ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
245885

RMU5080073 ผศ.ดร. กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย

24 มิถุนายน 2553

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
245885

D00251

สัญญาเลขที่ RMU5080073

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ผศ. ดร.กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ สกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้ ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ในช่วงเวลาที่ทำงานวิจัยนี้ทางสำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ยังสร้างโอกาสและเปิดช่องทางในการแลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างผู้วิจัยและเมธีวิจัยอาวุโส ผู้วิจัยอื่น ๆ ที่อยู่ในสายงานวิจัยเดียวกันหรือใกล้เคียง และผู้วิจัยที่อยู่ในสายงานอื่น

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในงานวิจัย รวมทั้ง ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล ที่คอยให้คำปรึกษาในประเด็นสำคัญในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่อำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RMU 5080073

ชื่อโครงการ:การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ชื่อนักวิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ ขันดิยวิชัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ระยะเวลาดำเนินงาน 3 ปี

245885

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer CFRP) ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานเหล็กแบบคอมโพสิต โดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนท์โปรแกรม ABAQUS โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยจะพิจารณาลักษณะการกระจายของหน่วยแรง ความล้าของชิ้นส่วน และตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้แก่ ช่วงของหน่วยแรงกระทำ (Stress range) ความหนากาว และความหนาของแผ่น CFRP ส่วนการศึกษาพฤติกรรมของสะพานเหล็กแบบคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นจะเริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP หลังจากนั้นจะนำค่าหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นไปทำวิเคราะห์หาช่วงของหน่วยแรง (Stress range) ที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ซึ่งช่วงของหน่วยแรงที่ได้จะสามารถนำไปใช้คำนวณหาการตอบสนองของความล้า (Fatigue cycle) ของโครงสร้างได้ ในส่วนการศึกษาพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้น จะพิจารณากรณีสะพานมีรอยร้าวชนิดความลึกเท่ากันตลอดความกว้างคาน (Through thickness crack) 2 ขนาด คือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่ปีกล่างบริเวณกึ่งกลางของคานรูปตัวไอ (I-shape) ของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งกระบวนการศึกษาก็จะทำเช่นเดียวกับสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้นทุกประการ นอกจากนี้ตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพานเช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัวไอ และรูปแบบการเสริมกำลัง ผลการศึกษาพบว่าค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุดจะเกิดขึ้นในกรณีที่รถแล่น 2 ช่องจราจร (ทั้งทางเดียวกันและสวนกัน) และถ้าทำการเสริมกำลังให้แก่สะพานคอมโพสิตด้วย CFRP แล้วจะพบว่าค่าหน่วยแรงและการแอ่นตัวของสะพานจะลดลง ทำให้ค่าอายุความล้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าหากสะพานมีรอยร้าวเริ่มต้นบริเวณคานรูปตัวไอ แล้วพบว่าค่าอายุความล้าจะลดลงอย่างมาก ซึ่งถ้าทำการเสริมกำลังด้วย CFRP แล้วพบว่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างสะพานคอมโพสิตได้แต่ยังไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นในกรณีที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้นที่คานเหล็ก ก่อนที่จะทำการปรับปรุงกำลังของสะพาน ต้องทำการเชื่อมติดรอยร้าวให้เรียบร้อยก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย CFRP ให้ใช้งานได้อย่างเต็มกำลัง

คำหลัก: คานเหล็ก สะพานเหล็ก ความล้า วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย

ABSTRACT

Project Code: RMU 5080073

Project Title: Fatigue Life Assessment of Steel Bridge Strengthened with Externally Boned FRP Plates

Investigator: Assistant Professor Kittisak Kuntiyawichai

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Ubonratchathani University

Project Period: 3 Years

245885

The main objective of this report is to study the effects of CFRP strengthening on dynamic and fatigue responses of composite bridges using finite element program ABAQUS. Firstly, fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates is investigated. Two parameters were considered in this comparison, i.e. stress distribution and fatigue life. The final step was to investigate in the effect of stress ranges, glue thickness and CFRP thickness on fatigue behavior of tensile steel member strengthened with CFRP plates. Secondly, fatigue life assessment of steel bridge strengthened with externally boned CFRP plates is then studied. In the analysis process, dynamic and fatigue responses of composite bridges due to truck load based on AASHTO standard are investigated. Two types of CFRP strengthening techniques, i.e. CFRP Laminate and CFRP composite deck are applied to both the damaged and undamaged bridges. For the case of the damaged bridge, two through-thickness crack sizes, i.e. 3 mm. and 6 mm. in depth, are assumed at the mid-span of the steel girders. Furthermore, effect of the number of steel girders on dynamic and fatigue response are also considered. The results show that the maximum responses of composite bridges occur for the case of 2-lane with same direction and 2-lane with opposite direction. By using CFRP as a strengthening material, the maximum stress and deflection at steel girders are reduced and consequently increase the fatigue life of steel girders. After introducing initial crack into steel girders of composite bridges, fatigue life of the bridges is dramatically reduced. However, the overall performance of damaged composite bridge can be improved by using CFRP with less effectiveness. Therefore, if the cracks are found during inspection process, steel welding must be performed before strengthening the composite bridge by CFRP.

Keywords: Steel Beam; Steel Bridge; Fatigue; Fiber Reinforced Polymer

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ก

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ง

สารบัญตาราง ช

สารบัญภาพ ญ

บทที่

1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตของโครงการ 4

1.4 แนวทางการศึกษา 5

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 5

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา 6

2.2 สะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก 7

2.3 ความล้า (Fatigue) 9

2.4 ทฤษฎีพฤติกรรมความล้าของแผ่นประกอบ CFRP และทฤษฎีในการทำนาย 11

2.5 วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 15

2.6 ความรู้พื้นฐานของพลศาสตร์โครงสร้าง (Fundamental of Structural Dynamics) 22

2.7 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต 25

2.8 วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) 25

2.9 วิธีการไฟไนท์อิลิเมนท์ (Finite Element Method) 32

2.10 การจำลองการเคลื่อนที่ของแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว 33

2.11 มาตรฐานในงานโครงสร้างสะพานคอมโพสิต 35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ 42

3.2 การศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่เสริมกำลังโดยวัสดุโพลิเมอร์ 47

4 ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

4.1 บทนำ 65

4.2 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง 2 มิติ กับ 3 มิติ 67

4.3 พฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP 67

4.4 การศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP 76

5 ผลการศึกษาพฤติกรรมของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยวัสดุโพลิเมอร์

5.1 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง 84

5.2 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP 84

5.3 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP 92

5.4 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP 99

5.5 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และเสริมกำลังด้วย CFRP 105

5.6 ผลการวิเคราะห์ความล้าของสะพานคอมโพสิต 117

6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย 144

เอกสารอ้างอิง 151

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ก ผลการศึกษาเพิ่มเติมของการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP
(เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress กรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว) 155

ข ผลการศึกษาเพิ่มเติมของการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP
(ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง) 164

ค การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก ตามมาตรฐาน AASHTO 167

ง การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้าตามมาตรฐาน AASHTO 183

จ Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว. 188

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของวัสดุเสริมพิเศษ CFRP	22
2.2	จำนวนรอบที่นับจากวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก	32
2.3	ค่าสัดส่วนการกระแทกเพิ่มเติม (Impact Factor, IM)	36
2.4	ค่า Fraction of truck traffic in a single-lane, p	37
2.5	ค่าคงที่ A และ Constant fatigue threshold	40
2.6	ค่า Number of stress range cycles per truck passage	41
3.1	ตารางแสดงชนิดของ Element ที่ใช้ในแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็ก	44
3.2	คุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง FE	47
3.3	กรณีศึกษาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้	48
3.4	คุณสมบัติของคอนกรีต และเหล็ก	52
3.5	คุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย และกาว	53
3.6	Element type ของแต่ละ Part	58
4.1	แสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดของแต่ละช่วงหน่วยแรงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้	68
4.2	เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP	75
4.3	กรณีศึกษาในการศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP	76
4.4	ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2 ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa	79
4.5	ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0 ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa	82
5.1	ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต จากสมการ และแบบจำลอง	84
5.2	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกลักษณะต่าง ๆ	91
5.3	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)	98
5.4	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร	104
5.5	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5.6	ค่าช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง	129
5.7	ค่าคลาดเคลื่อนของช่วงของหน่วยแรง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP	130
5.8	ค่าคงที่ A และ ค่า Constant-amplitude fatigue threshold $(\Delta F)_{TH}$	133
5.9	ค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage, n)	133
5.10	อายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เมื่อพิจารณาจากตัวแปรที่ได้จากแบบจำลอง	134
5.11	ค่าคลาดเคลื่อนของอายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP	135
5.12	จำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน (Number of cycle)	140
5.13	ค่าคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP	141
6.1	เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP	146
ค.1	โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	173
ค.2	แรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียว	177
ค.3	แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเชิงประกอบบริเวณหน้าตัดที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด	182
ค.4	แสดงหน่วยแรงร่วมที่ขอบบนของแผ่นพื้นมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้	182
ง.1	การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้าตามมาตรฐาน AASHTO	184

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	รูปแบบของสะพานคอมโพสิต	8
2.2	ความเสียหายของสะพานคอมโพสิตเนื่องจากความล้า	8
2.3	ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต	9
2.4	กราฟหน่วยแรงกับจำนวนรอบ (S-N Curve)	10
2.5	ประเภทของวัสดุ CFRP	16
2.6	การรับแรงดึง (Tension) ของ CFRP	17
2.7	การรับแรงกดอัด (Compression) ของ CFRP	17
2.8	การรับแรงเฉือน (Shear) ของ CFRP	18
2.9	การรับแรงดัด (Flexure) ของ CFRP	18
2.10	การเสริมความแข็งแรงโดยใช้ วัสดุ CFRP แบบกระดาษ (CFRP laminate)	20
2.11	วัสดุ CFRP แบบแผ่นหนา	20
2.12	วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ	21
2.13	วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ นำมารวมเป็นแผ่นพื้น	21
2.14	กราฟหน่วยแรงและความเครียด (Stress-Strain diagram) ของโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ประเภทต่าง ๆ ภายใต้แรงดึง	22
2.15	แบบจำลองระบบโครงสร้างที่มีระดับความเสรีขั้นเดียว	24
2.16	กราฟรอบค่าความเครียดกับเวลา และค่าหน่วยแรงกับความเครียด	26
2.17	กราฟค่าหน่วยแรงแบบสุ่ม	26
2.18	กราฟค่าหน่วยแรงที่ตกลงจากจุดสูงสุด	27
2.19	กราฟการตกจากจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง	27
2.20	กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุด	28
2.21	กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง	28
2.22	กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง	29
2.23	ขั้นตอนการนับด้วยวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก	31
2.24	รูปร่างการแทนด้วยอิลิเมนท์(Elements)	32
2.25	คานที่มีแรงแบบเคลื่อนที่ P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V	33
2.26	แรงที่เกิดขึ้นใน Element	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.27	รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20	36
2.28	รูปแบบข้อกำหนดของสะพานคอมโพสิตแบบต่าง ๆ	38
3.1	มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง	43
3.2	แบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในการศึกษา	43
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็ก	45
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแผ่น CFRP	45
3.5	Linear element traction separation behavior ของ cohesive element	46
3.6	ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต	49
3.7	ระยะการแบ่งเลน และความยาวของช่วงสะพาน	50
3.8	รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.)	50
3.9	ระยะห่างของคานเหล็ก	51
3.10	รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20	53
3.11	กราฟน้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับแบบจำลอง	54
3.12	กรณีศึกษาของน้ำหนักรถบรรทุก	54
3.13	ขั้นตอนในการศึกษาแบบจำลอง	55
3.14	รูปแบบของส่วนโปรแกรมในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method)	57
3.15	คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	57
3.16	ส่วนต่าง ๆ ของ Parts ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต	59
3.17	การใส่คุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลอง	61
3.18	แบบจำลองที่นำแต่ละ Parts มารวมกันใน Assembly	61
3.19	ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS	63
3.20	แบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ศึกษา	63
4.1	มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง	65
4.2	แสดงรูปการทดสอบที่ศึกษาโดย Bocciarelli et al.	66
4.3	แบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้	66
4.4	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุดของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ	67
4.5	แสดงตัวอย่างของ Amplitude ที่ป้อนลงในโปรแกรมโดยใช้สมการ $a = A_0 + A \times (\sin \cdot \omega \cdot t)^2$	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.6	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 83$ MPa)	69
4.7	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 100$ MPa)	70
4.8	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 120$ MPa)	71
4.9	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 160$ MPa)	72
4.10	Linear element traction separation behavior ของ cohesive element	73
4.11	เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experimental กับ FE prediction	75
4.12	เปรียบเทียบค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงตั้งฉาก ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83$ MPa)	78
4.13	ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.2 mm)	80
4.14	ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.2 mm)	81
4.15	ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากาวคงที่ = 1.0 mm)	82
5.1	ค่าหน่วยแรง จากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร	85
5.2	ค่าการแอ่นตัว จากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร	86
5.3	ค่าหน่วยแรง จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)	87
5.4	ค่าการแอ่นตัว จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)	88
5.5	ค่าหน่วยแรง จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)	89
5.6	ค่าการแอ่นตัว จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)	90
5.7	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด ภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ	92
5.8	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด ภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ	92
5.9	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	93
5.10	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	94
5.11	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	96
5.12	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.14	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP	99
5.15	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	100
5.16	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	101
5.17	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	102
5.18	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	103
5.19	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุดกับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่างๆ	105
5.20	เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่างๆ	105
5.21	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	106
5.22	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	107
5.23	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	108
5.24	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตรเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	109
5.25	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	110
5.26	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	111
5.27	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	112
5.28	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	113
5.29	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่างๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.30	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	115
5.31	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	116
5.32	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	116
5.33	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	118
5.34	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	119
5.35	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	120
5.36	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	121
5.37	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	122
5.38	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	124
5.39	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	125
5.40	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	127
5.41	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	128

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.42	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่างๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	131
5.43	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรงกับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่างๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	131
5.44	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	132
5.45	กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	136
5.46	กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	136
5.47	กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	137
5.48	กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีไม่มีรอยร้าวเริ่มต้น	138
5.49	กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีมีรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร	138
5.50	กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีมีรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร	139
5.51	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	142
5.52	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	142
5.53	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	143
6.1	เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experiment กับ FE prediction	146
ก.1	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83MPa$)	156
ก.2	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 100MPa$)	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.3	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 120MPa$)	158
ก.4	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 160MPa$)	159
ก.5	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83MPa$)	160
ก.6	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 100MPa$)	161
ก.7	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 120MPa$)	162
ก.8	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 160MPa$)	163
ข.1	ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.4 mm)	165
ข.2	ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.6 mm)	165
ข.3	ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากาวคงที่ = 1.1 mm)	166
ข.4	ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากาวคงที่ = 1.2 mm)	166
ค.1	น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ประเภท HS20	169
ค.2	น้ำหนักแผ่เทียบเท่า (Lane Loading) สำหรับรถยนต์แบบ HS20	169
ค.3	การกำหนดรูปแบบโครงสร้าง	170
ค.4	รายละเอียดเหล็กเสริมในพื้นคอนกรีต	174
ค.5	การจัดวางน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้เกิดแรงภายในสูงสุด	176
ค.6	รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)	179