

## พฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลัง ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

### Fatigue Performance of Tensile Steel Members Strengthened with CFRP Plates

กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย\* ศรัณย์ ประมูลพงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Kittisak Kuntiyawichai\* Saran Pramoonphong

Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel : 0-4535-3339 E-mail: kittisak.ubu@gmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ขั้นตอนแรกเป็นการสอบเทียบความถูกต้องของหลังจากนั้นจึงทำการศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา 3 ตัวแปร คือ ช่วงของความเค้นกระทำ (stress range) ความหนาของแผ่น CFRP ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ที่มีความถูกต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ส่วนผลการศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP พบว่าเมื่อทำการเพิ่มช่วงของความเค้นกระทำจะทำให้ค่าสตีเฟนเนสของชิ้นส่วนนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด การเพิ่มความหนาของกาวอย่างเดียวยังจะเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของชิ้นกาว ทำให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP อย่างเดียวจะทำให้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นกาวกลายเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ทำให้อายุการใช้งานลดลง

**คำหลัก** ความล้า อายุการใช้งาน ไฟไนท์อีลิเมนต์

#### Abstract

This paper studies the fatigue behavior of tensile steel member strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) plates using finite element technique. Firstly, the model accuracy was tested in which the results were compared with the experimental results obtained from the literature. Secondly the effects of stress ranges, glue thickness and CFRP thickness on fatigue behavior of the tensile steel member strengthened with CFRP plates were investigated. The results show that the fatigue behavior of tensile steel member strengthened with CFRP plates obtained from FE model was in good agreement with analytical model. When increasing the stress range, the stiffness decrement of the member was noted. For the effect of the glue thickness on fatigue behavior of tensile steel member strengthened with CFRP plates, it was found that increasing in the glue thickness enhanced the shear ability of the glue layer. This also led to the increasing in fatigue life. Finally, increasing in the CFRP thickness reduced the fatigue life.

**Keywords:** Fatigue, fatigue life, finite element

## 1. บทนำ

ปัจจัยที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างเหล็กได้แก่ ความคงทนต่อการรับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ (cycle load) ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า สะพานเหล็กส่วนใหญ่ทั้งใน ยุโรป อเมริกา และ ญี่ปุ่น ต่างก็ประสบปัญหาการเสื่อมสภาพเช่นเดียวกันคือ ปัญหาการกัดกร่อน และ ปัญหาการรุดตอยของกำลัง เนื่องมาจากความล้า นอกจากนี้สะพานในทวีปยุโรปส่วนใหญ่จะมีอายุมากกว่า 100 ปี ซึ่งหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี ค.ศ. 1960-1975 ได้มีการสร้างสะพานขึ้นใหม่เพื่อรองรับต่อสภาพจราจรที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน การซ่อมบำรุงสะพานที่ยังมีสภาพการใช้งานได้ก็ทำได้ยากลำบากไปซึ่งจากการสำรวจพบว่าร้อยละ 50 ของสะพานทั้งหมดต้องการการซ่อมบำรุง [1]

ในปี ค.ศ. 2005 Federal Highway Administration ของอเมริกาได้ทำการตรวจประเมินสภาพสะพานเหล็กทั่วทั้งประเทศประมาณ 200,000 สะพาน พบว่าร้อยละ 40 ของสะพานทั้งหมดมีสภาพที่ต้องการการซ่อมแซม ซึ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของสะพาน ได้แก่ การชนเนื่องจากการเกิดอุบัติเหตุบนสะพาน น้ำหนักของรถที่กระทำแบบซ้ำๆ และสภาพแวดล้อม เป็นต้น [2] ดังนั้นสืบเนื่องจากสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันและสภาพการจราจรที่คับคั่ง การพิจารณาซ่อมแซมสะพานจึงเป็นทางเลือกแรกๆ ที่ผู้รับผิดชอบควรพิจารณาเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการสร้างใหม่มาก รวมทั้งไม่ต้องทำการรื้อสะพานเดิมและไม่กระทบต่อการจราจรอีกด้วย

วิธีการหนึ่งในการซ่อมโครงสร้างสะพานเหล็กได้แก่ การใช้วัสดุคอมโพสิต (ในที่นี้จะกล่าวถึงคาร์บอนไฟเบอร์) ไปติดบริเวณที่มีความเสียหาย โดยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์จะมีความสามารถในการเพิ่มอายุการใช้งาน (fatigue lifetime) ของโครงสร้างได้ [3-5] นอกจากนี้ถ้าทำการอัดแรงเข้าไปในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก่อนที่จะทำการติดเข้าไปในโครงสร้างก็จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการลดขนาดของรอยแตกในเหล็ก เพิ่มความแกร่งให้แก่ชิ้นส่วนเหล็กที่มีรอยแตก เป็นต้น [6-7] อย่างไรก็ตามถ้าสะพานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์แล้วถูกเปิดใช้งานไปนานๆ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก็อาจจะเริ่มมีการหลุดออกจากชิ้นส่วนของสะพานโดยเฉพาะในบริเวณที่มีความเข้มข้น

ของความเค้นสูงๆ (stress concentration zone) ซึ่งการหลุดล่อนออกของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก็อาจจะขยายตัวจนกระทั่งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นหลุดออกจากชิ้นส่วนโครงสร้างเลย [8-10] ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนของเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์จึงเป็นสิ่งที่จะต้องศึกษาในเบื้องต้นเพื่อหาวิธีหลีกเลี่ยงปัญหาของการหลุดล่อนดังกล่าว โดยวิธีการศึกษาโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธีคือ การทดลองในห้องปฏิบัติการ และการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการศึกษาส่วนใหญ่เน้นไปที่การทดลองซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายสูงทำให้การศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์จึงมีจุดเด่นขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่จะทำการศึกษานั้นควรจะต้องมีการสอบเทียบความถูกต้องก่อน

สืบเนื่องมาจากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้นบทความนี้จึงนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงดึงแล้วทำการประมาณค่าอายุการใช้งาน (fatigue lifetime) ของชิ้นส่วนดังกล่าว ซึ่งความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองจะตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

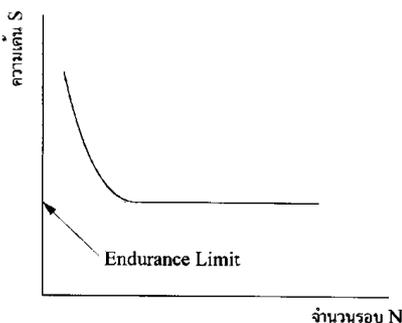
### 2.1 ความล้า (fatigue)

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่ากำลังประลัย (ultimate strength) มากกระทำกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้าขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้ เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนของโครงสร้างต่าง ๆ เพราะตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนของสะพาน ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นเข้มข้น (stress concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นซ้ำไปซ้ำมารอยแตกนี้จะโต

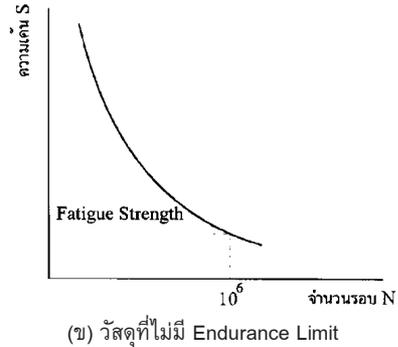
ขึ้นเรื่อย ๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่ากำลังประลัย วัสดุก็จะแตกหักจากกัน [11]

ความเค้นที่กระทำซ้ำไปซ้ำมา (โดยปกติจะใช้ที่ค่า  $10^6$ - $10^8$  รอบ) ความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้นๆ เรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้วไม่ว่าจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า ชีตจำกัดความทนทานกำลังความล้า (endurance limit) [11]

การทดสอบความล้ามีอยู่หลายวิธี แต่โดยหลักการจะเหมือนกันคือ จะให้แรงกระทำเป็นรอบกับชิ้นทดสอบ โดยให้เกิดความเค้นค่าต่าง ๆ แล้วบันทึกจำนวนรอบที่วัสดุจะทนได้ไว้จากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบที่กระทำ (S-N Curve) ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเกือบทั้งหมด และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด จะมี ชีตจำกัดความทนทานกำลังความล้า ดังรูป 1(ก) ส่วนพวกพอลิเมอร์และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กหลายชนิดจะไม่มี ชีตจำกัดความทนทานกำลังความล้า ดังรูป 1(ข) สำหรับโลหะที่มี ชีตจำกัดความทนทานกำลังความล้า ค่าชีตจำกัดความล้า จะมีความสัมพันธ์กับกำลังประลัย กล่าวคือ พวกเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปแล้ว จะมีค่าชีตจำกัดความทนทานกำลังความล้าที่ครึ่งหนึ่งของกำลังประลัย ส่วนโลหะผสมทองแดงจะอยู่ประมาณร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 50 ของกำลังประลัย สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องรับแรงสลับ ก็คงต้องคำนึงถึงเรื่องของความล้าด้วย และพยายามออกแบบให้รับความเค้นต่ำกว่าชีตจำกัดความทนทานกำลังความล้า หรือกำลังความล้า ตามแต่กรณี [11]



(ก) วัสดุที่มี Endurance Limit



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบที่กระทำ [11]

## 2.2 คุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)

วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ประกอบขึ้นจากเส้นใยที่ถูกจัดอย่างเป็นระเบียบในองค์ประกอบพอลิเมอร์ทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถรับแรงดึงในแนวของเส้นใยได้ดีตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยและมีความสามารถต้านทานต่อความล้าได้อย่างดีเยี่ยม ความหนาแน่นต่ำ เส้นใยเรียงตัวตามแนวยาวของแผ่นเพื่อรับความเค้นที่เกิดขึ้น [12] ดังนั้นแผ่นจึงมีโครงสร้างการเรียงตัวของเส้นใยไปในทิศทางทางเดียว ทำให้มีกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนทิศทางขวางการเรียงตัวเส้นใยต่ำ พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงตามแนวยาวขึ้นอยู่กับประเภทของเส้นใยและปริมาณความหนาแน่นของเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามวัสดุชนิดนี้จะไม่มีความสมบัติการครากข้อดีของวัสดุชนิดนี้คือมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง และมีอัตราส่วนระหว่างความแกร่งต่อน้ำหนักสูง สำหรับองค์ประกอบพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เชื่อมประสานเส้นใยมี 3 ชนิด ได้แก่ อีพ็อกซี (epoxy) ไวนิลเอสเทอร์ (vinylester) และฟีนอลิก (phenolic) ส่วนเส้นใยที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยแก้ว (glass fiber) และเส้นใยอะรามิด (aramid fiber) โดยคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของ CFRP, GFRP และ AFRP [12]

Unidirectional Advanced Composite Materials	Fiber Content (% by weight)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Longitudinal Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
Carbon Fiber/Polyester CFRP Laminate	65-75	1,600-1,900	120-250	1,200-2,250
Glass/Epoxy GFRP Laminate	50-80	1,600-2,000	20-55	400-1,800
Aramid/Epoxy AFRP Laminate	60-70	1,050-1,200	40-125	1,000-1,800

### 2.3 ทฤษฎีพฤติกรรมความล้าของแผ่นประกอบ CFRP และทฤษฎีในการทำนาย

สำหรับวิธีการคำนวณหาการกระจายของความเค้นในชั้นกาวนั้น ได้สมมติคุณสมบัติของวัสดุให้เป็นแบบยืดหยุ่น โดยค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณจะมี 2 รูปแบบ คือ ความเค้นเฉือน (shear stress) และความเค้นตั้งฉาก (normal stress) และในการประมาณนี้จะไม่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิ ผลของการให้แรงเริ่มต้นแก่แผ่น CFRP ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมาณค่าของความเค้นบริเวณชั้นกาวที่อยู่ระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น CFRP นั้นถูกนำเสนอโดย Stratford and Cadei [13] ซึ่งมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้

1) เหล็ก แผ่น CFRP และกาว มีคุณสมบัติเป็นแบบยืดหยุ่น

2) ระยะเวลาของแผ่นเหล็กยังคงเป็นระยะเวลาอยู่นั้นคือข้อสมมติฐานของ Euler-Ber-noulli

3) การกระจายความเค้นเฉือนนั้นจะสม่ำเสมอ นั่นคือชั้นกาวบางมาก

4) ไม่สนใจการเสีรูปร่างของแผ่น CFRP เนื่องจากแรงเฉือน

5) ไม่สนใจการเสีรูปร่างเนื่องจากการโก่งตัวของชั้นกาว และระหว่างกาวและแผ่น CFRP จะต้องไม่เกิดการเลื่อน

6) ในการพิสูจน์สมการของความเค้นเฉือนจะไม่สนใจความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP

สมการ (1) ใช้ในการหาค่าความเค้นซึ่งตัว "S" "F" และ "A" ที่ห้อยอยู่ข้างล่างนี้เป็นสัญลักษณ์ของชั้นส่วนของเหล็ก, แผ่น CFRP และส่วนที่ติดกาวตามลำดับ

ให้แรงในแนวแกนแก่แผ่น CFRP,  $N_F$  จะได้ [14]

$$N_F(x) = -\frac{F}{f_2 \cdot (EA)_S} \cdot (e^{-ix} - 1) \quad (1)$$

โดยที่  $\lambda = \sqrt{f_2 / f_1}$

เมื่อ  $N_F(x)$  คือ แรงในแนวแกนในแผ่น CFRP

$F$  คือ แรงที่กระทำต่อแผ่น CFRP

$f_1$  คือ  $\frac{t_A}{G_A b_A}$

$f_2$  คือ  $\frac{1}{(EA)_S} + \frac{2}{(EA)_F}$

$E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนเหล็ก

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัด

$t$  คือ ความหนา

$b$  คือ ความกว้าง

$G$  คือ ค่า shear modulus

จากสมการ (1) ค่าความเค้นตามแนวแกนของแผ่น CFRP,  $\sigma_F$  และ ความเค้นเฉือนของส่วนที่ติดกาว,  $\tau_A$  หาได้จาก [15]

$$\sigma_F = \frac{N_F}{A_F}$$

$$\tau_A = -\frac{1}{b_A} \frac{dN_F}{dx} = -\frac{1}{b_A} \frac{\lambda \cdot F}{f_2 \cdot (EA)_S} e^{-\lambda x} \quad (2)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าความเค้นตามแนวแกน

$\tau$  คือ ความเค้นเฉือน

ค่าความเค้นตั้งฉากในชั้นกาวจะหาได้จากการหาความแตกต่างของการแอนตัวในแนวตั้งตลอดหน้าตัดของรอยต่อและในส่วนนี้จะคำนึงถึงผลของการแอนตัวของชิ้นส่วนด้วย ซึ่งมีสมการดังนี้ [15]

$$\sigma_A =$$

$$\frac{1}{b_A} \left[ \frac{a_3 C_1 \lambda^2}{a_1 \lambda^4 + a_2} e^{-\lambda x} + 2\beta^2 e^{-\beta x} (C_3 \sin(\beta x) - C_4 \cos(\beta x)) \right] \quad (3)$$

โดย

$$a_1 = \frac{t_A}{E_A b_A}, \quad a_2 = \frac{1}{(EI)_F}, \quad a_3 = \frac{y_F}{(EI)_S},$$

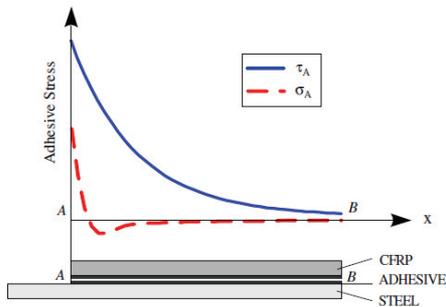
$$\beta^4 = \frac{a_2}{4a_1} \quad (4)$$

$$C_1 = -\frac{F}{f_2 E_s A_s}, \quad C_3 = -\frac{a_3}{a_2} \frac{F}{f_2 E_s A_s} - \frac{a_3 C_1}{a_1 \lambda^4 + a_2},$$

$$C_4 = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\lambda a_3 C_1}{a_2 + a_1 \lambda^4} + C_3 \quad (5)$$

เมื่อ  $C$  คือ แรงอัดลัพท์  
 $\beta$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ  
 $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยอันดับสอง

ลักษณะการกระจายของความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ในชั้นรอยเชื่อมของกาวเชื่อมประสานกับแผ่นเสริม CFRP จะมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉากตามแนว AB [15]

จากรูปที่ 2 ความเค้นเฉือน และความเค้นตั้งฉากสูงสุดจะเกิดที่ตำแหน่ง  $x = 0$  ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการ (6) [15]

$$\tau_A^{MAX} = -\frac{1}{b_A} \frac{\lambda \cdot F}{f_2 (EA)_S},$$

$$\sigma_A^{MAX} = \frac{1}{b_A} \left[ \frac{a_3 C_1 \lambda^2}{a_1 \lambda^4 + a_2} + 2\beta^2 C_4 \right] \quad (6)$$

## 2.4 ทฤษฎีการทำนายอายุความล้า (fatigue life prediction)

Caprino [16] ได้เสนอการทดสอบโดยการสร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่ากำลังที่ทำให้เกิดความล้าของแผ่น FRP ซึ่งหัวข้อทดสอบคือแรงดึงที่ก่อให้เกิดความล้า แต่ค่าที่ใช้ในที่นี้จะใช้สำหรับแผ่นประกอบ CFRP ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากสมการ (7)

$$f_n = \bar{f}_u - \alpha S_{\max} (1-R)(n^\beta - 1) \quad (7)$$

เมื่อ  $f_n$  คือ ค่ากำลังหลังจากให้แรงไป  $n$  รอบ (MPa)

$\bar{f}_u$  คือ ค่ากำลังของวัสดุตั้งต้น (กาว) (MPa)

$S_{\max}$  คือ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นรอบ (MPa)

$S_{\min}$  คือ ค่าความเค้นเฉือนต่ำสุดในระหว่างที่ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นรอบ (MPa)

$R$  คือ  $\frac{S_{\min}}{S_{\max}}$  (%)

$n$  คือ จำนวนรอบของรอบน้ำหนักบรรทุก

$\alpha, \beta$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกาว

ให้  $N_f$  เป็นอายุของความล้าของชิ้นส่วนทดสอบ ถ้า  $n = N_f$ ,  $f_n = S_{\max}$  ดังนั้น  $N_f$  จะหาได้จากสมการ (8)

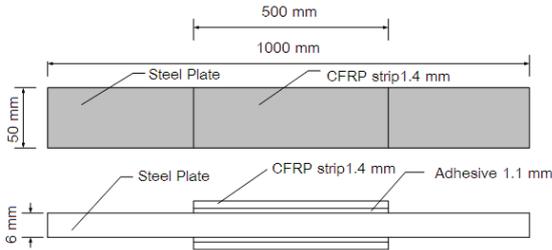
$$N_f = \left[ 1 + \frac{1}{\alpha(1-R)} \left( \frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

ในลำดับต่อมาหาค่า  $\alpha, \beta$  จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งข้อมูลพื้นฐานของการศึกษานี้คือค่า  $\alpha = 0.004$  และ  $\beta = 0.39$  ดังนั้นแบบจำลองหาค่าอายุของความล้าของแผ่น CFRP จะสามารถเห็นได้จากสมการ (9)

$$N_f = \left[ 1 + \frac{1}{0.004(1-R)} \left( \frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{0.39}} \quad (9)$$

### 3. ข้อมูลแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์

ข้อมูลของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในบทความนี้ได้จากบทความของ Bocciarelli *et al.* [15] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง

โดยคุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติและขนาดของวัสดุ

ลำดับ	วัสดุ	ขนาด	Young's modulus	Poisson's ratio	Tensile Strength
1.	แผ่นเหล็ก	หนา 6 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร	21 GPa	0.2	อย่าง น้อย 2800 MPa
2.	วัสดุเสริมแรง (CFRP)	หนา 1.4 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร	200 GPa	0.2	อย่าง น้อย 2800 MPa
3.	วัสดุเชื่อมประสาน (Thixotropic epoxy resin)	หนา 1.1 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร	12.84 GPa	0.3	อย่าง น้อย 30.2 MPa

ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [17] ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้คุณสมบัติของความสมมาตรในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเพียงครึ่งเดียวนั้น เพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ อนึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ และมีคุณสมบัติแบบไร้เชิงเส้นของกาวมาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นแบบจำลองในการศึกษานี้จะทำการศึกษาแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4

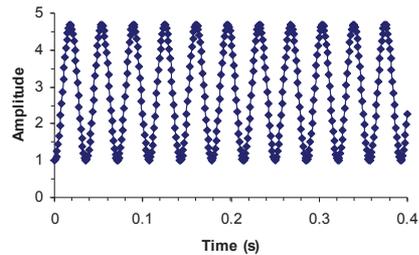
รูปที่ 4 แบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็ก

โดยชนิดของอิลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชนิดของอิลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็ก

Material	Description	Code	Additional information
Steel	Four-noded plain strain	CPE4R	Reduced integration
Adhesion	Four-noded cohesive element	COH2D4	-
FRP	Four-noded plain strain	CPE4R	Reduced integration

ในส่วนของแรงที่กระทำในแบบจำลองนั้นได้ใส่แรงลักษณะเดียวกันกับการทดลองของ Bocciarelli *et al.* [15] ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างของ Amplitude ที่ป้อนลงในโปรแกรม

โดยความถี่ของแรงกระทำแบบซ้ำๆนั้น คือ 14 Hz โดยช่วงความเค้นที่พิจารณามี 4 ช่วงความเค้นได้แก่ 83 100 120 และ 160 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า R มีค่าคงที่คือ 0.4 ทั้งนี้ค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นต่ำสุดของแต่ละช่วงความเค้นได้สรุปไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุดของแต่ละช่วงความเค้นที่ศึกษา

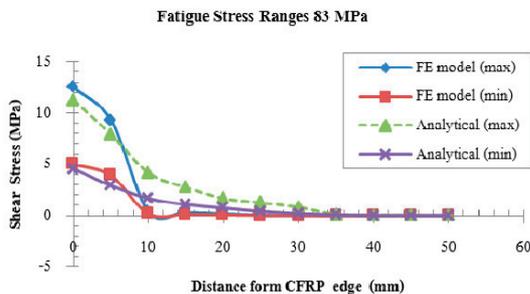
ชิ้นส่วนทดสอบ	แรงในแนวแกน (ต่ำสุด: สูงสุด [kN])	ความเค้นดึง (ต่ำสุด: สูงสุด) [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	อัตราส่วนความเค้นดึง
CE1	(17; 42)	(57; 140)	83	0.4
CE2	(20; 50)	(67; 167)	100	0.4
CE3	(24; 60)	(80; 200)	120	0.4
CE4	(32; 80)	(107; 267)	160	0.4

4. ผลการศึกษา

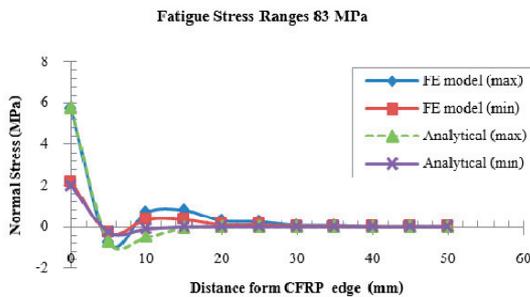
4.1 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.1.1 ลักษณะการกระจายของความเค้นบริเวณชั้นกาว

ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ภายใต้ความเค้นกระทำซ้ำๆ แล้วก็ทำการอ่านค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นกาวที่เชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น CFRP ซึ่งค่าความเค้นดังกล่าวจะเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ในหัวข้อต่อไป โดยค่าที่อ่านได้จากแบบจำลองจะถูกแสดงเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์โดย Bocciarelli *et al.* [15] ดังแสดงในรูปที่ 6 ถึง 9

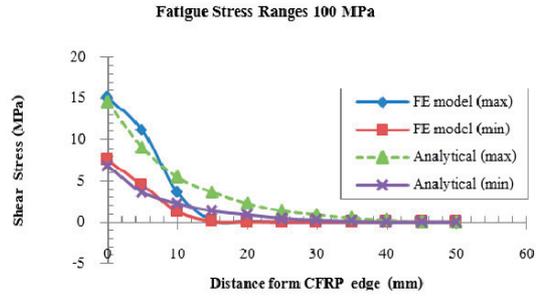


ก) ความเค้นเฉือน

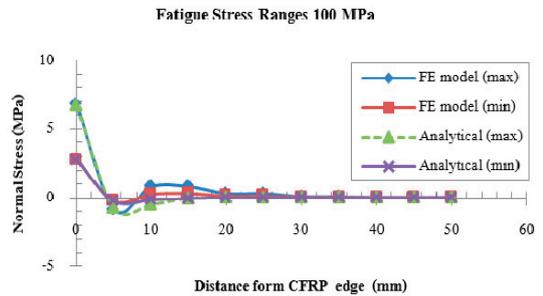


ข) ความเค้นตั้งฉาก

รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความเค้นบริเวณกาว (  $\Delta\sigma = 83$  MPa )

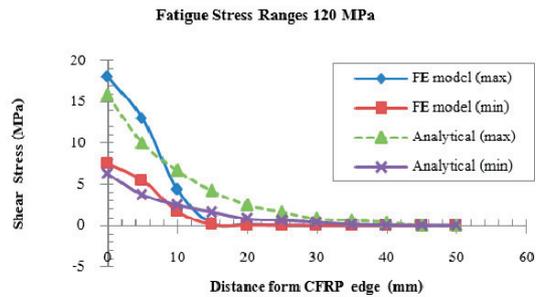


ก) ความเค้นเฉือน

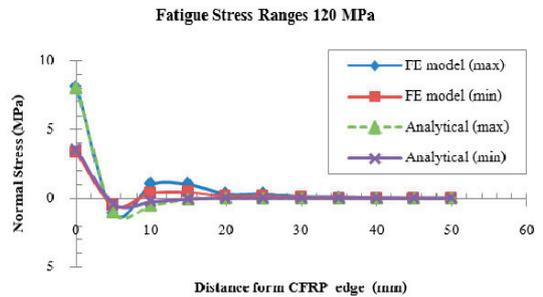


ข) ความเค้นตั้งฉาก

รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความเค้นบริเวณกาว (  $\Delta\sigma = 100$  MPa )

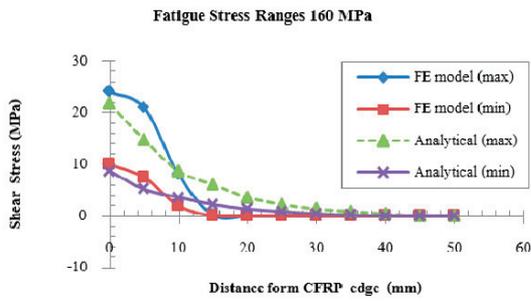


ก) ความเค้นเฉือน

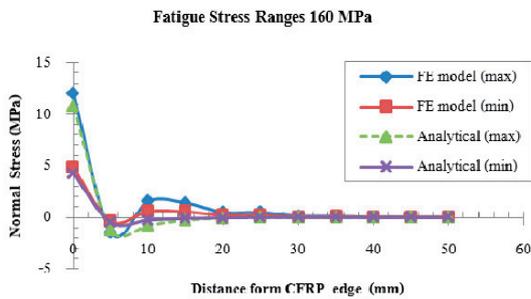


ข) ความเค้นตั้งฉาก

รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความเค้นบริเวณกาว (  $\Delta\sigma = 120$  MPa )



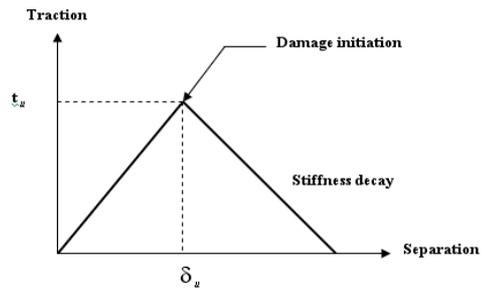
ก) ความเค้นเฉือน



ข) ความเค้นตั้งฉาก

รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าความเค้นบริเวณกาว ( $\Delta\sigma = 160$  MPa)

จากรูปที่ 6 ถึง 9 พบว่าค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์กับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งในกรณีของความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่า การหลุดล่อนของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนั้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามก็จะสังเกตเห็นลักษณะการลดลงของความเค้นที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงเร็วกว่าแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ในแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยึดหยุ่น แต่ในแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ได้จำลองพฤติกรรมของการยึดเกาะระหว่างผิววัสดุ (interface) ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยึดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้นอีลิเมนต์จะมีค่าความเสียหายภายในอีลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 Linear element traction separation behavior ของ cohesive element

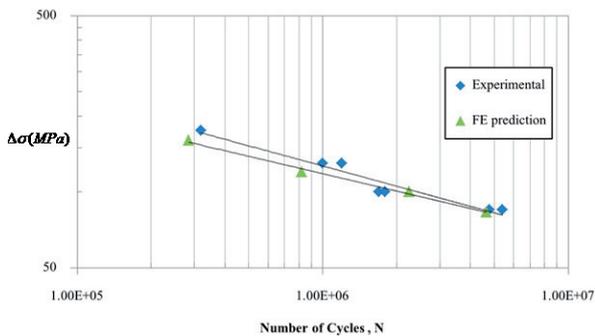
#### 4.1.2 การทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

สืบเนื่องจากการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ไปจนกระทั่งวัสดุชิ้นนั้นวิบัตินั้นเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากจะต้องเผชิญกับปัญหาของความไร้เชิงเส้นของวัสดุ รวมทั้งหน่วยความจำขนาดใหญ่สำหรับบันทึกข้อมูล และที่สำคัญอย่างยิ่งเวลาในการวิเคราะห์ซึ่งต้องใช้เวลามาก ผู้ศึกษาจึงได้นำเสนอวิธีการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในสมการที่ 9 มาใช้ในการคำนวณอายุการใช้งาน ซึ่งผลการคำนวณได้แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

$\Delta\sigma$ [MPa]	Fatigue life (cycles)		%Error
	Experiment	FE prediction	
83	4,800,000	4,642,896	3.27
100	1,800,000	1,953,872	8.55
120	1,000,000	822,355	17.76
160	320,000	285,277	10.87

จากข้อมูลในตารางที่ 5 สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experimental กับ FE prediction

จากข้อมูลในตารางที่ 5 พบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทำนายมีค่าสูงสุดร้อยละ 17.76 นอกจากนี้ถ้าหากพิจารณาจากรูปที่ 11 แล้วยังพบว่าวิธีการทำนายที่นำเสนอในบทความนี้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยในการประเมินพฤติกรรมความล้าของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มช่วงของความเค้นจาก 83 100 120 และ 160 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความเสถียร ของชิ้นส่วนนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด (ดูได้จากจำนวนรอบที่ลดลงอย่างมาก) ซึ่งการลดลงนี้เป็นผลมาจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP จากบริเวณปลายของแผ่น CFRP ซึ่งจุดนี้เองถือเป็นจุดอ่อนของการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างเหล็กด้วย CFRP

**4.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

ภายหลังที่ได้ทำเปรียบเทียบค่าความเค้นบริเวณกาว และใช้ค่าความเค้นที่ใช้ในการประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ในหัวข้อที่ 4.1 นั้น ขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของความเค้นบริเวณกาว และอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ซึ่งในบทความนี้จะศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ความหนาของชั้นกาว และความหนาของแผ่น CFRP โดยกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6 ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบจะต้องทำการศึกษาใน 4 ช่วงความเค้นคือ 83 100 120 และ 160 MPa ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์จำนวน 36 แบบจำลอง โดยการให้สัญลักษณ์ CT1.2/GT1.0 แทนกรณีศึกษาที่ความหนาของแผ่น CFRP 1.2 mm และความหนากาว 1.0 mm เป็นต้น

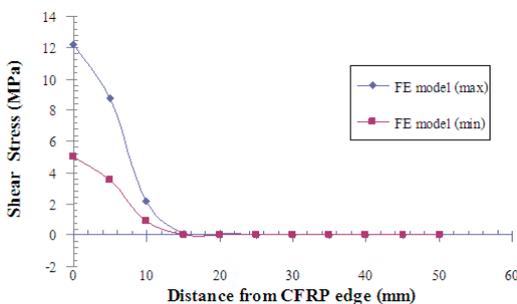
ตารางที่ 6 กรณีศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

CFRP Thickness (mm)	Glue Thickness (mm)
1.2	1.0
	1.1
	1.2
1.4	1.0
	1.1
	1.2
1.6	1.0
	1.1
	1.2

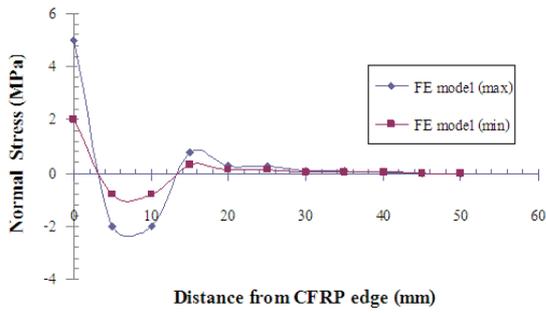
**4.2.1 ผลของความหนาของชั้นกาวต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

- การกระจายของความเค้น

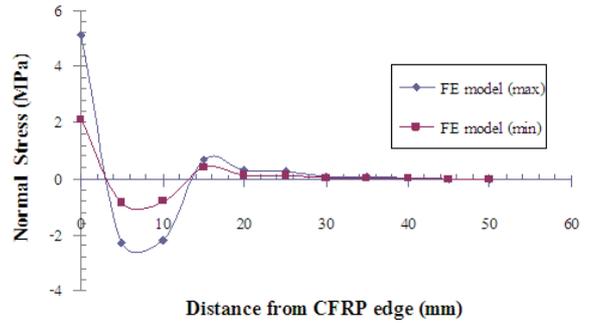
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของความเค้นบริเวณกาวของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่มีความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนากาวเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0 CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2) ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa ดังรูปที่ 12



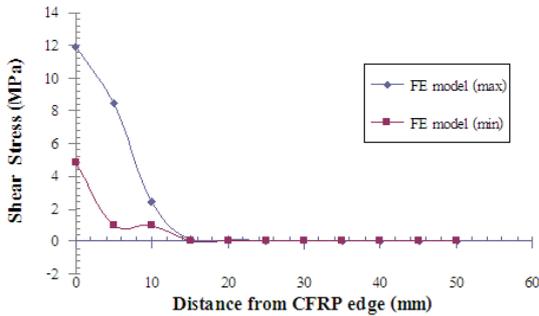
ก) แบบจำลอง CT1.2/GT1.0



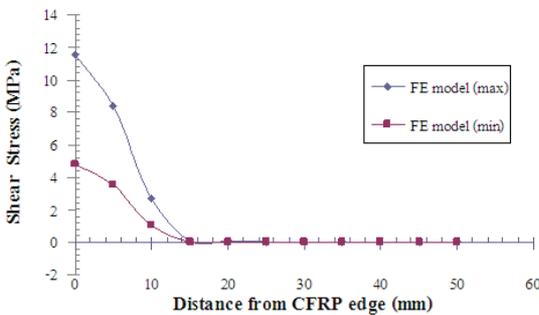
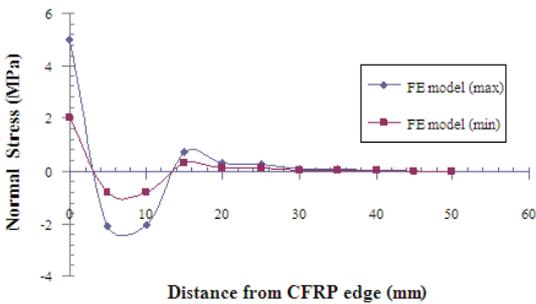
ก) แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 (ต่อ)



ค) แบบจำลอง CT1.2/GT1.2



ข) แบบจำลอง CT1.2/GT1.1



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือน และ ความเค้นดัดงอ ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ( $\Delta\sigma = 83 \text{ MPa}$ )

จากรูปที่ 12 พบว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่บริเวณกาวจะมีค่ามากที่สุดบริเวณปลายของแผ่น CFRP และค่อยลดลงเมื่อเลื่อนเข้าไปด้านในของแผ่น CFRP โดยถ้าหากมีการเพิ่มความหนาเป็น 1.1 mm และ 1.2 mm (รูปที่ 12(ข) และ 12(ค)) จะพบว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะลดลงจาก 12.2 MPa เป็น 11.9 MPa และ 11.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่าความเค้นเฉือนนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของกาวซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือน ส่วนค่าความเค้นเฉือนต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มลดลงตามความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่าความเค้นดัดงอที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่าความเค้นดัดงอนั้นจะไม่ได้ขึ้นกับการเปลี่ยนความหนาของกาว อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือค่าความเค้นเฉือน ดังนั้นการที่ค่าความเค้นเฉือนลดลงจะมีผลดีคือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ยาวนานขึ้น ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

● อายุการใช้งาน

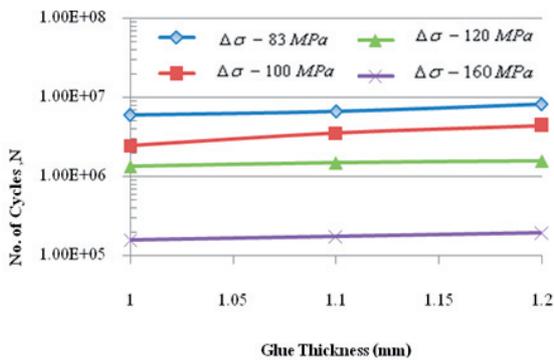
จากค่าความเค้นเฉือนที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้โดยการใช้สมการ (9) ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนาของกาวเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 CT1.2/GT1.1 และ

CT1.2/GT1.2) ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2 ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa

CFRP Thickness (mm)	Glue Thickness (mm)	Fatigue life (cycles)	% Increase
1.2	1.0	6052972	-
	1.1	6612790	9.24
	1.2	8072866	33.37

จากตารางที่ 7 จะพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นกาวจาก 1.0 mm ไปเป็น 1.2 mm สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ร้อยละ 33 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นกาวลดลงส่งผลให้การวิบัติซึ่งปกติจะเริ่มจากชั้นกาวนั้นเกิดช้าลง อายุการใช้งานจึงเพิ่มขึ้น ในส่วนของกรณีศึกษาอื่นๆสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 13



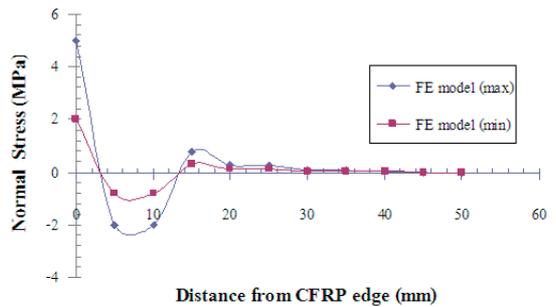
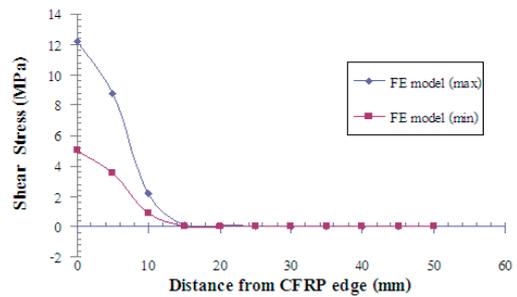
รูปที่ 13 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งาน เมื่อมีการเพิ่มช่วงของความเค้น (ความหนา CFRP คงที่=1.2 mm)

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงของความเค้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้

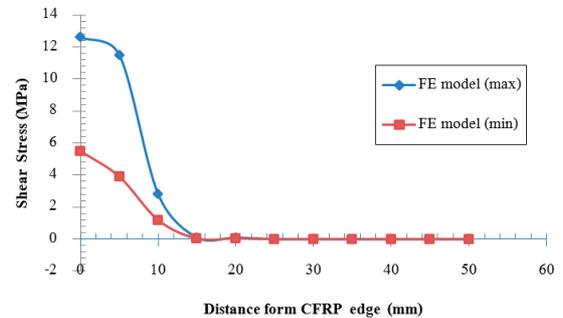
4.2.2 ผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

● การกระจายของความเค้น

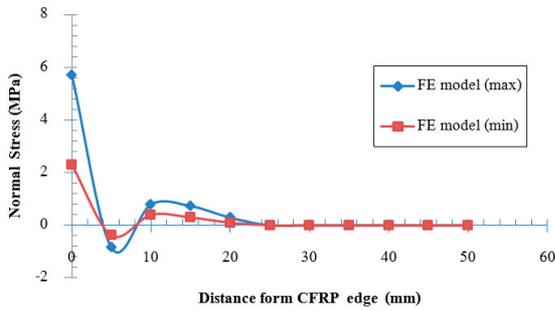
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของความเค้นบริเวณกาวของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่มีความหนาของกาวคงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2, 1.4 และ 1.6 mm (แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa ดังรูปที่ 14



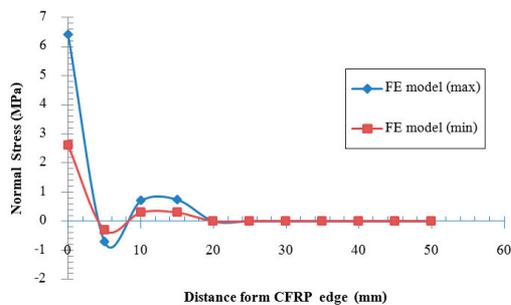
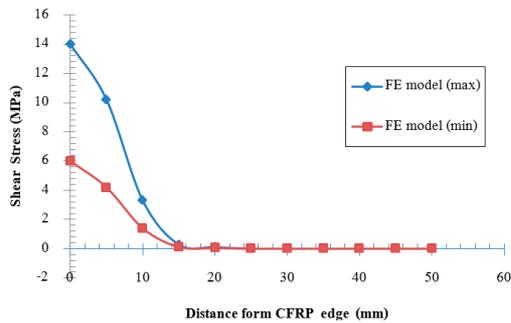
ก) แบบจำลอง CT1.2/GT1.0



ข) แบบจำลอง CT1.4/GT1.0



ข) แบบจำลอง CT1.4/GT1.0 (ต่อ)



ค) แบบจำลอง CT1.6/GT1.0

รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนและความเค้นตั้งฉาก ในกรณีที่มีความหนาของกาวคงที่ แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP ( $\Delta\sigma = 83$  MPa)

จากรูปที่ 14 พบว่าค่าความเค้นเฉือน สูงสุดที่บริเวณกาวจะมีค่ามากที่สุดบริเวณของแผ่น CFRP และค่อยลดลงเมื่อเลื่อนเข้าไปในตัวชิ้นส่วน เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.4 mm และ 1.6 mm (รูปที่ 14(ข) และ 14(ค)) จะพบว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้นจากจาก 12.2 MPa เป็น 13.3 MPa และ 14 MPa ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือนนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง แต่

อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชั้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปให้แผ่น CFRP นั้นเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่จุดนี้เองทำให้กาวเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ส่วนค่าความเค้นเฉือนต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่น CFRP ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่าความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่าความเค้นตั้งฉากนั้นจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความเค้นเฉือน อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือ ค่าความเค้นเฉือน ดังนั้นการที่ค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลเสียคือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง

#### ● อายุการใช้งาน

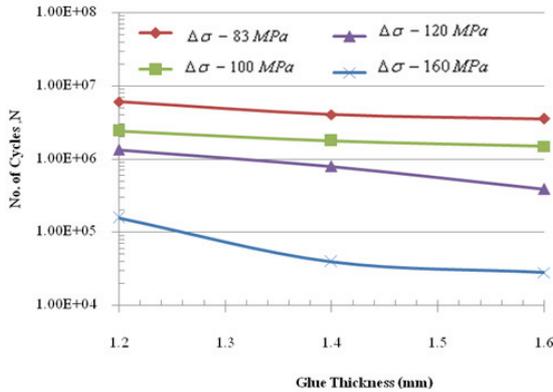
จากค่าความเค้นเฉือนที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมามาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้โดยการใช้สมการ (9) ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่มีความหนาของกาวคงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2 1.4 และ 1.6 mm (แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0 ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa

Glue Thickness (mm)	CFRP Thickness (mm)	Fatigue life (cycles)	% Decrease
1.0	1.2	6052972	-
	1.4	4071221	32.74
	1.6	3540645	41.51

จากตารางที่ 8 จะพบว่า การเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จาก 1.2 mm ไปเป็น 1.6 mm โดยที่ความหนาของกาวคงที่นั้น จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลงสูงสุดร้อยละ 41.51 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP โดยคงความหนาของชั้นกาวไว้นั้น จะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นกาวสูงขึ้นส่งผลให้การวิบัติซึ่งปกติจะเริ่มจากชั้น

กาวนั้นเกิดเร็วขึ้น อายุการใช้งานจึงลดลง ในส่วนของกรณีศึกษาอื่น ๆ สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของความเค้น (ความหนาของกาว = 1.0 mm)

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าลดลงในทุกช่วงของความเค้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวนั้น จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง

## 5. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ พบว่าค่าความเค้นเฉือนและความเค้นดัดฉากของชิ้นกาวจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่า การหลุดล่อนของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนี้นั่นเอง นอกจากนี้ลักษณะการลดลงของความเค้นที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ในแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยึดหยุ่น แต่ในแบบจำลองได้จำลองพฤติกรรมของ interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยึดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้น อิลิเมนต์จะมีความเสียหายสะสมในอิลิเมนต์ ทำให้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นดัดฉากลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับการ

ประเมินพฤติกรรมความล้าของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นพบว่าสามารถประมาณค่าอายุการใช้งานได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 3.3 ถึง 17.8

สำหรับผลการศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP พบว่าการเพิ่มความหนาของกาว (ความหนาของแผ่น CFRP คงที่) ก็จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของชิ้นกาว ในส่วนของอายุการใช้งานพบว่าการเพิ่มความหนาของชิ้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชิ้นกาวจะช่วยลดค่าความเค้นเฉือน ที่เกิดขึ้นในชิ้นกาว อันจะส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

ในส่วนผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP พบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้ค่าความเค้นเฉือน สูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชิ้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปให้แผ่น CFRP นั้นเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ จุดนี้เองทำให้ชิ้นกาวกลายเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ในส่วนของอายุการใช้งานพบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ลดลง อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือน

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (สัญญาเลขที่ RMU5080073) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Radomski W. 2002. Bridge rehabilitation. London: Imperial College Press.

- [2] Intelligent sensing for innovative structures (ISIS) Canada research network. Solution-oriented research. Annual report 2000/01.
- [3] Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R. and Hastings, J.N. 2001. Strengthening of steel bridge girder using CFRP plates. *J Bridge Eng.* 6(6):514-22.
- [4] Tavakkolidazeh, M. and Saadatmanesh, H. 2003. Fatigue strength of steel bridge girders Strengthening with carbon fiber reinforced polymer patch. *J Struct Eng.*129(2):186-96.
- [5] Bassetti, A., Nussbaumer, A. and Hirt, M.A. 2000. Crack repair and Fatigue life extension of riveted bridge members using composite materials. In: Bridge engineering conference 2000 past achievements current practices future technologies. Sharm El-Sheikh (Egypt).
- [6] Colombi, P., Bassetti, A., and Nussbaumer, A. 2003. Crack growth induced delamination on steel members reinforced by prestressed composite patch. *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* 26(5):429-37.
- [7] Moy, S.S.J. 2002. Early age curing under cyclic loading an investigation into stiffness development in carbon fibre reinforced steel beams. In: Advances polymer composites for structural application in construction. Proceedings of the first international conference (ACIC). Southampton. UK. Apr. 15-17, 2002. P. 187-94.
- [8] Moy, S.S.J. and Nikoukar, F. 2002. Flexural behavior of steel beams reinforced with carbon fibre reinforced polymer composites. In: Advances polymer composites for structural application in construction. Proceedings of the first international conference (ACIC). Southampton, UK, Apr. 15-17, 2002. P. 195-202.
- [9] Zhang, L., Hollaway, L.C., Teng, J.G. and Zhang, S.S. 2006. Strengthening of steel bridges under low frequency vibrations. In: Proceedings of composites in civil engineering (CICE). Miami, FL, Dec. 13-15, 2006. P. 643-8.
- [10] Jones, S.C. and Civjan, S.A. 2003. Application of fibre reinforced polymer overlays to extend steel fatigue life. *J Compos Construct.* 7(4):331-8
- [11]ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา. 2521. วัสดุในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด
- [12] Head, P.R.. 1996. Advanced Composites in Civil Engineering- a Critical Overview at the High Interest, Low Usage Stage of Development., Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Composite Material in Bridges and Structures, pp. 3-15, Canadian Society of Civil Engineering, Montreal, Canada.
- [13] Cadei, J.M.C., Stratford, T.J., Hollaway, L.C. and Duckett, W.G. 2004. Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers—C595. London: CIRIA.
- [14] Colombi, P. 2005. Plasticity induced fatigue crack growth retardation model for steel elements reinforced by composite patch. *Theor Appl Fract Mech.* 43:63–76.
- [15] Bocciarelli, M., Colombi, P., Fava, G. and Poggi, C. 2009. Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates. *Composite Structures.* 87: 334–343.
- [16] Caprino, G. 2000. Predicting Fatigue Life of Composite Laminates Subjected to Tension-Tension Fatigue, *J. Composite Materials,* 34:1335-1355.
- [17] Hibbitt, Karlsson and Sorensen. 2000. ABAQUS/Standard user's manual version 6.5-1, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.