพื้นสะพานเป็น FRP deck นั้นจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า

ในการพิจารณาผลของความถี่ของสะพานเหล็กชนิด คอมโพสิตนั้น Tsiasat และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาความถี่และหาอายุการใช้งานของสะพานเหล็ก โดยใช้มาตรฐานในการเปรียบเทียบ 4 วิธี คือ AASHTO Guide Specifications, BAR7, The Lehigh method และ Fracture mechanics (LEFM) ซึ่งจะพิจารณาสะพานแบบเดี่ยวและพิจารณาจากความถี่ของสะพาน โดยผลที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO Guide Specifications และ Fracture mechanics (LEFM) นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากกว่าอีก 2 วิธีที่เหลือ นอกจากนี้ ซาคริตซ์ และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาสะพานเหล็กชนิดคอมโพสิต โดยพิจารณาความถี่และหาอายุการใช้งานของสะพานจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองจะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่พิจารณาผล

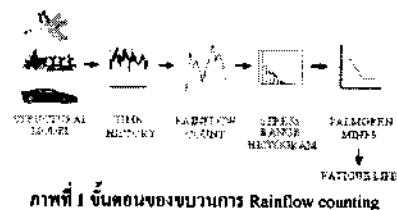
ของการเสริมกำลังด้วย FRP ต่อหน่วยแรงดัดในกรณีที่สะพานมีการชำรุด ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ที่มีต่อหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในสะพานชนิดคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์และหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในสะพานอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ที่เล่นผ่าน ในการศึกษาจะพิจารณาวิธีการเสริมกำลัง 2 วิธี คือวิธีการติดแผ่น FRP ที่บริเวณท้องคานเหล็ก และวิธีการแทนที่พื้นคอนกรีตด้วย FRP deck ให้แก่สะพานทั้งชนิดที่ไม่ชำรุด และชนิดที่ชำรุด (คือมีรอยแตกเริ่มต้นขนาด 3 mm. และ 6 mm. ตามลำดับ ที่บริเวณกึ่งกลางคานเหล็ก) โดยหลังจากวิเคราะห์แบบจำลองแล้วจะทำการประเมินพฤติกรรมทางพลศาสตร์และหน่วยแรงดัด และจำนวนรอบของความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี

2. มาตรฐาน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธี Rain flow counting

วิธีการนับนั้นได้มีจุดเริ่มต้นมาจากการศึกษาความเสียหายเนื่องจากความถี่ของโครงสร้างของยานอวกาศ และเครื่องบิน โดยวิธีการนับที่ใช้ในการนับช่วงของความเค้นที่นิยมใช้วิธีหนึ่งก็คือ วิธี Rainflow counting ซึ่งในขณะนั้นจะทำการนับจำนวนเต็มรอบ หรือครึ่งรอบ ของค่า Stress-time signals โดยต่อมาจะนำไปเป็นพื้นฐานในการนับค่า Stress-strain ของวัสดุ

โดยจะนับจำนวนรอบของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ความเค้นที่เกิดขึ้นจะสามารถเปลี่ยนไปเป็น stress range histogram [5] โดยมีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนของขบวนการ Rainflow counting

จากแบบจำลองของโครงสร้าง จะได้ผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปของกราฟความเค้น ความเครียด หรือการแอ่นตัว เทียบกับเวลา และนำข้อมูลมานับจำนวนของรอบ โดยจะได้กราฟของช่วงของความเค้น กับจำนวนรอบ ซึ่งข้อมูลของความถี่นั้นจะ

เรียกว่า Fatigue stress สามารถที่จะนำไปหาอายุการใช้งานของโครงสร้างได้

2.2 ความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Natural Frequency)

Biggs [6] ได้พัฒนาสมการเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย ซึ่งสามารถหาความถี่ธรรมชาติได้จากสมการที่ 1 และ 2

$$f = \lambda^2 f_{sb} \quad (1)$$

- เมื่อ $\lambda = 1$ for simple beam
 $\lambda = 1.25$ for pinned-clamped beam
 $\lambda = 1.5$ for clamped-clamped beam

$$f_{sb} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E_b I_b g}{w}} \quad (2)$$

- เมื่อ $L =$ span length
 $g =$ acceleration due to gravity
 $E_b I_b =$ flexural rigidity of the composite steel girder
 $w =$ weight per unit length of the composite steel girder.

โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสมการที่ 1 เป็นสมการที่ใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานเหล็กแบบ steel girder ชนิดที่มีจุดรองรับแบบง่ายที่มีความแม่นยำมาก [7]

2.3 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กตามมาตรฐาน AASHTO [8]

จากมาตรฐานของ AASHTO สามารถหาอายุการใช้งานได้จาก สมการที่ 3

$$y = \frac{A}{n(365)(ADTT)_{sl}(\Delta F)_n^3} \quad (3)$$

โดย

$$(\Delta F)_n \geq \frac{1}{2}(\Delta F)_{TH}$$

เมื่อ $A =$ ค่าคงที่ ในงานวิจัยนี้ใช้ 14.4×10^{11} MPa³ (ประเภทสะพาน C)

$n =$ Number of stress range cycles per truck passage

$(\Delta F)_n =$ Nominal Fatigue Resistance

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$N = n(365)(75)(ADTT)_{sl} \quad (5)$$

เมื่อ $(\Delta F)_{TH} =$ Constant-amplitude fatigue threshold ในงานวิจัยนี้ใช้ 69 MPa (ประเภทสะพาน C)

$(ADTT)_{sl} =$ Single-lane ADTT จาก AASHTO

$$(ADTT)_{sl} = p \times ADTT \quad (6)$$

เมื่อ $ADTT =$ Number of truck per day in a single-lane ในงานวิจัยนี้ใช้ 3,000 คัน/วัน/หนึ่งช่องทาง

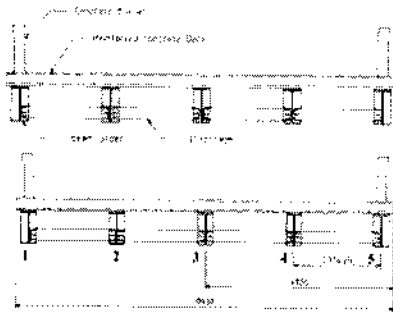
$p =$ Fraction of truck traffic in a single-lane ในงานวิจัยนี้ใช้ 1.0

3. ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

3.1 สะพานเหล็กชนิด steel girder และน้ำหนักรถบรรทุก

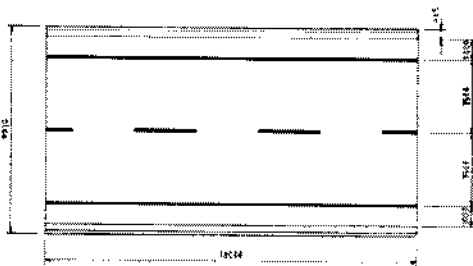
สะพานเหล็กชนิด steel girder ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสะพานเหล็กมีความยาวตลอดช่วงเท่ากับ 18.00 เมตร มีจุดรองรับเป็นจุดรองรับแบบง่าย (simply support) ที่ประกอบด้วยคานเหล็กปีกกว้าง (Wide flange) ประเภท 1200WB455 มาตรฐานออสเตรเลีย และมีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 25 เซนติเมตร เสริมเหล็กสองชั้น ใช้เหล็ก RB9@0.10 เมตร วางบนคานเหล็ก โดยที่คานเหล็กจะมี diaphragm ยึดติดด้านข้างทุกตัวที่ระยะห่างกันเท่ากับ 9.00 เมตร โดยมีคานกว้าง 0.30 เมตร หนา 3.2 เซนติเมตร [9] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาสะพานเหล็ก ที่มีจำนวนของคานเหล็กไม่เท่ากัน คือ 3 ตัว และ 5 ตัว โดยที่คานเหล็กแบบ 5 ตัว นั้นดังแสดงในภาพที่ 2 โดยระยะห่างกันของแต่ละคานดังรูป ส่วนสะพานที่มีคานเหล็กแบบ 3 ตัว นั้นจะมีแค่คานเหล็กตัวที่ 1 , 3 และ 5 เท่านั้น

สะพานเหล็กที่นำมาทำการวิเคราะห์นั้นเป็นสะพานเหล็กที่มีการแบ่งช่องจราจรออกเป็น 4 ช่องทาง คือ 2 ช่อง ทางเดินรถยนต์ และ 2 ช่องทางเดินรถขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3

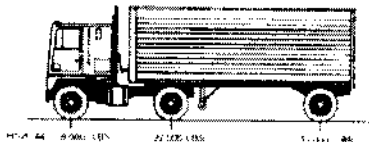


ภาพที่ 2 รูปตัดของสะพานเหล็ก (หน่วย มิลลิเมตร)

น้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมาจากมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO (HS-20) ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะมีแรงกระทำอยู่ 3 เหล่า โดยแต่ละเหล่าจะมีน้ำหนักแตกต่างกัน เริ่มจากเหล่าแรกที่ค้ำหน้ารถจะมีน้ำหนักเท่ากับ 8,000 ปอนด์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 35 kN เหล่าที่ 2 จะอยู่ห่างจากเหล่าแรก 4.3 เมตร โดยมีน้ำหนักของเหล่า 32,000 ปอนด์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 145 kN และเหล่าที่ 3 จะมีระยะห่างจากเหล่าที่ 2 เท่ากับ 9.0 เมตร โดยมีน้ำหนักเท่ากับเหล่าที่ 2 คือ 145 kN และระยะระหว่างล้อเท่ากับ 1.80 เมตร โดยมีจำนวนรถบรรทุกวิ่งต่อวินาทีต่อช่องทางเท่ากับ 3,000 คัน



ภาพที่ 3 ระยะการแบ่งเลน และความยาวของช่วงสะพาน



ภาพที่ 4 รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ; HS20

3.2 วัสดุไฟเบอร์เสริมเส้นใย (FRP; Fiber Reinforce Polymer)

ไฟเบอร์เสริมเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ ไฟเบอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นบาง (FRP Patch)

ความหนา 1.4 มิลลิเมตร ใช้ร่วมกับกาว (Cohesive) ความหนา 3 มิลลิเมตร และไฟเบอร์เสริมเส้นใยแบบรังผึ้ง (FRP deck)

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ และวัสดุเสริมพิเศษที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของสะพาน แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

Component	Properties	Value
คานเหล็ก	Density	7850 kg/m ³
	Modulus of elasticity	200 Gpa
	Poisson 's ratio	0.3
เหล็กเสริมพื้น	Density	7850 kg/m ³
	Modulus of elasticity	200 Gpa
	Poisson 's ratio	0.3
Diaphragm	Density	7850 kg/m ³
	Modulus of elasticity	200 Gpa
	Poisson 's ratio	0.3
พื้นคอนกรีต	Density	2400 kg/m ³
	Modulus of elasticity	28.6 Gpa
	Poisson 's ratio	0.2

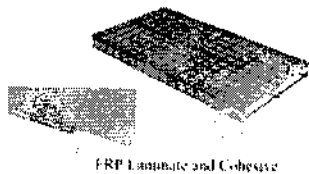
ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุเสริมพิเศษ

Component	Properties	Value
FRP	Density	1800 kg/m ³
Composite deck	Modulus of elasticity	19.3 GPa
	Poisson 's ratio	0.33
	Max. Tension stress	207 MPa
	Max. Comp. stress	207 MPa
FRP laminate	Density	1500 kg/m ³
	Modulus of elasticity	165 GPa
	Poisson 's ratio	0.30
	Max. Tension stress	2.80 GPa
G11 (Cohesive)	Density	1770 kg/m ³
	Modulus of elasticity	12.8 GPa
	Poisson 's ratio	-
	Max. Tension stress	33 MPa

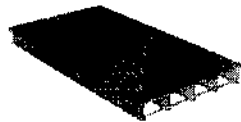
3.4 ลักษณะทั่วไปของแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองนั้นจะเลือกเป็นแบบ shell elements ชนิด S4R โดยกำหนดความหนาของแต่ละ element ให้มีขนาดเท่ากับความหนาในส่วนต่างๆ ของสะพานเหล็ก โดยที่

แบบจำลองของสะพานเหล็กที่ทำการสร้างนั้นจะมีจุดรองรับเป็นแบบง่าย (simply support) ในภาพที่ 5 แสดงแบบจำลองแบบมีคานเหล็ก 3 ตัว และในภาพที่ 6 จะเป็นสะพานเหล็กที่มีคานเหล็ก 5 ตัว



ภาพที่ 5 แบบจำลองสะพานเหล็กคานเหล็กมี 3 ตัว



ภาพที่ 6 แบบจำลองสะพานเหล็กคานเหล็กมี 5 ตัว

แบบจำลองของสะพานที่เสริมความแข็งแรงด้วย FRP laminate นั้นจะยึดอยู่ที่ด้านล่างของปีกปรับแรงดึง ซึ่งวัสดุทั้งสองจะเลือกใช้ element เป็น solid element ชนิด C3D8R สำหรับ FRP laminate และ ชนิด COH3D8 สำหรับกาว

แบบจำลองของสะพานที่เสริมความแข็งแรงด้วย FRP composite deck นั้นจะเปลี่ยนจากแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กไปเป็น FRP composite deck ซึ่งจะเลือกใช้ element เป็น shell element ชนิด S4R

4. ผลการศึกษา

4.1 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของสะพานจากแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นสามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 หรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

จำนวนคานเหล็ก	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน		
	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)	(%)	
	จากสมการที่ 2	จากแบบจำลอง	
3	7.894	7.794	1.27
5	9.398	9.324	0.79

จากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากโปรแกรม และจากการใช้สมการที่ 1 พบว่านั้นมีค่าแตกต่างกันเพียง 1.27% สำหรับสะพานเหล็กที่มีคานเหล็ก 3 ตัว และ 0.79% สำหรับสะพานเหล็กที่มีคานเหล็ก 5 ตัว แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความน่าเชื่อถือได้

4.2 ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานเหล็ก

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งหมดนั้นสามารถที่จะสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่า Nominal Fatigue Stress: $(\Delta F)_n$ และค่าจำนวนรอบที่เกิด Number of cycles (n)

รูปแบบสะพาน	จำนวนคานเหล็ก	$(\Delta F)_n$; MPa	Number of cycle (n)	Max Deflection (m)
ปกติ	3	38.5	0.5	-0.0150
	5	23.4	0.5	-0.0097
FRP laminate	3	33.4	0.5	-0.0134
	5	19.3	0.5	-0.0082
FRP deck	3	17.3	0.5	-0.0098
	5	13.6	0.5	-0.0077
ปกติ	3	93.0	3	-0.0171
Crack 3 mm.	5	58.5	2	-0.0107
FRP laminate	3	74.5	4	-0.0155
Crack 3 mm.	5	49.0	3	-0.0094
FRP deck	3	55.7	2	-0.0122
Crack 3 mm.	5	37.0	2	-0.0087
ปกติ	3	97.0	3	-0.0171
Crack 6 mm.	5	65.0	2	-0.0107
FRP laminate	3	96.5	4	-0.0155
Crack 6 mm.	5	51.5	3	-0.0094
FRP deck	3	62.0	2	-0.0122
Crack 6 mm.	5	41.2	2	-0.0087

จากตารางที่ 4 พบว่าการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างสะพานโดยการใส่ FRP deck กับสะพานที่ไม่ชำรุดจะสามารถลดขนาดของหน่วยแรงดึงและการแอ่นตัวประมาณร้อยละ 50 และ 20 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสะพานที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่เข้าเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการเสริมกำลังทั้ง 2 วิธี พบว่าการเสริมกำลังโดยการใส่ FRP deck จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก FRP deck จะมีน้ำหนักเบา ดังนั้นเมื่อนำไป

แผ่นที่แผ่นพื้นคอนกรีตจะทำให้หน้าหน้าบรรทุกทุกเนื่องจาก superstructure ลดลงไปด้วย

สำหรับกรณีสะพานที่มีการชำรุดเริ่มต้นนั้นจะพบว่าค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ชำรุดประมาณ 3 เท่า และค่าการแอ่นตัวจะมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 12 ซึ่งภายหลังที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP ไปแล้วพบว่า การเสริมด้วย FRP patch จะสามารถลดค่าหน่วยแรงดึงได้ประมาณร้อยละ 20 ในกรณีของรอยร้าวขนาด 3 mm. แต่สำหรับกรณีของรอยร้าวขนาด 6 mm. ไม่สามารถลดได้เลย ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของรอยร้าวมีขนาดใหญ่ทำให้พื้นที่ที่ทำหน้าที่รับแรงดึงของคานลดลง การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้จึงไม่ได้ช่วยอะไร ดังนั้นการที่จะเสริมกำลังในกรณีที่มีรอยร้าวขนาดเล็กจะต้องกระทำโดยการเปลี่ยนแผ่นพื้นไปเป็น FRP deck ทั้งนี้เพื่อลดน้ำหนักกระทำเนื่องจาก superstructure และทำให้สะพานสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น

4.3 การคำนวณหาจำนวนรอบความล้าที่รับได้ของสะพานเหล็ก

ในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กจากมาตรฐาน AASHTO และจากการพิจารณาจากการวิเคราะห์โดยละเอียด โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ABAQUS [10] นั้นจะมีค่าของตัวแปรตัวแปรที่ไม่เท่ากัน ได้แก่ ค่า Nominal Fatigue Resistance ; $(\Delta F)_n$, และค่า Number of stress range cycles per truck passage (n) ซึ่งในการคำนวณจากมาตรฐาน AASHTO นั้นจะกำหนดค่าทั้งหมดนี้มาให้ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามประเภทของสะพานเหล็กที่พิจารณา แต่ดำเนินการวิเคราะห์ห้อย่างละเอียด โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ABAQUS นั้น ค่า Nominal Fatigue Resistance ; $(\Delta F)_n$ และค่า Number of stress range cycles per truck passage (n) ที่ใช้แทนในสมการที่ 5 ทำให้ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 พบว่าจำนวนรอบความล้าที่สะพานจะรับได้นั้นจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณจำนวนรอบความล้าจะใช้ค่าหน่วยแรงดึงที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2 มาคำนวณ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุ โฟลิมเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ที่มีต่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในสะพานชนิดคอนกรีตโดยใช้ไฟในอิลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS ผลจากการเสริม

กำลังให้กับสะพานเหล็กโดยการใช้วัสดุโฟลิมเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าการใช้ FRP deck จะทำให้โครงสร้างของสะพานเกิดความเค้นและการแอ่นตัวลดลงสูงสุดประมาณร้อยละ 50 และทำให้จำนวนรอบความล้าที่สะพานรับได้เพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า เมื่อพิจารณาถึงจำนวนของคานเหล็กที่นำมาใช้ทำสะพาน ก็เป็นสิ่งที่สำคัญต่อการเกิดความเค้นในสะพาน ถ้าหากสะพานมีคานเหล็ก 5 ตัว ก็จะมีค่าความเค้นและการแอ่นตัวลดลงและจำนวนรอบความล้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสะพานที่มีคานเหล็กเพียงแค่ 3 ตัว

ตารางที่ 5 จำนวนรอบความล้าที่สะพานรับได้

รูปแบบสะพาน	ช่องจราจร	จำนวนคานเหล็ก	N (x10 ⁶ รอบ)
ปกติ	2 (ทิศตรงข้าม)	3	25.19
		5	112.24
FRP laminate	2 (ทิศตรงข้าม)	3	38.87
		5	200.39
FRP deck	2 (ทิศตรงข้าม)	3	278.13
		5	572.69
ปกติ	2 (ทิศตรงข้าม)	3	1.64
		Crack 3 mm.	5
FRP laminate	2 (ทิศตรงข้าม)	3	3.50
		Crack 3 mm.	5
FRP deck	2 (ทิศตรงข้าม)	3	8.32
		Crack 3 mm.	5
ปกติ	2 (ทิศตรงข้าม)	3	1.31
		Crack 6 mm.	5
FRP laminate	2 (ทิศตรงข้าม)	3	1.75
		Crack 6 mm.	5
FRP deck	2 (ทิศตรงข้าม)	3	5.91
		Crack 6 mm.	5

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย และ ผศ.ดร.ประสิทธิ์ นครราช ที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับ วิธี Rainflow counting ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Alampalli, S. and Lund, R. (2006). Estimating fatigue life of bridge components using measured strains. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 11(6): 725-736.

- [2] Chiewanichakorn, M., Aref, A.J. and Alampalli, S. (2007). Dynamic and fatigue response of a truss bridge with fiber reinforced polymer deck. *International Journal of Fatigue*. 29: 1475-1489.
- [3] Tsialis, G., McEwen, E., Shukla, A. and Palmquist, S. (2002). *Fatigue Strength of Deteriorated and Previously Stressed Steel Highway Bridges*. Research report, University of Rhode Island, USA.
- [4] ชวกริชณ์ ไม้พันธุ์, สุชาติ อัมภักตัญญู และกิตติศักดิ์ จันทิขวิชัย. 2551. การประเมินการตอบสนองทางพลศาสตร์และความต้านทานของสะพานเหล็กชนิด STEEL GIRDER. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอนเอน ปาล์ม บีช. อ. พัทยา จ.ชลบุรี
- [5] Aridulu, S. (2004). *Fatigue Life Calculation by Rainflow Cycle Counting Method*. M. Eng. Thesis, Middle East Technical University, Turkey.
- [6] Biggs, J.M. (1964). *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill Book Company, USA.
- [7] Barth, K.E. and Wu, H. (2007). Development of improved natural frequency equations for continuous span steel I-girder bridges. *Engineering Structures*. 29: 3432-3442
- [8] Barker, R.,M. and Puckett, J.E. (1997). *Design of Highway Bridges Based on AASHTO LRFD Bridge*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [9] Klein, L.E. (2006). *Finite Element Analysis of a Composite Bridge Deck*. B.Eng. Project, University of Southern Queensland, Australia.
- [10] HKS. (2002). *Abaqus User's Manual Version 6.5*. The HKS Plc. USA.