



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยแผ่น
คาร์บอนไฟเบอร์

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย

24 มิถุนายน 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยแผ่น
คาร์บอนไฟเบอร์

ผศ. ดร.กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย

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 ชันติยวิชัย
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RMU 5080073

ชื่อโครงการ: การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ชื่อนักวิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ ชันดิยวิชัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ระยะเวลาดำเนินงาน 3 ปี

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer CFRP) ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานเหล็กแบบคอมโพสิต โดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยจะพิจารณาลักษณะการกระจายของหน่วยแรง ความล้าของชิ้นส่วน และตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้แก่ ช่วงของหน่วยแรงกระทำ (Stress range) ความหนาของแผ่น 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 ดังนั้นในกรณีที่รอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้นที่คานเหล็ก ก่อนที่จะทำการปรับปรุงกำลังของสะพาน ต้องทำการเชื่อมตอร์อยร้าวให้เรียบร้อยก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย CFRP ให้ใช้งานได้เต็มที่

คำหลัก: คานเหล็ก สะพานเหล็ก ความล้า วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย

ABSTRACT

Project Code: RMU 5080073

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

Investigator: Assistant Professor Kittisak Kuntiyawichai
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Ubonratchathani University

Project Period: 3 Years

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 bonded 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 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method)	32
2.10 การจำลองการเคลื่อนที่ของแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว	33
2.11 มาตรฐานในงานโครงสร้างสะพานคอมโพสิต	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 วิธีดำเนินการวิจัย

- 3.1 พฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ 42
- 3.2 การศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์ 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 ผลการศึกษาพฤติกรรมของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์

- 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 ผลการศึกษาเพิ่มเติมของการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึง ของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP (เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress กรณีที่ความหนา CFRP คงที่ แต่เปลี่ยนความหนาของกาว)	155
ข ผลการศึกษาเพิ่มเติมของการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึง ของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP (ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วง ของหน่วยแรง)	164
ค การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก วางบนคานเหล็ก ตามมาตรฐาน AASHTO	167
ง การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้า ตามมาตรฐาน 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	คุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย และกาว	53
3.6	Element type ของแต่ละ Part	58
4.1	แสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดของแต่ละช่วง หน่วยแรงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้	68
4.2	เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP	75
4.3	กรณีศึกษาในการศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของ ชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย 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	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง ด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกลักษณะต่าง ๆ	91
5.3	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)	98
5.4	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง ด้วย 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	แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าดัดเชิงประกอบบริเวณหน้าดัดที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด	182
ค.4	แสดงหน่วยแรงรวมที่ขอบบนของแผ่นพื้นมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้	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 แบบกระดาด (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	แบบจำลองระบบโครงสร้างที่มีระดับความเสถียรขึ้นเดียว	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	รูปร่างการแทนด้วยอีลิเมนต์ (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	กรณีศึกษาของน้ำหนักบรรทุกทุก	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 หน่วยแรงตึงฉาก ในกรณีที่มีความหนา 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 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกต่าง ๆ	92
5.8	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกต่าง 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 กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	131
5.43	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรงกับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ 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 ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83MPa$)	156
ก.2	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 100MPa$)	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.3	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 120MPa$)	158
ก.4	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 160MPa$)	159
ก.5	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83MPa$)	160
ก.6	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 100MPa$)	161
ก.7	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 120MPa$)	162
ก.8	เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา 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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในช่วง 50 ปี ที่ผ่านมาได้มีวิวัฒนาการในการก่อสร้างสะพานขึ้นเพื่อสร้างโครงข่ายและรองรับปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้น โดยชนิดของสะพานที่ถูกก่อสร้างขึ้นนั้นมีหลายชนิด เช่น สะพานคอนกรีต สะพานไม้ สะพานเหล็ก และสะพานคอมโพสิต เป็นต้น อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลของความรวดเร็วในการก่อสร้างและประสิทธิภาพในการใช้งานจึงทำให้สะพานคอมโพสิตกลายเป็นสะพานชนิดหนึ่งที่มีความนิยมและก่อสร้างไปทั่วโลก ซึ่งองค์ประกอบของสะพานคอมโพสิต จะประกอบไปด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก วางบนคานเหล็กรูปตัวไอ (I-Shape) โดยที่การยึดระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตกับคานเหล็กนั้นจะอาศัยหมุดรับแรงเฉือน (Shear stud) ทำหน้าที่ส่งผ่านหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นไปยังคานเหล็ก

แต่จากปัจจัยของการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม ปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งมาตรฐานในการออกแบบที่ปรับปรุงใหม่เพื่อเน้นความปลอดภัยของสะพาน ทำให้สะพานคอมโพสิตที่ได้เปิดใช้งานไปแล้วส่วนใหญ่ต้องมีการปรับปรุงสภาพ (Rehabilitation) หรือต้องทำการขยายช่องจราจร (Expansion) ทำให้บ่อยครั้งตัวเล็กระหว่างการก่อสร้างสะพานขึ้นมาใหม่กับการปรับปรุงสภาพให้สามารถรับน้ำหนักได้จึงเกิดขึ้น ขั้นตอนนี้เป็นหน้าที่รับผิดชอบโดยตรงของผู้ที่เกี่ยวข้องในการบำรุงรักษาสะพาน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการปรับปรุงสภาพของสะพานโดยการเสริมกำลังให้แก่สะพานจะเป็นตัวเลือกที่นิยมกันเนื่องจากว่ามีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการก่อสร้างใหม่คือ ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า สามารถดำเนินการภายในระยะเวลาอันสั้น และที่สำคัญคือไม่กระทบหรือกระทบการจราจรบนสะพานเพียงเล็กน้อย

สำหรับวิธีการเสริมกำลังให้แก่สะพานคอมโพสิตนั้นได้มีผู้นำเสนอหลายวิธี (Klaiber, 1987 ; Dorton, 1997) เช่น การยึดแผ่นเหล็กเข้าที่บริเวณปีกของคานรูปตัวไอ ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียหลายประการได้แก่ ความยากในการติดตั้งแผ่นเหล็กที่มีน้ำหนักมากเข้ากับตัวสะพาน ข้อจำกัดเรื่องความยาวของแผ่นเหล็กในการขนส่ง ต้องใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมาก และกระทบกับการจราจรบนสะพานอีกด้วย แต่ภายหลังจากปี ค.ศ. 1990 ได้มีการเสนอวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) เพื่อใช้ในการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้าง ซึ่งข้อดีของวัสดุชนิดนี้คือ มีน้ำหนักเบา มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength/Weight) และอัตราส่วนระหว่างค่าสตีฟเนสต่อ

น้ำหนัก (Stiffness/Weight) ที่สูง สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี และไม่นำไฟฟ้า (Mayo, 1987) ทำให้วัสดุชนิดนี้ได้รับความแพร่หลายในการใช้งานทางด้านวิศวกรรมการบินเป็นส่วนใหญ่ แต่ภายหลังจึงได้มีการนำมาใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ข้อเสียของ CFRP ก็คือ ราคาวัสดุที่ค่อนข้างสูงและต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง ดังนั้นสืบเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงในการติดตั้ง ทำให้จำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างภายหลังจากที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วย CFRP แล้วว่าผลจากการเสริมกำลังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสะพานได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งวิธีการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สำหรับศึกษาพฤติกรรมของชิ้นส่วนบางชิ้นของโครงสร้างหรือโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก) หรือที่หน่วยงาน (สำหรับศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพาน) และการจำลองด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม ซึ่งการศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพานที่หน่วยงานจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม รวมทั้งไม่สามารถแปรผันตัวแปรที่จะมีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานได้ง่ายเหมือนกับการจำลองด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม

ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิต โดยใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS โดยสะพานคอมโพสิตที่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองที่ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตามมาตรฐานของ AASHTO เพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกขนาด HS-20 ซึ่งในการศึกษาจะเริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP หลังจากนั้นก็จะนำค่าหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นไปทำวิเคราะห์หาช่วงของหน่วยแรง (Stress range) ที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ซึ่งช่วงของหน่วยแรงที่ได้จะสามารถนำไปใช้คำนวณหาการตอบสนองของความล้า (Fatigue cycle) ที่โครงสร้างสามารถรับได้ต่อไป ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการศึกษาพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้น โดยความเสียหายเริ่มต้นของสะพานที่จะศึกษาได้แก่ การที่สะพานมีรอยร้าวชนิดความลึกเท่ากันตลอดความกว้างคาน (Through thickness crack) ที่ปีกกลางบริเวณกึ่งกลางของคานเหล็กรูปตัวไอ ของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งกระบวนการศึกษาก็จะทำเช่นเดียวกับสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้นทุกประการ นอกจากนี้ตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพานเช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัวไอ และรูปแบบการเสริมกำลังก็จะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่มีผู้ทำการศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตทั้งโครงสร้าง ทั้งชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้นและชนิดที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้น ประเด็นนี้จึงเป็นสิ่งที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น

(CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานารูปตัวไอ ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS ในการศึกษาทั้งนี้การตอบสนองทางพลศาสตร์จะพิจารณาที่ค่าหน่วยแรงและค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ส่วนการตอบสนองของความล้าจะพิจารณาที่จำนวนรอบสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ นอกจากนี้ก็จะศึกษาถึงผลของความเสียหายเริ่มต้นในรูปแบบของรอยร้าวเริ่มต้น 2 ขนาดคือความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่ปีกล่างของคานารูปตัวไอ ซึ่งความน่าจะเป็นในการตรวจพบรอยร้าว (Probability of Detection, POD) จะมีค่าสูงเมื่อรอยร้าวมีขนาดตั้งแต่ 2.5 มิลลิเมตร ขึ้นไป (Kuntiyawichai and Limkatanyu, 2006) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสมมติขนาดรอยร้าวเบื้องต้นในรอยเชื่อมเป็น 3 มิลลิเมตร นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องการจะศึกษาผลของขนาดของรอยร้าวต่ออายุการใช้งานของสะพาน ผู้วิจัยจึงได้สมมติขนาดรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1 ขนาดคือ 6 มิลลิเมตร โดยที่มีผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และที่เสริมกำลังด้วย CFRP อันนี้ตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพาน เช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานาหลักรูปตัวไอ และรูปแบบการเสริมกำลังก็จะศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการรับแรงดึงแบบซ้ำๆ ของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของหน่วยแรงในบริเวณกาวที่ยึดระหว่างแผ่นเหล็กและคาร์บอนไฟเบอร์

1.2.4 เพื่อประเมินค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อมีแรงดึงกระทำแบบซ้ำๆ

1.2.5 เพื่อศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบเคลื่อนไหว (Moving load) อันเนื่องมาจากน้ำหนักของรถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO

1.2.6 เพื่อศึกษาผลของทิศทางของรถที่วิ่งผ่านสะพาน ต่อค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัว ที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิต

1.2.7 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเสริมกำลังระหว่างการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานารูปตัวไอ ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และ

การใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิต

1.2.8 เพื่อศึกษาผลของขนาดของความเสียหายเริ่มต้น (ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น) ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิต ทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบเคลื่อนไหว (Moving load) อันเนื่องมาจากน้ำหนักของรถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO

1.2.9 เพื่อศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิต ทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ชั้นส่วนที่จะทำการศึกษาจะพิจารณาเฉพาะชั้นส่วนที่รับแรงดึงเท่านั้น

1.3.2 ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงดึงทั้งแบบสถิตและแบบซ้ำๆ แล้วเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่เสริมกำลัง

1.3.3 ทำการแปรผันช่วงของหน่วยแรง (Stress Range) ที่กระทำเพื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของหน่วยแรงและความล้าที่เกิดขึ้น

1.3.4 ตัวแปรที่จะทำการแปรผันในส่วนของการเสริมกำลังได้แก่ ความหนาของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และความหนาของกาว

1.3.5 สะพานคอมโพสิตเป็นสะพานชนิดที่มีองค์ประกอบของสะพานคอมโพสิตจะประกอบไปด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและรองรับด้วยคานเหล็กรูปตัวไอ โดยที่การยึดรั้งระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตกับคานเหล็กนั้นจะอาศัยหมุดรับแรงเฉือน (Shear stud) ทำหน้าที่ส่งผ่านหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นไปยังคานเหล็ก

1.3.6 สะพานคอมโพสิตที่ใช้ในการศึกษาเป็นสะพานต้นแบบที่ถูกออกแบบขึ้นเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกขนาด HS-20 ตามมาตรฐาน ASSHTO

1.3.7 ขนาดความเร็วของน้ำหนักรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานมีค่าคงที่เท่ากับ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

1.3.8 ชนิดการเสริมกำลังจะพิจารณาเพียง 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัวไอ ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.3.9 ความเสียหายเริ่มต้นของสะพานที่จะศึกษาจะอยู่ในรูปของรอยร้าวชนิดความลึกเท่ากันตลอดความกว้างคาน (Through thickness crack) ที่ปีกล่างบริเวณกึ่งกลางของคานเหล็กรูปตัวไอ ทุกตัวของสะพานคอมโพสิต

1.4 แนวทางการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎี และเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม ABAQUS
- 1.4.3 สร้างแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต ในโปรแกรม ABAQUS
- 1.4.4 ทำการวิเคราะห์ความล้าของสะพานคอมโพสิต
- 1.4.5 สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์
- 1.4.6 จัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคอมโพสิต ชนิดที่ยังไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้การเคลื่อนไหวยของรถที่แล่นผ่าน
- 1.5.2 มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคอมโพสิต ที่ฟื้นฟูสภาพโดยใช้ CFRP ติดบริเวณท้องคานภายใต้การเคลื่อนไหวยของรถที่แล่นผ่าน
- 1.5.3 มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคอมโพสิต ที่ฟื้นฟูสภาพโดยใช้วิธีการเปลี่ยนแผ่นพื้นจากคอนกรีตไปเป็นการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) ภายใต้การเคลื่อนไหวยของรถที่แล่นผ่านแผ่นพื้นคอนกรีต
- 1.5.4 ทราบถึงผลของขนาดของความเสียหายเริ่มต้น (ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น) ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิต ทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP
- 1.5.5 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเสริมกำลังโครงสร้างสะพานคอมโพสิต โดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ
- 1.5.6 ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานคอมโพสิต ในประเทศไทยได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสะพานคอมโพสิตหลายประเภททั้งการศึกษาจากตัวสะพานตามหน่วยงานจริง การศึกษาจากแบบจำลองที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรม หรือว่าจะเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้น้ำหนักแบบคงที่ หรือใช้น้ำหนักแบบเคลื่อนไหวในการพิจารณา ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

อลัมพาลลี (Alampalli, 2006) ได้ทำการศึกษาสะพานคอมโพสิตแบบโครงข้อหมุน ที่ทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ไปเป็น CFRP Composite deck โดยจะใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกจริงในการวิ่งผ่านสะพาน ซึ่งผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าสะพานนั้นจะมีค่าการแอ่นตัวลดลงร้อยละ 30 เมื่อทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นของสะพานคอมโพสิตเป็น CFRP composite deck ต่อมา (Chiewanichakorn, 2007 : 1475-1489) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตแบบโครงข้อหมุนที่ได้มีการเปลี่ยนพื้นของสะพานไปเป็น CFRP composite deck โดยจะพิจารณาความล้าที่เกิดขึ้นในโครงข้อหมุนของสะพาน โดยจะนำค่าของความล้าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพาน มาใช้ในการหาอายุการใช้งานของสะพานโดยใช้มาตรฐานของ AASHTO ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองของสะพานที่มีพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว จะเห็นว่า สะพานคอมโพสิตที่เปลี่ยนพื้นสะพานเป็น CFRP composite deck นั้นจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสะพานที่มีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการพิจารณาผลของความล้าของสะพานคอมโพสิตนั้น (Tsiatas, 2002) ได้ทำการศึกษาความล้า และหาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต โดยใช้มาตรฐานในการเปรียบเทียบ 4 วิธี คือ AASHTO Guide Specifications , BAR7 , The Lehigh method และ Fracture mechanics (LEFM) ซึ่งจะพิจารณาสะพานแบบเดียว และพิจารณาจากความล้าของสะพาน โดยผลที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO Guide Specifications และ Fracture mechanics (LEFM) นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากกว่าอีก 2 วิธีที่เหลือ (ชาคริตร์ ไม้พันธุ์, 2551) ได้ทำการศึกษาสะพานคอมโพสิต โดยพิจารณาความล้า และหาอายุการใช้งานของสะพานจากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองจะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า

ทาวาคโกลิซาเดด (Tavakkolizadeh, 2003 : 186-196) ได้ทำการศึกษาถึงผลการเสริมความแข็งแรงของสะพานคอมโพสิตโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อลดค่าหน่วยแรงความล้า (Fatigue stress) ของคานเหล็ก และยังสามารถลดการเกิดรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นของคานเหล็กได้ ซึ่งในการพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น โดยที่มีความกว้างของรอยร้าวที่ 0.90 เซนติเมตร ซึ่งที่ผ่านมานั้นยังไม่มีใครทดสอบความแข็งแรงของสะพานที่มีรอยร้าวเกิดขึ้น และได้ทำการศึกษาคานเหล็กของสะพานคอมโพสิต โดยทำการเลือกพิจารณาคานเหล็กที่เกิดรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน โดยที่จะพิจารณาคานที่มีความยาว 1.2 เมตร และมีแรงกระทำแบบ 4 จุด ซึ่งแรงกระทำจะมีขนาดแตกต่างกันออกไป โดยจะพิจารณาทั้งกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลัง และกรณีที่มีการเสริมกำลัง โดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย และจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคานเหล็กที่เกิดรอยร้าวเกิดขึ้นนั้น จะทำให้ตัวคานเหล็กมีค่าหน่วยแรงที่สูงกว่าคานเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว ส่วนคานเหล็กทำการเสริมความแข็งแรงด้วย CFRP นั้นจะทำให้คานเหล็กสามารถรับจำนวนรอบของน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า คานเหล็กที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรงแต่อย่างใดก็การศึกษานี้ก็เป็นการศึกษาเพียงแค่ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิตเท่านั้นซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ และน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดนั้นก็ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

2.2 สะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก

2.2.1 บทนำ

ในศตวรรษที่ 20 การก่อสร้างสะพานคอมโพสิต ได้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก โดยในช่วงแรกของการพัฒนาการก่อสร้างสะพานคอมโพสิต ได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1950 โดยได้ใช้เป็นส่วนหนึ่งในการขยายโครงข่ายทางไปรษณีย์ของยุโรปในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งได้รับความเสียหายจากสงครามระหว่างเยอรมันและฝรั่งเศส จึงทำให้ต้องมีการสร้างถนนขนาดใหญ่ รางรถไฟ และสะพานขึ้นมาใหม่ ซึ่งสะพานนั้นจำเป็นต้องสร้างให้รวดเร็ว ดังนั้นสะพานคอมโพสิตจึงเป็นสะพานที่ได้มีการสร้างเพิ่มมากขึ้น เพราะใช้เวลาในการสร้างที่รวดเร็วกว่าสะพานประเภทอื่น ๆ สะพานคอมโพสิต คือ สิ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เหล่านี้ โดยในการก่อสร้างนั้นจะมีน้ำหนักที่ไม่มากและมีน้ำหนักที่น้อยกว่าสะพานที่โครงสร้างทั้งหมดเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในปัจจุบันสะพานคอมโพสิตได้มีการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนมากจะใช้เพื่อข้ามแม่น้ำ คลอง ถนน โดยรูปแบบของสะพานคอมโพสิตนั้นแสดงในภาพที่



ภาพที่ 2.1 รูปแบบของสะพานคอมโพสิต (Brent, 2003)

สะพานคอมโพสิตที่สร้างขึ้นในปัจจุบันนั้น จะเกิดความเสียหายส่วนใหญ่เนื่องจากความล้า ซึ่งความล้านี้จะเกิดได้เนื่องจากสะพานคอมโพสิตรับน้ำหนักบรรทุก เป็นเวลานาน โดยที่รูปแบบของความเสียหายของสะพานคอมโพสิตนั้นจะแสดงดังภาพที่ 2.2

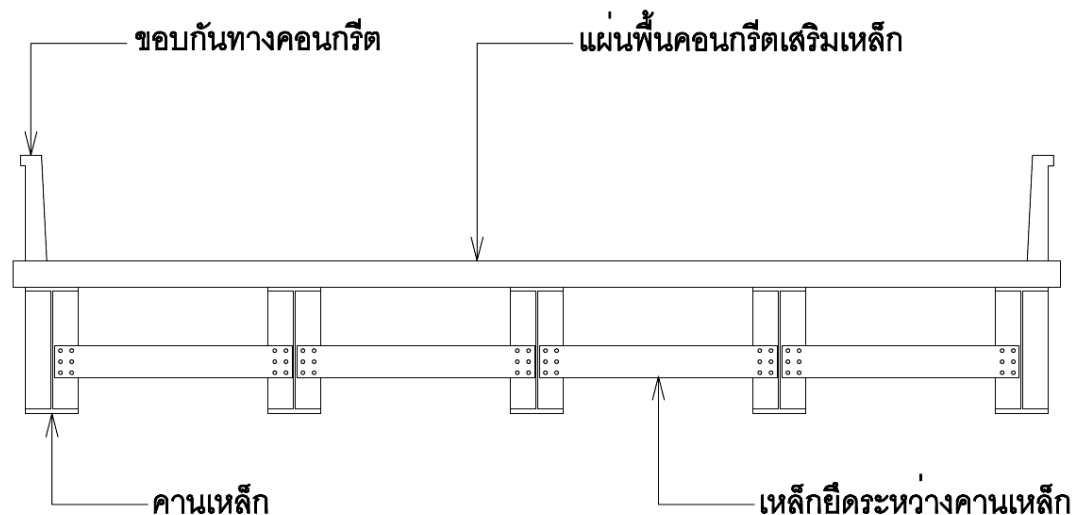


ภาพที่ 2.2 ความเสียหายของสะพานคอมโพสิตเนื่องจากความล้า (Dawson, 2005)

2.2.2 ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต

จากความก้าวหน้าทางด้านการออกแบบโครงสร้างของสะพานในปัจจุบัน ส่งผลให้ประเภทของสะพานค่อนข้างมีรูปแบบที่หลากหลาย และทำให้ต้นทุนการก่อสร้างสะพานคอมโพสิตต่ำลง ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของต้นทุนในด้านแรงงานหรือต้นทุนในด้านวัสดุ โครงสร้างสะพานคอมโพสิต เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการก่อสร้าง ซึ่งตัวสะพานจะประกอบไปด้วยส่วนหลักต่าง ๆ คือ แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Deck) คานเหล็ก (Steel girder) ซึ่งจะเป็นเหล็กรูป

ตัวไอ (I-shape) และจะมีเหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก เรียกว่า Diaphragm ซึ่งแสดงดังในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต

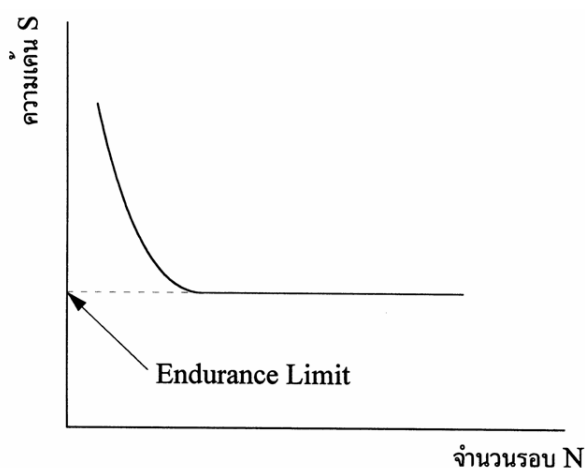
2.3 ความล้า (Fatigue)

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่ากำลังสูงสุด (Ultimate Strength) มากกระทำกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้า (Fatigue) ขึ้น ความล้าที่เกิดขึ้นในวัสดุนี้ เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตช์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดหน่วยแรงสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีหน่วยแรงรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีหน่วยแรงเข้าไปซ้ำมารอยแตกนั้นก็จะมีแนวโน้มที่จะโตขึ้นเรื่อย ๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลงจนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่ากำลังสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกัน (กองวิศวกรรมสรรพาวุธ, 2551)

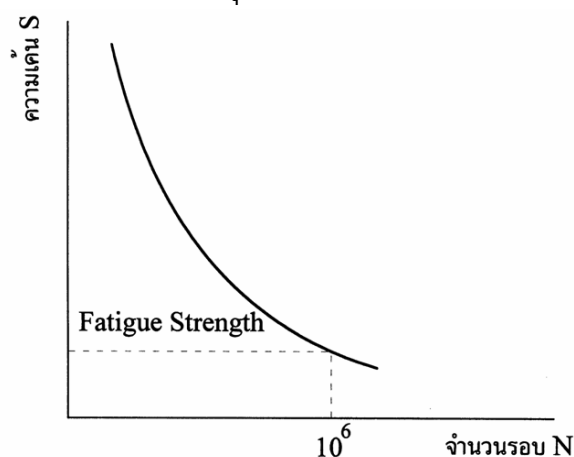
ถ้าเรากำหนดจำนวนรอบของหน่วยแรงที่ทำซ้ำไปซ้ำมาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า $10^6 - 10^8$ รอบ) ค่าหน่วยแรงที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของหน่วยแรงรอบนั้น ๆ เราเรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าหน่วยแรงอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้หน่วยแรงต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าหน่วยแรงนี้เรียกว่า Endurance Limit

การทดสอบความล้ามีอยู่หลายวิธี แต่โดยหลักการจะเหมือนกันคือ จะให้แรงกระทำเป็นรอบกับชิ้นทดสอบ โดยให้เกิดหน่วยแรงค่าต่าง ๆ แล้วบันทึกจำนวนรอบ (Cycles) ที่วัสดุ

จะทนได้ไว้ จากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 2.4 เรียกว่ากราฟหน่วยแรงกับจำนวนรอบ (S-N Curve) สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเกือบทั้งหมดและโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด จะมี Endurance Limit ดังรูป 2.4 (ก) ส่วนพวกโพลีเมอร์และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กหลายชนิดจะไม่มี Endurance Limit ดังรูป 2.4 (ข) สำหรับโลหะที่มี Endurance limit นั้น ค่า Endurance limit จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังสูงสุด กล่าวคือ พวกเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปแล้ว จะมีค่า Endurance limit ครึ่งหนึ่งของค่ากำลังสูงสุด ส่วนโลหะผสมทองแดงจะอยู่ประมาณร้อยละ 25-50 ของกำลังสูงสุด สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องรับแรงสลับ ก็คงต้องคำนึงถึงเรื่องของความล้าด้วย และพยายามออกแบบให้รับหน่วยแรงต่ำกว่า Endurance Limit หรือ Fatigue Strength ตามแต่กรณี



(ก) ในวัสดุที่มี Endurance Limit



(ข) ในวัสดุที่ไม่มี Endurance Limit

ภาพที่ 2.4 กราฟหน่วยแรงกับจำนวนรอบ (S-N Curve) (กองวิชาวิศวกรรมสรรพาวุธ, 2551)

2.4 ทฤษฎีพฤติกรรมความล้าของแผ่นประกอบ CFRP และทฤษฎีในการทำนาย

2.4.1 การกระจายหน่วยแรง

สำหรับวิธีการคำนวณหาการกระจายของหน่วยแรงในชั้นกาวนั้น ได้สมมติคุณสมบัติของวัสดุให้เป็นแบบยืดหยุ่นใน โดยค่าหน่วยแรงที่ได้จากการคำนวณจะมี 2 รูปแบบ คือ หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) และหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress) และในการประมาณนี้จะไม่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิ ผลของการให้แรงเริ่มต้นแก่แผ่น CFRP ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมาณค่าของหน่วยแรงบริเวณชั้นกาวที่อยู่ระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่น CFRP นั้นถูกนำเสนอโดย Cadei et al. (2004) ซึ่งมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้

1. เหล็ก แผ่น CFRP และกาว มีคุณสมบัติเป็นแบบยืดหยุ่น
2. ระนาบของแผ่นเหล็กยังคงเป็นระนาบอยู่นั้นคือข้อสมมติฐานของ Euler-Bernoulli
3. การกระจายหน่วยแรงเฉือนนั้นจะสม่ำเสมอ นั่นคือชั้นกาวบางมาก
4. ไม่สนใจการเสียรูปของแผ่น CFRP เนื่องจากแรงเฉือน
5. ไม่สนใจการเสียรูปเนื่องจากการโก่งตัวของชั้นกาว และระหว่างกาวและแผ่น CFRP จะต้องไม่เกิดการเลื่อน
6. ในการพิสูจน์สมการของหน่วยแรงเฉือนจะไม่สนใจหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในแผ่น CFRP

สูตรข้างล่างนี้จะใช้ในการหาค่าความเค้นซึ่งตัว “S” “F” และ “A” ที่ห้อยอยู่ข้างล่างนี้เป็นสัญลักษณ์ของชิ้นส่วนของเหล็ก, แผ่น CFRP และส่วนที่ติดกาว ตามลำดับ

ให้แรงในแนวแกนแก่แผ่น CFRP, N_F จะได้

$$N_F(x) = -\frac{F}{f_2 \cdot (EA)_S} \cdot (e^{-ix} - 1) \quad \text{โดยที่ } \lambda = \sqrt{f_2 / f_1} \quad (2.1)$$

เมื่อ $N_F(x)$ = ให้แรงในแนวแกนบนแก่แผ่น CFRP

F = แรงที่กระทำต่อแผ่น CFRP

f_1 = ค่ากำลังรับแรงดิ่ง ได้จากความยาวของกาวที่ยึดติดส่วนค่าของ shear modulus ของกาวที่ยึดติด คูณกับความกว้างของกาวที่ยึดติด

f_2 = ค่ากำลังรับแรงดิ่ง ได้จากหนึ่งส่วน young's modulus ของชิ้นส่วนเหล็กคูณพื้นที่หน้าตัดของ ชิ้นส่วนเหล็กรวมกับสองส่วน young's modulus ของแผ่น CFRP คูณพื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP

E_s = ค่าของ young's modulus ของชิ้นส่วนหลัก

A_s = เป็นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนหลัก

$$f_1 = \frac{l_A}{G_A b_A}, \quad f_2 = \frac{1}{(EA)_s} + \frac{2}{(EA)_F} \quad (2.2)$$

เมื่อ f_1 = ค่ากำลังรับแรงดึง ได้จากความยาวของกาวที่ยึดติดส่วนค่าของ shear modulus ของกาวที่ยึดติดคูณกับความกว้างของกาวที่ยึดติด

f_2 = ค่ากำลังรับแรงดึง ได้จากหนึ่งส่วน young's modulus ของชิ้นส่วนหลักคูณพื้นที่หน้าตัดของ ชิ้นส่วนหลักรวมกับสองส่วน young's modulus ของแผ่น CFRP คูณพื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP

l_A = ความยาวของกาวที่ยึดติด

G_A = ค่าของ shear modulus ของบริเวณส่วนที่ทำการติดกาว

b_A = ความกว้างของกาวที่ยึดติด

E_s = ค่าของ young's modulus ของชิ้นส่วนหลัก

A_s = เป็นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนหลัก

E_F = ค่าของ young's modulus ของบริเวณแผ่น CFRP

A_F = เป็นพื้นที่หน้าตัดของบริเวณแผ่น CFRP

หาค่า young's modulus (E) และ shear modulus (G) ตามลำดับ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน ส่วน t_A และ b_A เป็นความหนาและความกว้างของกาวที่ยึดติดตามลำดับ

จากสมการที่ 2.1 ค่าความเค้นของแผ่น CFRP, σ_F และ หน่วยแรงเฉือนของส่วนที่ติดกาว, τ_A หาได้จาก

$$\sigma_F = \frac{N_F}{A_F}, \quad \tau_A = -\frac{1}{b_A} \frac{dN_F}{dx} = -\frac{1}{b_A} \frac{\lambda \cdot F}{f_2 \cdot (EA)_s} e^{-\lambda x} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ_F = ค่าความเค้นของแผ่น CFRP

τ_A = หน่วยแรงเฉือนของส่วนที่ติดกาว

N_F = ให้แรงในแนวแกนแก่แผ่น CFRP

A_F = เป็นพื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP

b_A = ความกว้างของกาวที่ยึดติด

F = แรงที่กระทำต่อแผ่น CFRP

f_1 = ค่ากำลังรับแรงดึงของชั้นส่วนเหล็กรวมกับบริเวณแผ่นของ CFRP

f_2 = ค่ากำลังรับแรงดึงของบริเวณส่วนที่ทำการติดกาว

E_s = ค่าของ young's modulus ของชั้นส่วนเหล็ก

A_s = เป็นพื้นที่หน้าตัดของชั้นส่วนเหล็ก

ค่าหน่วยแรงตึงฉากในชั้นกาวจะหาได้จากการหาความแตกต่างของการแอ่นตัวในแนวตั้งตลอดหน้าตัดของรอยต่อและในส่วนนี้จะคำนึงถึงผลของการแอ่นตัวของชั้นส่วนด้วย ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\sigma_A = \frac{1}{b_A} \left[\frac{a_3 C_1 \lambda^2}{a_1 \lambda^4 + a_2} e^{-\lambda x} + 2\beta^2 e^{-\beta x} (C_3 \sin(\beta x) - C_4 \cos(\beta x)) \right] \quad (2.4)$$

โดย

$$a_1 = \frac{t_A}{E_A b_A}, \quad a_2 = \frac{1}{(EI)_F}, \quad a_3 = \frac{y_F}{(EI)_S}, \quad \beta^4 = \frac{a_2}{4a_1} \quad (2.5)$$

$$C_1 = -\frac{F}{f_2 E_s A_s}, \quad C_3 = -\frac{a_3}{a_2} \frac{F}{f_2 E_s A_s} - \frac{a_3 C_1}{a_1 \lambda^4 + a_2}, \quad C_4 = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\lambda a_3 C_1}{a_2 + a_1 \lambda^4} + C_3 \quad (2.6)$$

เมื่อ σ_A = ค่าความเค้นของบริเวณที่ยึดติดกาว

b_A = ความกว้างของกาวที่ยึดติด

a_1 = ความหนาของบริเวณที่ยึดติดกาวส่วนด้วยค่าของ young's modulus ที่ยึดติดกาวคูณ ความกว้างของบริเวณที่ยึดติดกาว

a_2 = หึ่งส่วนด้วยค่า young's modulus ของแผ่น CFRP คูณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยอันดับสองของแผ่น CFRP

a_3 = ระยะจากปลายของแผ่น CFRP ส่วนด้วยค่า young's modulus ของชั้นส่วนเหล็ก คูณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยอันดับสองของชั้นส่วนเหล็ก

C = แรงอัดลัพท์

β = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ

เมื่อ I เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยอันดับสอง ซึ่งเส้น A จะเป็นการกระจายประสิทธิภาพของหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตึงจาก ในชั้นรอยเชื่อมของกาวยเชื่อมประสานกับแผ่นเสริม CFRP ที่แรงเฉือนสูงสุด และหน่วยแรงตึงจากนั้น จะได้ $x = 0$ เพราะฉะนั้นจะแสดงโดยสมการ

$$\tau_A^{MAX} = -\frac{1}{b_A} \frac{\lambda \cdot F}{f_2(EA)_S}, \sigma_A^{MAX} = \frac{1}{b_A} \left[\frac{a_3 C_1 \lambda^2}{a_1 \lambda^4 + a_2} + 2\beta^2 C_4 \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ τ_A^{MAX} = ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่บริเวณยึดติดกาวย

σ_A^{MAX} = ค่าหน่วยแรงตึงจากสูงสุดที่บริเวณยึดติดกาวย

การวิเคราะห์แบบจำลองจะประเมินจากระยะจากปลายแผ่น CFRP ที่หลุดล่อนซึ่งจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นตามยาวจากค่าแรงตึง

2.4.2 ทฤษฎีการทำนายอายุความล้า (Fatigue Life Prediction)

Caprino (2000) ได้เสนอการทดสอบโดยการสร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่ากำลังที่ทำให้เกิดความล้าของแผ่น FRP ซึ่งหัวข้อทดสอบคือแรงตึงที่ก่อให้เกิดความล้า แต่ละค่าที่ใช้ในที่นี้จะใช้สำหรับแผ่นประกอบ CFRP ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากสมการ 2.7 ดังนี้

$$f_n = \overline{f_u} - \alpha S_{\max} (1-R)(n^\beta - 1) \quad (2.8)$$

เมื่อ f_n = ค่ากำลังหลังจากให้แรงไป n รอบ (MPa)

$\overline{f_u}$ = ค่ากำลังของวัสดุตั้งต้น (กาวย) (MPa)

$S_{\max}$ = ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)

$S_{\min}$ = ค่าหน่วยแรงเฉือนต่ำสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)

R = stress ratio = $\frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ (%)

n = จำนวนรอบของรอบน้ำหนักบรรทุก

α, β = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ (กาวย)

ให้ N_f เป็นอายุของความล้าของชิ้นส่วนทดสอบ ถ้า $n = N_f$, $f_n = S_{\max}$ ดังนั้น N_f จะหาได้จาก สมการ 2.9

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{\alpha(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.9)$$

ในลำดับต่อมาหาค่า α, β จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากสมการที่ 2.4

$$\alpha(N_f^\beta - 1) = \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right) \quad (2.10)$$

$$\text{ให้ } K = \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right), \text{ เมื่อ } K = \alpha(N_f^\beta - 1) \quad (2.11)$$

ถ้าพล็อตค่า k กับ $N_f^\beta - 1$ กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดเริ่มต้น จะเป็นกราฟที่แสดงลักษณะของกระบวนการถดถอย โดยที่ α คือ ความชันของกราฟ และมีตัวแปรสองค่าในสมการ ส่วนวิธีการลองผิดลองถูกจะนำไปใช้ในการทดลองหาค่า β จนถึง α ซึ่งข้อมูลพื้นฐานของการศึกษานี้คือค่า $\alpha = 0.004$ และ $\beta = 0.39$ ดังนั้นแบบจำลองหาค่าอายุของความล้าของแผ่น CFRP จะสามารถเห็นได้จากสมการ 2.12

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{0.004(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{0.39}} \quad (2.12)$$

2.5 วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)

คอมโพสิตเป็นวัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุชนิดอื่นมาอยู่ด้วยกันโดยมีโครงสร้างในแบบต่าง ๆ เป็นการนำมารวมกันโดยที่เนื้อของคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน มีสมบัติร่วมของวัสดุที่นำมาอยู่ร่วมกันและไม่สามารถหาได้จากวัสดุชนิดเดียวที่มีปัญหาจากการที่สมบัติชนิดหนึ่งจะมีความสัมพันธ์ผกผันกับสมบัติอีกชนิดหนึ่ง

คอมโพสิตประกอบด้วยตัวเสริมความสามารถหรือเรียกว่า Reinforced phase ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย แผ่น หรือเป็นอนุภาคฝังตัวอยู่ในตัวพื้นที่เรียกว่า Matrix ที่เป็นโลหะ เซรามิกส์ หรือโพลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีทั้งข้อดีข้อเสีย เช่น โลหะจะมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่เป็นสนิมง่ายและหนัก โพลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนไม่ได้ นำไฟฟ้าไม่ได้ เซรามิกส์มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอและการผุกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้ดี แต่เปราะ มีความเหนียวต่ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาวัสดุต่างชนิดมา

ผสมกันเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติพิเศษที่ได้จากข้อดีของวัสดุแต่ละชนิด เราเรียกวัดกลุ่มนี้ว่า คอมโพสิต หรือ วัสดุผสม (Composite materials)

เราอาจจะแบ่งกลุ่มวัสดุผสมออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีโพลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Fiber-Reinforced Polymers, FRP) กลุ่มที่มีเซรามิกส์เป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-matrix composite, CMC) และกลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-matrix composite, MMC) นอกจากนี้ เรายังอาจแบ่งตามลักษณะของวัสดุที่เรานำมาผสมกันคือ กลุ่มที่ส่วนผสมเสริมมีลักษณะเป็นผง (Particulate composites) กลุ่มที่มีส่วนผสมเสริมมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous composites) ซึ่งอาจจะแบ่งย่อยออกไปเป็นกลุ่มเส้นใยสั้นและกลุ่มเส้นใยยาว กลุ่มสุดท้ายคือ กลุ่มวัสดุผสมชนิดซ้อนแผ่น (Laminated composites)

โพลิเมอร์เสริมเส้นใย หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งคือ Carbon Fiber Reinforced Polymer วัสดุประเภท CFRP นั้นเป็นวัสดุทางวิศวกรรมขั้นสูงที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมีในอุณหภูมิสูงโดยทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลคาร์บอนเป็นเส้นยาวและมีความแข็งแรงสูง เส้นใย Carbon Fiber มีความสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 10-15 เท่าของเหล็กกล้าที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากัน

วัสดุ CFRP ได้ถูกใช้งานเป็นส่วนประกอบโครงสร้างอากาศยานและยุทโธปกรณ์ทางทหารมายาวนานกว่า 50 ปี เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบาและมีความคงทนถาวรอย่างยิ่ง ในปัจจุบันได้มีการนำ CFRP มาใช้ในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ มากมายเช่นเดียวกับในงานด้านวิศวกรรมโครงสร้างและโยธา ซึ่งได้มีการนำมาใช้เสริมเพิ่มความแข็งแรง ของโครงสร้างและซ่อมแซมความเสียหายจากการรับน้ำหนักเกิน แผ่นดินไหว และแรงกระแทก ฯลฯ

วัสดุ CFRP นั้นมีอยู่หลายประเภท ทั้งแบบเป็นเส้น (Rod) แบบแผ่นหนา (Plate) และแบบแผ่นกระดาษ (Sheet) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งแต่ละประเภทยังจะมีการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน แล้วแต่จุดประสงค์ของการใช้งานแต่ละประเภท เช่น เสาที่เกิดรอยร้าว จะต้องใช้วัสดุ CFRP ประเภทแผ่นกระดาษ (Sheet) ในการซ่อมแซม เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 ประเภทของวัสดุ CFRP (MTEC, 2008)

ในประเทศไทยได้เริ่มมีการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ CFRP ตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2541 โดยมีการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารสถานศึกษา โรงงานอุตสาหกรรม และเสริม

กำลังสะพานด้วยวัสดุ CFRP ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวถือว่าเป็นยุคต้น ๆ ของการใช้วัสดุ CFRP สำหรับงานวิศวกรรมโยธาในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พร้อมกันนั้นก็ได้เริ่มมีการศึกษาวิจัยการประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวในมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ในประเทศไทย ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกในการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตนอกเหนือไปจากวิธีการดั้งเดิม (MTEC, 2008)

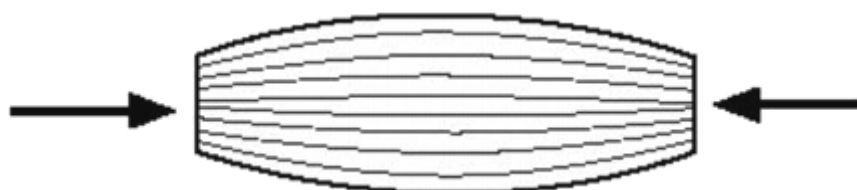
การรับแรงของวัตถุ โดยทั่วไปแรงที่กระทำต่อวัตถุมีด้วยกัน 4 ประเภทคือ

- **แรงดึง (Tension)** ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อคอมโพสิต การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุขึ้นอยู่กับแรงดึงและความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงที่ใช้



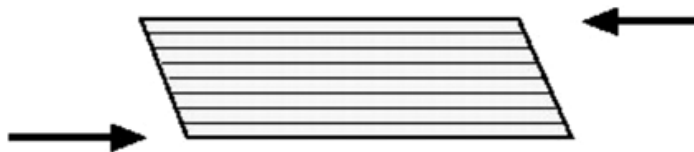
ภาพที่ 2.6 การรับแรงดึง (Tension) ของ CFRP (MTEC, 2008)

- **แรงกดอัด (Compression)** ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด ในสภาพนี้ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับสมบัติความแข็งแรงดิ่ง และการยึดติด (Adhesion) ของเนื้อโพลิเมอร์เป็นหลัก เนื่องจากโพลิเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรงและป้องกันไม่ให้เส้นใยโค้งงอ



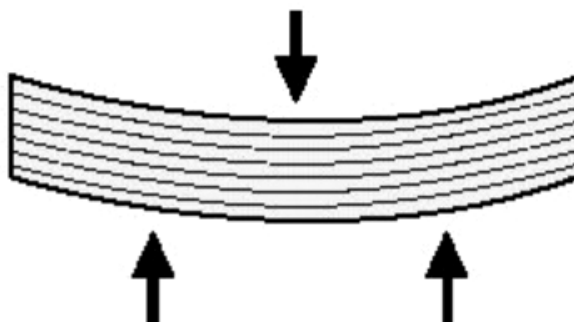
ภาพที่ 2.7 การรับแรงกดอัด (Compression) ของ CFRP (MTEC, 2008)

- **แรงเฉือน (Shear)** ลักษณะแรงที่กระทำต่อคอมโพสิตมีทิศทางตรงข้ามกัน และแนวแรงอยู่ต่างระดับกัน ดังภาพที่ 2.8 ภายใต้สภาวะแบบนี้โพลิเมอร์จะมีบทบาทอย่างมากในเรื่องการยึดติดกับเส้นใยเสริมแรงไม่ใช่ในเรื่องสมบัติความแข็งแรงเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอมโพสิตที่มีการเรียงเส้นใยเสริมแรงเป็นชั้น ๆ



ภาพที่ 2.8 การรับแรงเฉือน (Shear) ของ CFRP (MTEC, 2008)

- **แรงดัด (Flexure)** ลักษณะของแรงที่กระทำกับวัตถุมีลักษณะผสมของแรงดึง แรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน จากภาพที่ 2.9 เห็นได้ว่าการกึ่งกลางของด้านบนของวัตถุถูกแรงกดอัดกระทำ ขณะที่ใต้วัตถุจะถูกแรงยืดและแรงเฉือนจากการยืดตัวของวัตถุ



ภาพที่ 2.9 การรับแรงดัด (Flexure) ของ CFRP (MTEC, 2008)

2.5.1 คุณสมบัติของวัสดุ CFRP

- ความแข็งแรงในการรับแรงดึงสูง (มากกว่าเหล็ก 10 เท่า)
- ไม่เป็นสนิม ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนและสารเคมีได้ดีกว่าเหล็ก
- น้ำหนักเบา
- ติดตั้งได้ง่ายและสะดวก
- ขนาดบาง
- ยึดหยุ่นเข้ากับรูปร่างของโครงสร้างได้ดี
- ใช้อย่างแพร่หลาย

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

- สมบัติของเส้นใยเสริมแรง
- สมบัติของโพลิเมอร์ (เรซิน)
- สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fiber Volume Fraction ; FVF) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพลิเมอร์ ดังนั้นหากคอมโพสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับโพลิเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อ

โพลีเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แฮนด์เลย์อัฟ (Hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณร้อยละ 30-40 แตกต่างจาก ชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่ผลิตด้วย เทคโนโลยีขั้นสูงจะมีสัดส่วนของเส้นใยประมาณร้อยละ 70

- การจัดเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาตั้งแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

2.5.3 ประโยชน์ของวัสดุ CFRP

- เพิ่มกำลังให้กับโครงสร้าง
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง
- เพิ่มความคงทนให้กับโครงสร้าง

2.5.4 ความจำเป็นในการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยใช้วัสดุ CFRP

- เปลี่ยนรูปแบบการใช้งานโครงสร้าง
- การก่อสร้างหรือออกแบบผิดพลาด
- โครงสร้างเสื่อมสภาพ
- เปลี่ยนมาตรฐานการออกแบบ
- ซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายจากแผ่นดินไหว
- ซ่อมแซมโครงสร้างสะพานคอมโพสิต ที่เสียหายจากความล้า

2.5.5 ชนิดของ CFRP ที่ใช้กันโดยทั่วไป

ในการซ่อมแซม หรือเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยใช้วัสดุ CFRP นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- **แบบเป็นเส้น (Rod)** ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นกลม โดยใช้เสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แทนเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ซึ่งวัสดุประเภท CFRP นั้นจะมีกำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าเหล็ก
- **แบบแผ่นกระดาษ (Sheet)** ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นแต่จะมีความหนาไม่มาก สามารถตัด หรือพับได้ง่าย ซึ่งจะใช้เสริมความแข็งแรงในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างเหล็ก ดังแสดง

ในภาพที่ 2.10 ซึ่งวัสดุ CFRP ประเภทนี้จะช่วยในด้านของกำลังรับแรงดึงของโครงสร้าง



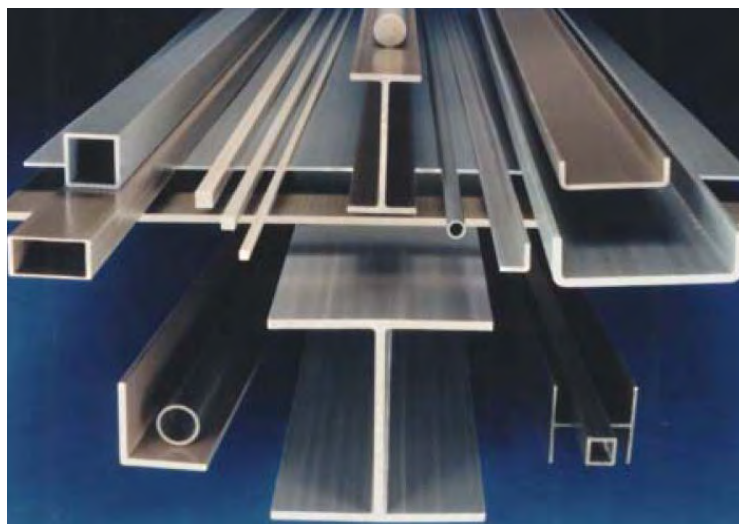
ภาพที่ 2.10 การเสริมความแข็งแรงโดยใช้ วัสดุ CFRP แบบกระดาะ (CFRP laminate)
(Hughes Brothers, 2003)

- **แบบแผ่นหนา (Plate)** ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งมีความหนามากกว่าวัสดุ CFRP แบบกระดาะ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งวัสดุ CFRP ประเภทนี้จะมีการตัด หรือการงอมากกว่าแบบกระดาะ



ภาพที่ 2.11 วัสดุ CFRP แบบแผ่นหนา (Strongwell, 1998)

- **แบบอื่น ๆ** วัสดุ CFRP นั้นยังมีอีกหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นแบบกล่องแบบท่อ แบบเหล็กรูปพรรณต่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งวัสดุ CFRP



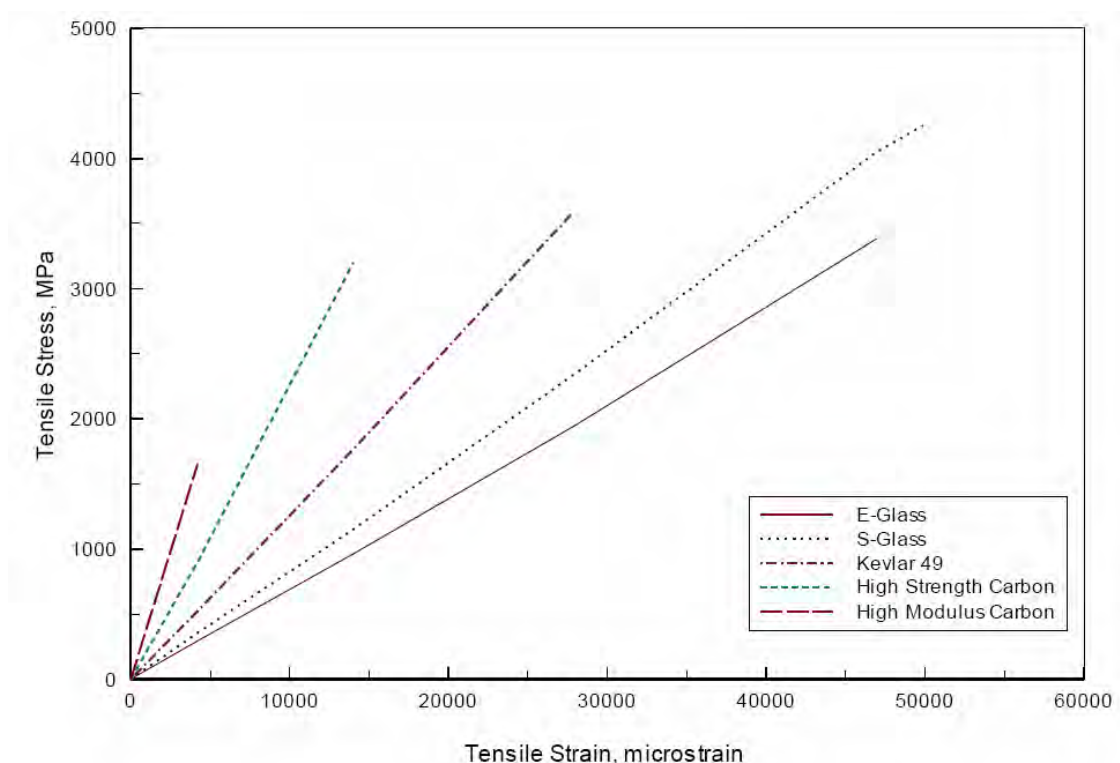
ภาพที่ 2.12 วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ (Strongwell, 1998)

รูปร่างของวัสดุ CFRP นั้นยังสามารถนำรูปแบบต่าง ๆ มารวมกันเพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ยกตัวอย่างเช่น แผ่นพื้นของสะพานเราสามารถนำเอาวัสดุ CFRP แบบแผ่นหนาและแบบกล่องกลวง มารวมกันก็จะสามารถทำให้ได้รูปร่างของแผ่นพื้นดังภาพที่ 2.13 ซึ่งรูปร่างของแผ่นพื้นนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ



ภาพที่ 2.13 วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ นำมารวมเป็นแผ่นพื้น (Aixi Zhou, 2002)

วัสดุประเภทโพลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีกำลังรับแรงดึงดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 กราฟหน่วยแรงและความเครียด (Stress-Strain diagram) ของโพลิเมอร์เสริมเส้นใย

ประเภทต่าง ๆ ภายใต้แรงดึง (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2545)

คุณสมบัติของวัสดุ CFRP หลัก ๆ จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบกระดาด (Sheet , Laminate) (Sika, 2003) และ แบบแผ่นหนา (Plate) (Strongwell, 1998) ที่นำมาพร้อมกับแบบกล่องกลวง ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุเสริมพิเศษ CFRP

วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (N/m ²)	หน่วยแรงดึง (N/m ²)	หน่วยแรงอัด (N/m ²)	Poisson's Ratio
CFRP Composite Deck	1800	1.93×10^{10}	2.07×10^8	2.07×10^8	0.33
CFRP Laminate	1500	16.50×10^{10}	2.80×10^9	-	0.30

2.6 ความรู้พื้นฐานของพลศาสตร์โครงสร้าง (Fundamental of Structural Dynamics)

เนื่องจากขนาด ทิศทางและตำแหน่งของน้ำหนักพลวัตที่กระทำต่อโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับเวลา ของการตอบสนอง (Response) ของโครงสร้าง เช่น การโก่งที่เกิดขึ้นที่แผ่นพื้นทีเวลาใดเวลาหนึ่งเป็นต้น การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์โดยทั่วไป เราจะสมมติให้น้ำหนัก

พลวัตมีรูปร่างลักษณะขนาดและทิศทางที่แน่นอน และการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์และทางสถิตศาสตร์มีข้อแตกต่างกันสองประการคือ ลักษณะของน้ำหนักที่กระทำ และการตอบสนองของน้ำหนักนั้น ๆ

ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์ที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่งคือ การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ส่วนแบบจำลองเชิงวิเคราะห์นั้นจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะจริงของโครงสร้างให้มากที่สุด ซึ่งแบบจำลองเชิงวิเคราะห์นี้อาจจะเป็นของจริงที่ใช้งานอยู่แล้ว โดยทั่วไปแบบจำลองเชิงวิเคราะห์จะประกอบด้วยสามส่วนหลักได้แก่

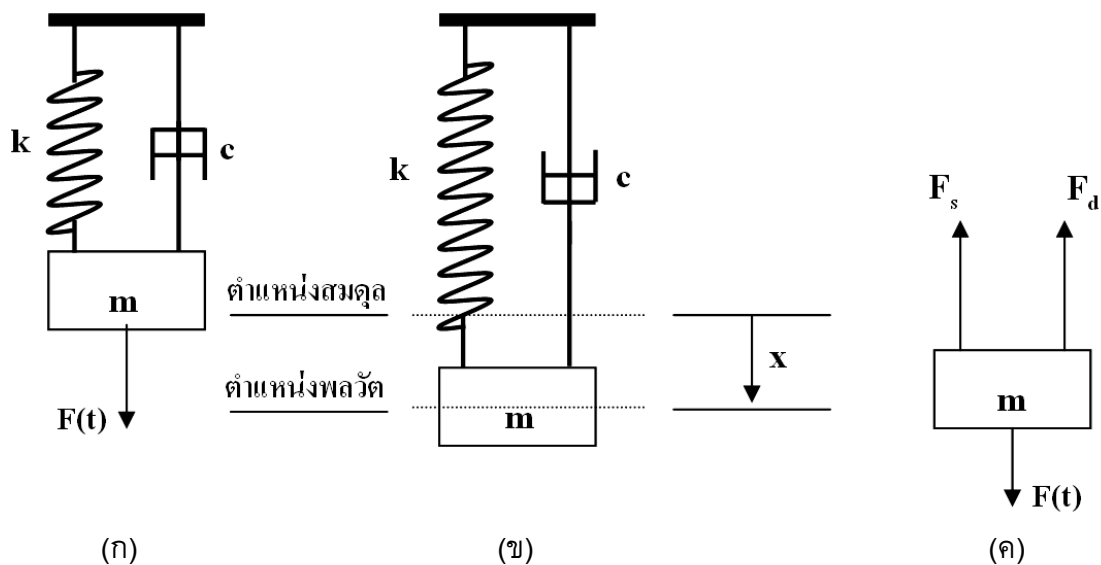
- (1) สมมุติฐานที่จะใช้ในการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับระบบจริง
- (2) แผนภาพที่แสดงให้เห็นการทำงานหรือการเกี่ยวโยงของระบบและ
- (3) รายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ พร้อมทั้งขนาดและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง ของระบบ

ขั้นตอนต่อไปของการวิเคราะห์เชิงพลวัตก็คือ แก๊สมการอนุพันธ์เพื่อหาการตอบสนองทางพลวัตของระบบ ซึ่งแบ่งออกได้สองประเภทหลักคือ การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแบบเสรี (Free vibration) และการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced vibration) การแก๊สมการดังกล่าวจำเป็นต้องแก้ไขสมการเบื้องต้น (Initial condition) และเงื่อนไขบังคับ (Forced condition) จากภายนอก ถ้าระบบสั่นสะเทือนเป็นประเภทแบบเสรีและประเภทสั่นสะเทือนแบบบังคับตามลำดับ และผลเฉลยที่ได้รับก็จะเป็นการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้างซึ่งเรียกรวม ๆ ว่า การตอบสนองเชิงพลวัต (เดช พุทธเจริญทอง, 2542)

2.6.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต

โดยทั่วไปแบบจำลองของระบบโครงสร้างทางพลวัตที่มีระดับความเสรีขั้นเดียว ที่มีแรงพลวัต และไม่มีแรงภายนอกกระทำ การหาสมการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยกฎ และหลักการต่าง ๆ เช่น กฎข้อที่สองของนิวตัน หลักของเดอเลมเบิร์ต วิธีพลังงาน หลักของงานเสมือน และวิธีของลากรองจ์ เป็นต้น

ระบบโครงสร้างทางพลวัตที่มีระดับความเสรีขั้นเดียวจะประกอบด้วยมวล-สปริงและตัวหน่วง (Damper) ภาพที่ 2.15 มวลของระบบจะแทนด้วย m ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) ส่วนที่ยึดหยุ่นของระบบจะแทนด้วยค่าคงตัวสปริง k ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตร (N/m) และตัวหน่วงการเคลื่อนที่จะแทนด้วยค่าคงตัว c หรือเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงชนิดเหลว ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตรต่อวินาที (N/m/s) ส่วน $F(t)$ เป็นแรงที่กระทำที่มวล m (แนวดิ่ง)



ภาพที่ 2.15 แบบจำลองระบบโครงสร้างที่มีระดับความเสรีขึ้นเดียว (ก) ระบบอยู่ในตำแหน่งสมดุล (ข) ระบบอยู่ในตำแหน่งพลวัต และ (ค) แผนภาพเสรีพลวัตของมวล (เดช พุทธเจริญทอง, 2542)

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า ผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลย่อมเท่ากับผลคูณของมวลและความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ จากภาพที่ 2.15 ถ้าให้ x เป็นการกระจัดในแนวตั้งของมวล m โดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$\sum F_x = m\ddot{x} \quad (2.13)$$

จากแผนภาพเสรีพลวัต (Dynamic Free-Body Diagram) ของมวล m ภาพที่ 2.15 ผลรวมของแรงทางซ้ายมือของสมการ (2.1) คือ

$$F(t) - F_s - F_d = m\ddot{x} \quad (2.14)$$

ซึ่ง $F_s = kx =$ แรงต้านของสปริง , $F_d = c\dot{x} =$ แรงต้านของตัวหน่วง
 ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.1) ใหม่ได้ดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.15)$$

ซึ่ง สมการที่ (2.15) เป็นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาอันดับสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงตัว

2.7 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต

ได้มีการพัฒนาสมการเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต ซึ่งได้ใช้ข้อมูลจากทดสอบ และวิเคราะห์โครงสร้างจริง โดยที่สมการนั้นมีความถูกต้องมาก (Barth, 2007) ซึ่งสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้จากสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$f = \lambda^2 f_{sb} \quad (2.16)$$

เมื่อ $\lambda = 1$ (สำหรับจตุรรองรับแบบง่าย)
 $\lambda = 1.25$ (สำหรับจตุรรองรับแบบยึดแน่น – จตุรรองรับแบบหมุน)
 $\lambda = 1.5$ (สำหรับจตุรรองรับแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง)

$$f_{sb} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E_b I_b g}{w}} \quad (2.17)$$

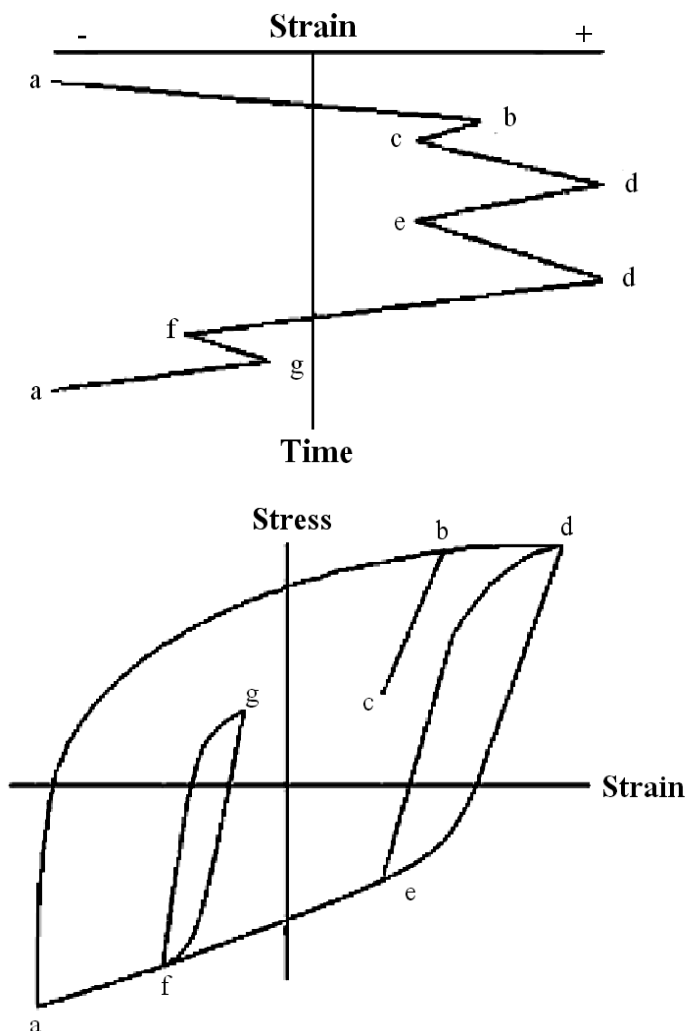
เมื่อ L = ความยาวของช่วงสะพาน (m.)
 g = ความเร่ง (m/s^2) ในที่นี้ใช้ 9.81 m/s^2
 $E_b I_b$ = Flexural rigidity of the composite steel girder (N-m^2)
 w = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวสะพาน (N/m)

โดยการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสมการที่ 2.16 เป็นสมการที่ใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิตชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็ก ชนิดที่มีจตุรรองรับแบบง่ายที่มีความแม่นยำมาก

2.8 วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method)

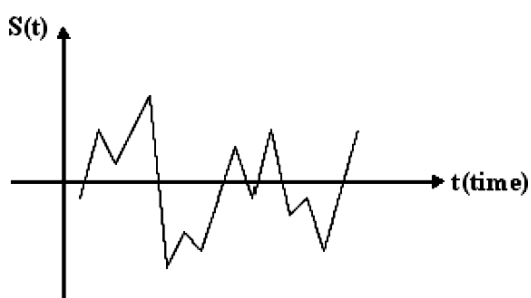
วิธีการนับช่วงหน่วยแรงนั้นได้มีจุดเริ่มต้นมาจากการศึกษาความเสียหายเนื่องจากความล้าของโครงสร้างของยานอวกาศ และเครื่องบิน โดยวิธีการนับที่ใช้ในการนับช่วงของหน่วยแรงที่นิยมใช้วิธีหนึ่งก็คือ วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ซึ่งในขณะนั้นจะทำการนับจำนวนเต็มรอบ หรือครึ่งรอบ ของกราฟค่าความเครียดกับเวลา (Strain-time signals) โดยต่อมาจะนำไปเป็นพื้นฐานในการนับกราฟค่าหน่วยแรงกับความเครียด (Stress-strain) ของวัสดุ (Aridulu, 2004) ในภาพที่ 2.16 แสดงการเสียรูปของวัสดุจากจุด a ไปยังจุด b โดยที่จุด b นั้นจะเกิดการคลายแรงกระทำ ไปจนถึงจุด c เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นที่จุด c ไปจนถึงจุด d วัสดุเมื่อเสียรูปจนถึงจุด b โดยที่วัสดุจะจำรูปแบบการเสียรูปเดิม ตัวอย่าง เช่น

การเสียรูปจากจุด a ไปยังจุด b จะต่อเนื่อง ส่วนการเสียรูปจากจุด a ไปยังจุด d นั้นช่วงระหว่าง b ถึง c จะไม่ต่อเนื่อง



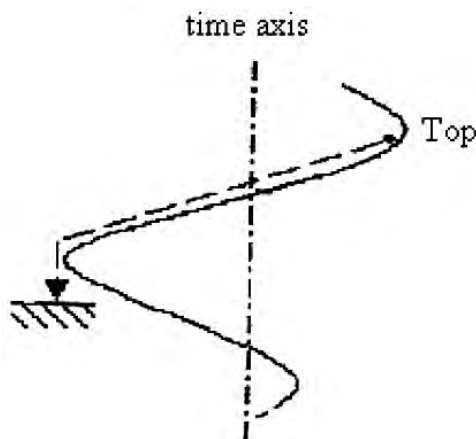
ภาพที่ 2.16 กราฟรอบค่าความเครียดกับเวลา และค่าหน่วยแรงกับความเครียด (Aridulu, 2004)

สัญญาณคลื่นของค่าหน่วยแรง ในบางครั้งค่าหน่วยแรงที่ผ่านแกน x จะไม่เกิดแค่ครั้งเดียว แต่อาจจะเกิดจุดสูงสุดได้หลายครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งจะยากต่อการนับจำนวนรอบของค่าหน่วยแรง



ภาพที่ 2.17 กราฟค่าหน่วยแรงแบบสุ่ม (Aridulu, 2004)

จุดเริ่มต้นของชื่อวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก นั่นคือชื่อวิธีหลังคาพาโกตา (Pagoda Roof) โดยที่แกนตั้งจะเป็นเวลา และค่าหน่วยแรงแบบสุ่มนั้นจะแสดงเหมือนฝนที่ตกลงมาจากหลังคา ซึ่งรูปแบบของการตกนั้นจะแสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กราฟค่าหน่วยแรงที่ตกลงจากจุดสูงสุด (Aridulu, 2004)

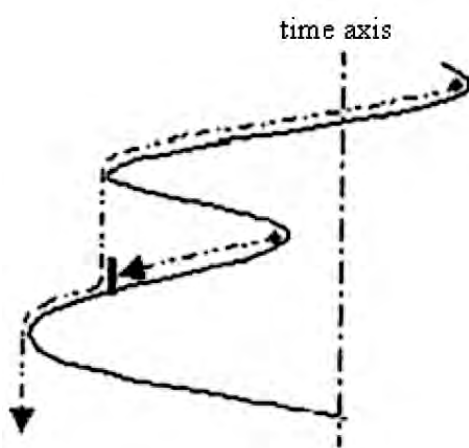
จุดเริ่มต้นของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่อยู่ในแกน โดยที่จุดสูงสุดของค่าหน่วยแรงนั้นเปรียบเหมือนจุดสูงสุดของหลังคา ซึ่งจะอยู่ทางขวาของแกนตั้ง และจุดต่ำสุดของหลังคานั้นจะอยู่ฝั่งซ้ายของกราฟ โดยจากจุดสูงสุดไปยังจุดต่ำสุดจะเหมือนการไหลตกของน้ำ

ถ้าจุดเริ่มต้นของการตก คือ จุดสูงสุด

ก) การตกนั้นจะหยุด ถ้าไปเจอจุดสูงสุดอีกจุดหนึ่ง

ข) มันจะหยุด ถ้าเจอกับส่วนจุดสิ้นสุด และจะตกผ่านไป ดังแสดงในภาพที่ 2.19

ค) การตกนั้นสามารถที่จะตกลงไปยังหลังคาอื่น ๆ และดำเนินการต่อตามข้อ ข)

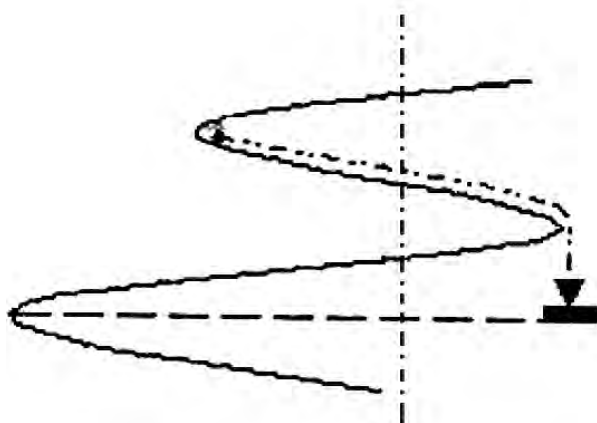


ภาพที่ 2.19 กราฟการตกจากจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง (Aridulu, 2004)

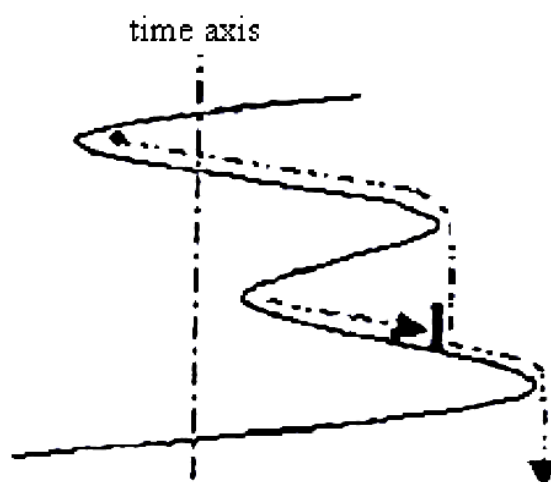
ถ้าจุดเริ่มของการตก เริ่มจาก จุดตรงข้ามจุดสูงสุด

ง) การตกจะหยุดเมื่อการไหลไปเจอกับจุดสิ้นสุด ดังแสดงในภาพที่ 2.20

- จ) การตกจะตกลงจากหลังคาหนึ่งไปยังอีกหลังคาหนึ่ง จนกว่าจะไม่เจอหลังคาอีก ดังแสดงในภาพที่ 2.21
- ฉ) การหยุดสามารถที่จะตกไปยังหลังคาที่อยู่ต่อเนื่องกัน จากข้อ ง) และ ข้อ จ) นั้นความยาวของแกนนอนจากการตก 1 ครั้ง สามารถเปรียบได้กับครึ่งรอบของช่วงแอมพลิจูด (Amplitude)



ภาพที่ 2.20 กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุด (Aridulu, 2004)

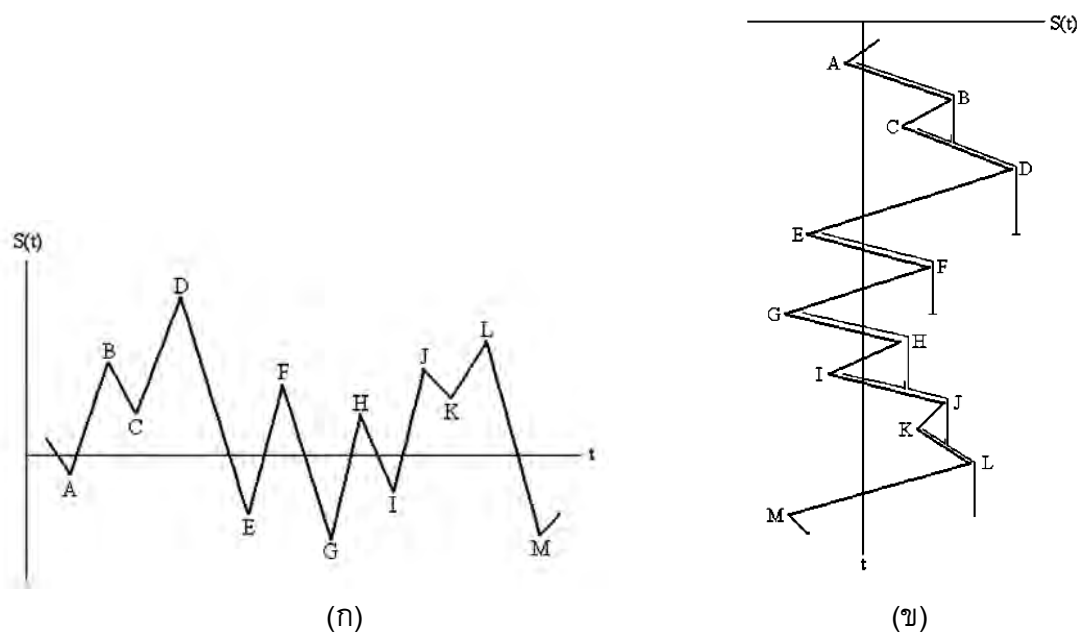


ภาพที่ 2.21 กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง (Aridulu, 2004)

พื้นฐานเริ่มต้นของวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก นั้นจะมีจำนวนรอบแบบสุ่มให้ ดังแสดงในภาพที่ 2.22 (ก) โดยค่าหน่วยแรงนั้นจะมีทั้งจุดสูงสุด และจุดต่ำสุด เมื่อหมุนแกนของ เวลาให้ตั้งขึ้น จะเห็นได้ว่าจุดสูงสุด และจุดต่ำสุดของกราฟค่าหน่วยแรง จะทำให้กราฟมีลักษณะ เหมือนน้ำที่ตกลงมา โดยจะมีขึ้นตอน และวิธีดังนี้

1. จุดเริ่มต้นที่จุดต่ำสุดจะไหลต่อเนื่องลงไป โดยที่จุดต่ำสุดนั้นจะมีค่าน้อยกว่า แกน x จากภาพที่ 2.22 (ข) จะเริ่มจากจุด A และสิ้นสุดที่จุด E

2. ส่วนที่ไหลจะสิ้นสุด เมื่อถึงจุดไม่สามารถที่จะไหลไปได้ ยกตัวอย่างเช่น จุด C เป็นจุดสิ้นสุดของส่วนแรก
3. ส่วนใหม่นั้นจะเริ่มจากจุดสิ้นสุดของส่วนก่อนหน้า
4. จุดต่ำสุดนั้นคือ จำนวนรอบที่นับได้ครึ่งรอบ โดยที่ค่าของช่วงหน่วยแรง S_i ส่วนค่าเฉลี่ย μ_i นั้นจะอยู่ที่จุดศูนย์กลาง
5. ขั้นตอนนั้นจะเริ่มต้นใหม่ เมื่อขั้นตอนการนับนับได้ 1 รอบหรือครึ่งรอบ



ภาพที่ 2.22 กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง (Aridulu, 2004)

ข้อกำหนดในการปฏิบัติ

ขั้นตอนของวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก สามารถอธิบายได้จาก มาตรฐาน ASTM-1049 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการนับจำนวนรอบของค่าความล้า โดยจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

กำหนดให้ X คือช่วงที่พิจารณา

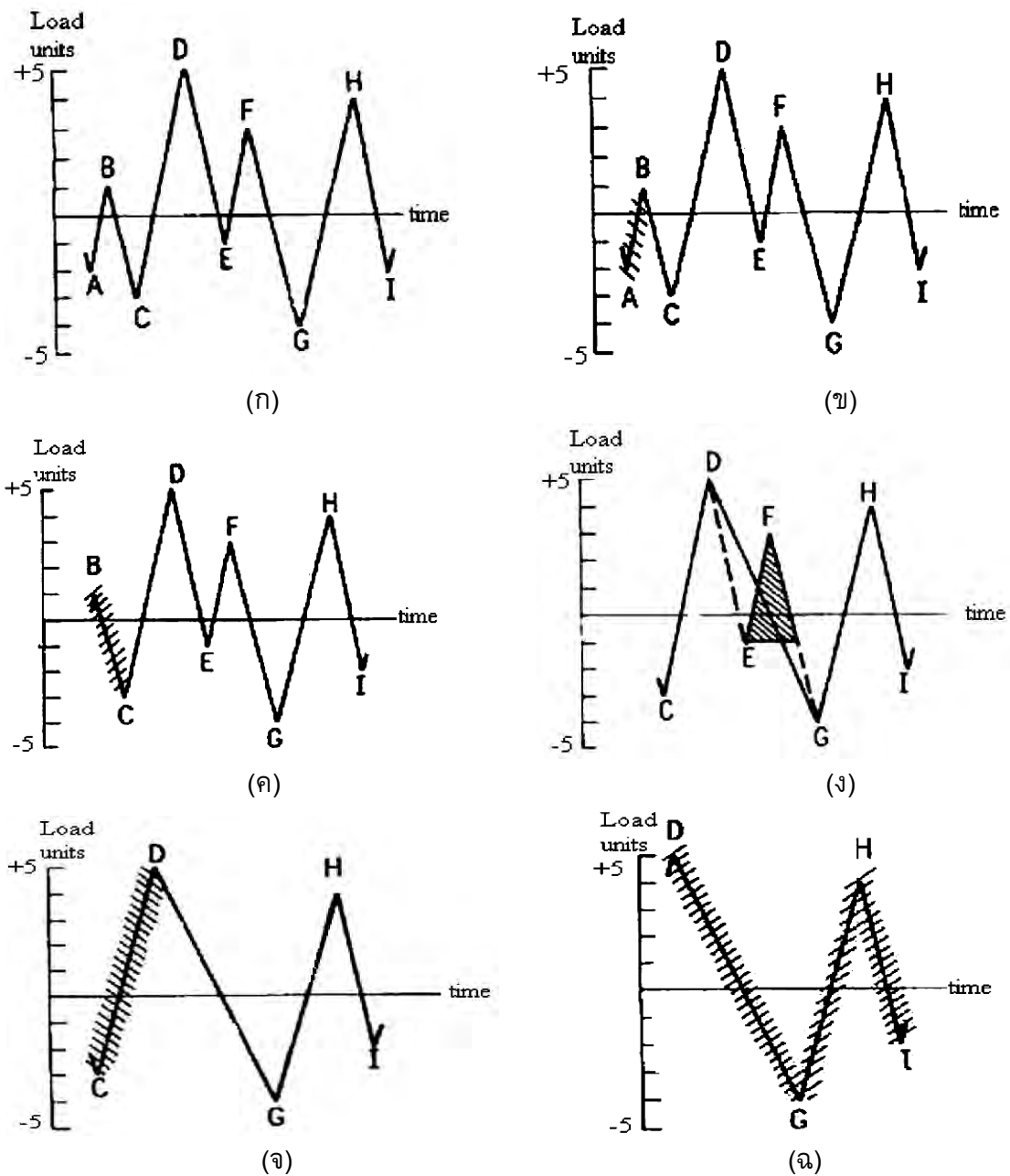
Y คือช่วงที่อยู่ก่อนหน้า ซึ่งติดกับช่วง x

1. อ่านค่าจุดสูงสุด หรือจุดต่ำสุด ถ้าข้อมูลหมดให้ไปขั้นตอนที่ 6
2. ถ้ามีจำนวนจุดน้อยกว่า 3 จุด ให้ไปที่ขั้นตอนที่ 1 ในรูปแบบของช่วง X และ Y จะใช้ 3 ค่าสูงสุด และต่ำสุด ที่ต้องทิ้งไป
3. เปรียบเทียบค่าของช่วง X และ Y
 - ก) ถ้า $X < Y$ ให้ไปขั้นตอนที่ 1
 - ข) ถ้า $X \geq Y$ ให้ไปขั้นตอนที่ 4

4. ถ้าช่วงของ Y เริ่มต้นที่จุด S ไปที่ขั้นตอนที่ 5 อีกอย่างให้นับช่วง Y เป็น 1 รอบ ทั้งค่าสูงสุด ต่ำสุดของ Y และไปยังขั้นตอนที่ 2
5. นับค่าช่วง Y เป็นครึ่งรอบ โดยทั้งจุดที่ 1 (จุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุด) ในช่วงของ Y ย้ายจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่ 2 ในช่วง Y แล้วย้ายไปยังขั้นตอนที่ 2
6. นับบางช่วงที่ไม่ได้อยู่ก่อนหน้า ให้เป็นครึ่งรอบ

ภาพที่ 2.23 จะใช้เป็นตัวอย่างในการนับโดยวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้

1. $S = A$; $Y = |A-B|$; $X = |B-C|$; $X > Y$, Y คือ S ที่จุด A นับช่วง $|A-B|$ เป็นครึ่งรอบ และตัดจุด A ทิ้ง โดยที่ $S = B$ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ข)
2. $Y = |B-C|$; $X = |C-D|$; $X > Y$, Y คือ S ที่จุด B นับช่วง $|B-C|$ เป็นครึ่งรอบ และตัดจุด B ทิ้ง โดยที่ $S = C$ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ค)
3. $Y = |C-D|$; $X = |D-E|$; $X < Y$.
4. $Y = |D-E|$; $X = |E-F|$; $X < Y$.
5. $Y = |E-F|$; $X = |F-G|$; $X > Y$. นับช่วง $|E-F|$ เป็น 1 รอบ โดยที่ตัดจุด E และจุด F ออก ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ง)
6. $Y = |C-D|$; $X = |D-G|$; $X > Y$, Y คือ S ที่จุด C นับช่วง $|C-D|$ เป็นครึ่งรอบ และตัดจุด C ทิ้ง โดยที่ $S = D$ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (จ)
7. $Y = |D-G|$; $X = |G-H|$; $X < Y$.
8. $Y = |G-H|$; $X = |H-I|$; $X < Y$. ข้อมูลหมด
9. นับช่วง $|D-G|$ เป็นครึ่งรอบ นับช่วง $|G-H|$ เป็นครึ่งรอบ และนับช่วง $|H-I|$ เป็นครึ่งรอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ฉ)
10. สิ้นสุดการนับ



ภาพที่ 2.23 ขั้นตอนการนับด้วยวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Aridulu, 2004)

ค่าหน่วยแรงนั้นสามารถที่จะหาได้จากจุดสูงสุดของวงรอบ และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่แสดงต่างในกราฟนั้น สามารถหาได้จาก สมการที่ 2.18

$$(\Delta\sigma_{eff})_i = (\sigma_{max})_i - \sigma_{op} \quad (2.18)$$

เมื่อ $(\sigma_{max})_i$ คือ ค่าหน่วยแรงของรอบรองไปยังจุดสูงสุด

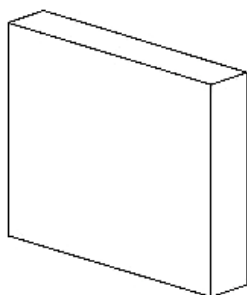
ผลสรุปการนับที่ได้จากภาพที่ 2.23 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงค่าของจำนวนรอบที่นับ ในช่วงต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 จำนวนรอบที่นับจากวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก

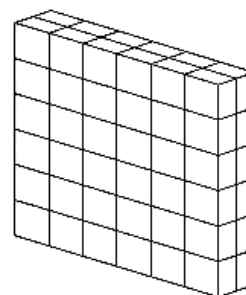
Rang (units)	Cycle counts	Events
10	0	
9	0.5	D – G
8	1	C – D , G - H
7	0	
6	0.5	H – I
5	0	
4	1.5	B – C , E - F
3	0.5	A – B
2	0	
1	0	

2.9 วิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีการไฟไนท์อิลิเมนต์ ที่นิยมเรียกด้วยคำย่อกันว่า FEM ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ กันตามตำแหน่งต่าง ๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนต์ (Elements) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 2.24



(ก) รูปร่างปกติที่มีค่าต่าง ๆ จำนวนอนันต์



(ข) รูปร่างที่แทนด้วยอิลิเมนต์

ภาพที่ 2.24 รูปร่างการแทนด้วยอิลิเมนต์ (Elements) (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

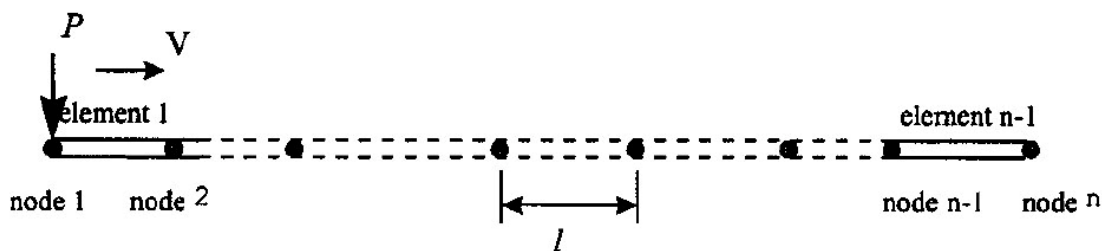
วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละอีลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาอีลิเมนต์ที่ละอีลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละอีลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละอีลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกอีลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น (ปราโมทย์ เตชะอำไพ, 2542)

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของอีลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นนอกจากนั้น ความแม่นยำของผลเฉลย ยังขึ้นอยู่กับการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation function) ที่ใช้กับแต่ละอีลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของอีลิเมนต์อาจสมมุติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง (Linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของอีลิเมนต์

2.10 การจำลองการเคลื่อนที่ของแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว

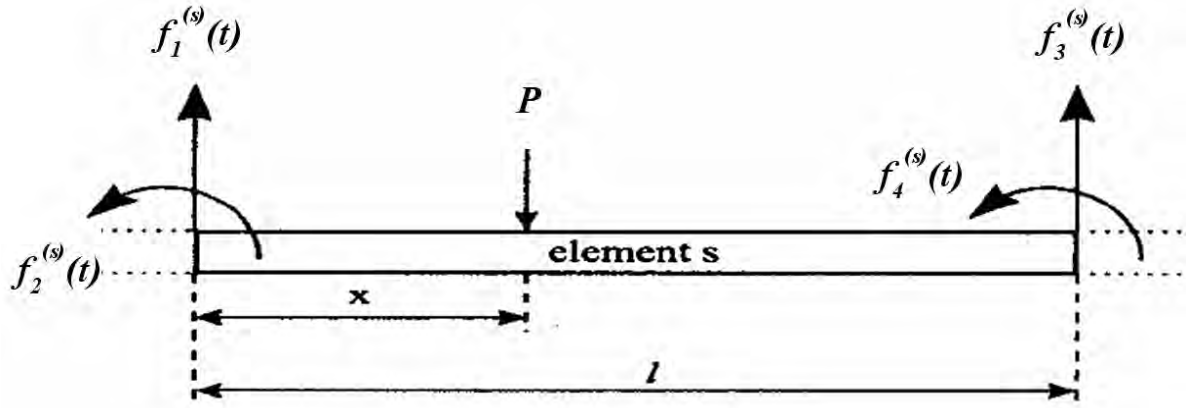
2.10.1 การจำลองการเคลื่อนที่แบบ One-Force Model

ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงหลักการของการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำหนักขบวนรถ โดยยกกรณีรถไฟ โดยจะสมมติให้เพลารถไฟ 1 เพลา มีค่าเท่ากับแรงหนึ่งแรงเคลื่อนที่จาก Node 1 ไปยัง Node 2 ด้วยความเร็วคงที่ V ดังภาพที่ 2.25 (Wu, 2000)



ภาพที่ 2.25 คานที่มีแรงแบบเคลื่อนที่ P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V (Wu, 2000)

ถ้าหากพิจารณาเพียง 1 Element พบว่าแรงที่เกิดขึ้นในอีลิเมนต์ (Element) ภายใต้แรงที่เคลื่อนที่ P สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แรงที่เกิดขึ้นใน Element (Wu, 2000)

เมื่อ $f_1^{(s)}(t)$ และ $f_3^{(s)}(t)$ คือแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละปลายของอีลิเมนต์ ส่วน $f_2^{(s)}(t)$ และ $f_4^{(s)}(t)$ คือโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละปลายของอีลิเมนต์ โดยที่ค่าโมเมนต์ที่ปลายสามารถที่จะไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ ดังนั้นค่าของแรงสามารถหาค่าได้จากสมการข้างล่าง

$$f_1^{(s)}(t) = P \left(1 - \frac{x}{l} \right) \quad (2.19)$$

$$f_3^{(s)}(t) = P \left(\frac{x}{l} \right) \quad (2.20)$$

สมการที่ 2.7 และ 2.8 เป็นตัวอย่างง่ายที่แนะนำ สำหรับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนแรงจาก Node 1 ไปยัง Node i ในภาพที่ 2.26 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.21

$$t_i = \frac{(i-1)\Delta x}{V} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.21)$$

เมื่อ Δx คือความยาวของแต่ละ element, $(x_i - x_{i-1})$ ขณะที่ t_i คือ เวลาที่แรงใช้ในการเคลื่อนที่จาก Node 1 ไปหา Node i และ V คือความเร็ว

2.10.2 หลักการจำลองการเคลื่อนที่แบบ Multi-Force Model

สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของแรงในกรณีที่มีแรงมากกว่า 1 แรง ซึ่งเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของโบกักรถไฟที่มีจำนวนล้อมากน้อยไปตามลักษณะของขบวนรถจึงส่งผลให้มีแรงแบบเคลื่อนที่จำนวนเท่ากับจำนวนล้อ ในกรณีนี้แรงทั้งหมดจะไม่ได้กระทำที่โครงสร้างพร้อม

กันแต่จะกระทำไปตามลำดับของแรงที่มา ก่อนหลัง ตัวอย่างเช่นสมมติให้แรงที่ 1 กระทำที่ Node 1 เมื่อเวลา $t=0$ ดังนั้นแรงที่ 2 จะเคลื่อนที่มากระทำที่ Node 1 ก็ต่อเมื่อเวลาผ่านไป t_2 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Time Delay ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.22

$$t_2 = \frac{s_2}{V} \quad (2.22)$$

เมื่อ V คือความเร็วของแรง และ s_2 คือระยะห่างระหว่างแรงที่ 1 และแรงที่ 2 สำหรับกรณีของแรงที่ 3 ไปจนถึงแรงที่ n ก็สามารถคำนวณหา Time Delay ได้โดยเพียงพิจารณาระยะห่างระหว่างแรงที่พิจารณากับแรงที่ 1 ส่วนความเร็วก็มีค่าคงที่เนื่องจากเป็นขบวนรถไฟเดียวกัน

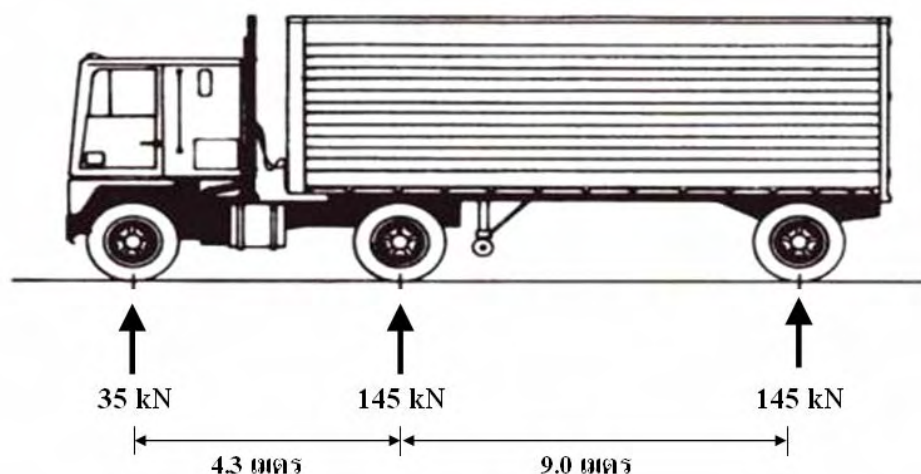
2.11 มาตรฐานในงานโครงสร้างสะพานคอมโพสิต

ในการออกแบบงานสะพานส่วนใหญ่จะใช้มาตรฐาน AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials Standard Specifications for Highway Bridges) ในการออกแบบ ซึ่งสะพานคอมโพสิต ในวิทยานิพนธ์นี้ก็ใช้มาตรฐานนี้ เช่นเดียวกัน

มาตรฐาน AASHTO (AASHTO, 2003) นั้นมีข้อกำหนดต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสะพานคอมโพสิตตั้งแต่น้ำหนักกระทำ ไปจนถึงการคำนวณอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต โดยพิจารณาความล้า (Fatigue) ที่เกิดขึ้นในสะพาน โดยข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบมีดังต่อไปนี้

2.11.1 น้ำหนักบรรทุกจร และปริมาณรถบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการออกแบบสะพานคอมโพสิตจะเป็นน้ำหนักจากรถบรรทุกซึ่งจะมีน้ำหนักกระทำอยู่ 3 เพลา โดยที่น้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในบทความนี้ จะมาจากมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO (HS-20) ดังแสดงในภาพที่ 2.27 ซึ่งจะมีแรงกระทำอยู่ 3 เพลา โดยแต่ละเพลามีน้ำหนักแตกต่างกัน เริ่มจากเพลารแรกที่ด้านหน้ารถจะมีน้ำหนักเท่ากับ 8,000 ปอนด์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 35 กิโลกรัมนิวตัน (kN) เพลที่ 2 จะอยู่ห่างจากเพลารแรก 4.3 เมตร โดยมีน้ำหนักของเพลที่ 32,000 ปอนด์ ซึ่งประมาณ 145 กิโลกรัมนิวตัน และเพลที่ 3 จะมีระยะห่างจากเพลที่ 2 เท่ากับ 9.0 เมตร โดยมีน้ำหนักเท่ากับเพลที่ 2 คือ 145 กิโลกรัมนิวตัน และระยะระหว่างล้อเท่ากับ 1.80 เมตร โดยมีจำนวนรถบรรทุกวิ่งต่อวันต่อช่องทางเท่ากับ 3,000 คัน



ภาพที่ 2.27 รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20 (AASHTO, 2003)

ในการออกแบบสะพานคอมโพสิตโดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุก นั้น จะต้องพิจารณาถึงค่าสัดส่วนการกระแทกเพิ่มเติม (Impact Factor IM) เนื่องจากการพิจารณาโครงสร้างแบบพลศาสตร์ ซึ่งจะต้องพิจารณาเพิ่มในน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีค่าดังแสดงตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าสัดส่วนการกระแทกเพิ่มเติม (Impact Factor, IM) (AASHTO, 2003)

Component	IM (%)
Deck joints – all limit states	75
All other components	
Fatigue and fracture limit states	15
All other limit states	33

ปริมาณรถบรรทุกที่วิ่งในหนึ่งวัน ต่อหนึ่งช่องจราจร ($ADTT_{SL}$) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.23

$$(ADTT)_{SL} = p \times ADTT \quad (2.23)$$

เมื่อ $ADTT$ = Number of truck per day in a single-lane
 p = Fraction of truck traffic in a single-lane

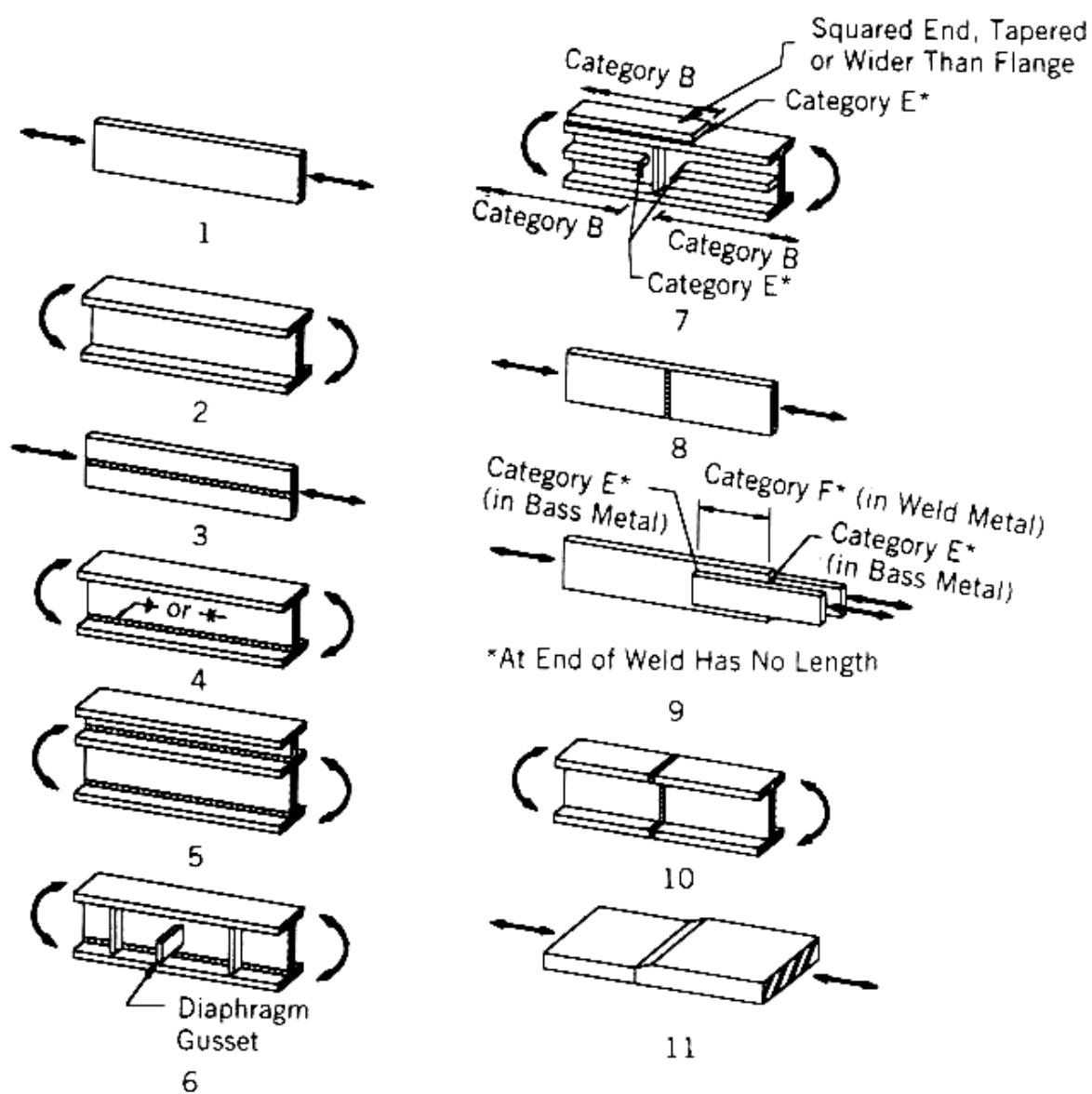
ซึ่งค่า Fraction of truck traffic in a single-lane สามารถหาได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า Fraction of truck traffic in a single-lane, p (AASHTO, 2003)

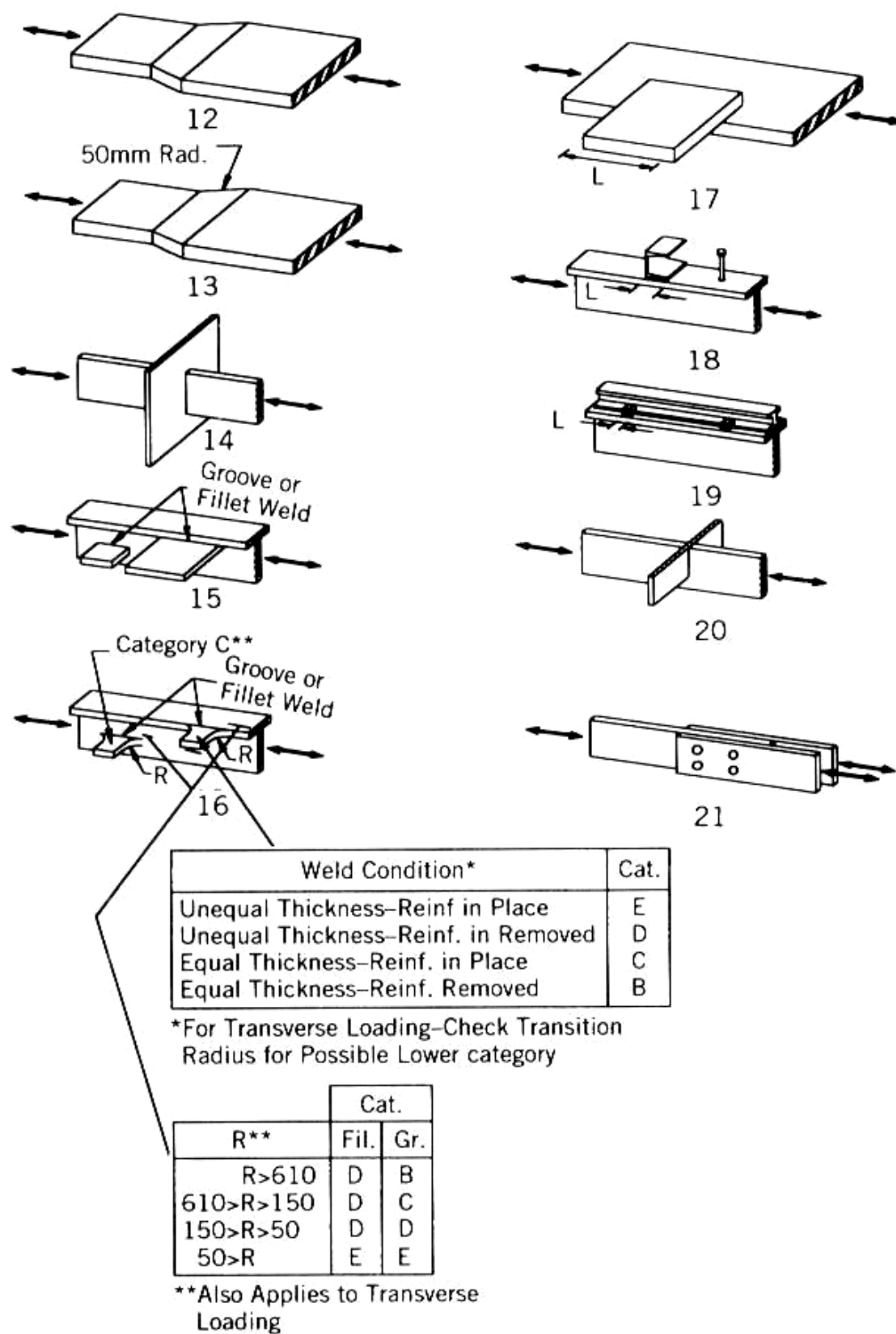
Number of Lanes Available to Trucks	p
1	1.00
2	0.85
มากกว่า 3	0.80

2.11.2 การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิต เพื่อใช้ในการหาอายุของสะพาน

การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิต เพื่อใช้ในการหาอายุของสะพานนั้น จากมาตรฐานของ AASHTO นั้นได้แบ่งสะพานออกเป็น 9 ประเภท ซึ่งจะมีตั้งแต่ประเภท A ไปจนถึงประเภท E' โดยก่อนที่จะแบ่งประเภทนั้นจะต้องพิจารณาว่าสะพานคอมโพสิตนั้นตรงตามข้อกำหนดใด ซึ่งจะมีอยู่ 21 รูป มีหมายเลขของข้อกำหนดนั้นจะเริ่มตั้งแต่ 1 จนถึง 21 ดังที่แสดงในภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 รูปแบบข้อกำหนดของสะพานคอมโพสิตแบบต่าง ๆ (AASHTO, 2003)



ภาพที่ 2.28 รูปแบบข้อกำหนดของสะพานคอมโพสิตแบบต่าง ๆ (ต่อ) (AASHTO, 2003)

เมื่อเลือกรูปแบบของข้อกำหนดได้แล้ว จะต้องนำลำดับของเงื่อนไขของสะพานคอมโพสิตเพื่อไปแยกประเภทตามตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข

2.11.3 การหาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิตตามมาตรฐาน AASHTO

จากมาตรฐานของ AASHTO สามารถหาอายุการใช้งานได้จาก สมการที่ 2.24

$$y = \frac{A}{n(365)(ADTT)_{SL}(\Delta F)_n^3} \quad (2.24)$$

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

เมื่อ A = ค่าคงที่ จากตารางที่ 2.6

n = จำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles

per truck passage) จากตารางที่ 2.6

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

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.25)$$

$$N = n(365)(75)(ADTT)_{SL} \quad (2.26)$$

เมื่อ N = No. of cycles (รอบ)

365 = จำนวนวัน ในหนึ่งปี

75 = จำนวนอายุการใช้งาน ที่ออกแบบโดย AASHTO

$(\Delta F)_{TH}$ = Constant fatigue threshold จากตารางที่ 2.5

$(ADTT)_{SL}$ = Single-lane ADTT จากสมการที่ 2.23

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ A และ Constant fatigue threshold (AASHTO, 2003)

ประเภท	Constant A ($\times 10^{11}$ MPa ³)	Fatigue Threshold (MPa)
A	82.0	165
B	39.3	110
B'	20.0	82.7
C	14.4	69.0
C'	14.4	82.7
D	7.21	48.3
E	3.61	31.0
E'	1.28	17.9

ตารางที่ 2.6 ค่า Number of stress range cycles per truck passage (AASHTO, 2003)

Longitudinal Members	ความยาวสะพาน	
	≥ 12 เมตร	≤ 12 เมตร
Simple-span girders	1.0	2.0
Continuous girders		
1. Near interior support	1.5	2.0
2. Elsewhere	1.0	2.0
Cantilever girders	5.0	
Trusses	1.0	

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

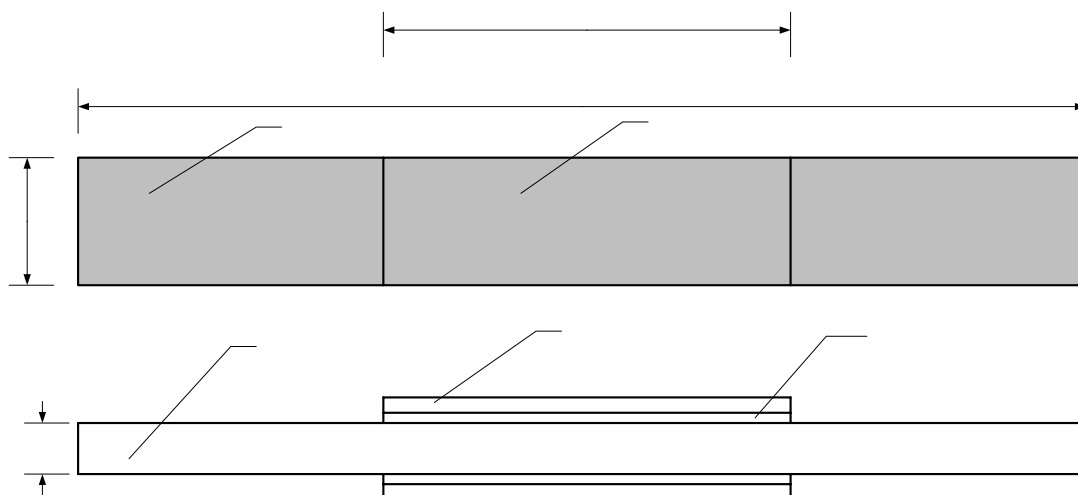
3.1 พฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

ข้อมูลชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงข้อมูลจากบทความที่มีผลการทดสอบชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มาแล้ว และได้ลงตีพิมพ์ในวิชาการระดับนานาชาติคือ “Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates” โดย Bocciarelli et al. (2009) ซึ่งภายในบทความมีข้อมูลและรูปแบบการวิบัติของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ทำการทดลอง ขนาดของชิ้นส่วน คุณสมบัติของวัสดุ คุณสมบัติของกาวที่ใช้ยึดติดระหว่างแผ่น CFRP กับเหล็ก รวมทั้งความหนา ความยาว พื้นที่หน้าตัดของแผ่น CFRP ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีประโยชน์มากในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ นอกจากนี้ผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP อันได้แก่ ความหนาของชิ้นกาว ความหนาของแผ่น CFRP และช่วงหน่วยแรงกระทำ ตามลำดับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในการจำลองชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ในโปรแกรม ABAQUS 6.5-1 และที่สำคัญอย่างยิ่งจะอธิบายเทคนิคในการจำลองปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของการยึดติดกันระหว่างแผ่น CFRP และแผ่นเหล็กโดยใช้ Element ชนิดพิเศษที่เรียกว่า Cohesive Element ซึ่งถ้าหากการจำลองการปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงแล้วจะทำให้สามารถทำนายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเหล็กและกาวได้ ซึ่งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการจะถูกนำไปใช้ต่อในการทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ต่อไป ภาพที่ 3.1 แสดงถึงขนาดของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

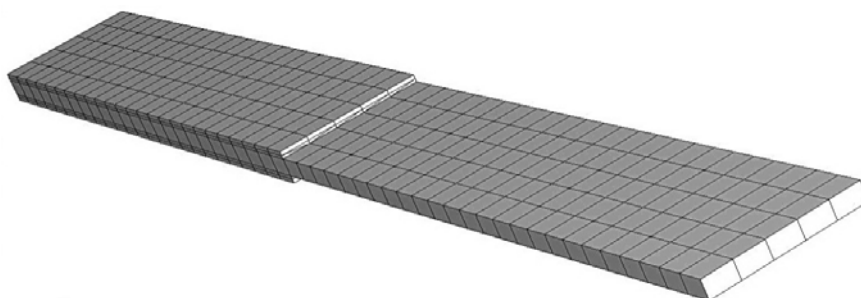
สำหรับการกำหนดเงื่อนไขจตุรรองรับ (Boundary Condition) ในแบบจำลองนั้น เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของปัญญานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นการจำลองเพียงครั้งเดียวของความชื้นส่วนทั้งหมดทำให้ต้องกำหนด Boundary Condition ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของทั้งแผ่นเหล็ก กาว และแผ่น CFRP โดยยอมให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะแนวตั้ง (แกน X ไม่เคลื่อนที่) ส่วนที่ตำแหน่งปลายอีกด้านหนึ่งกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (แกน Y ไม่เคลื่อนที่)

ถ้าหากพิจารณาลักษณะของการสร้างแบบจำลองโดยใช้คุณสมบัติของความสมมาตรในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเพียงครั้งเดียวนั้น มีเหตุผลเพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ เนื่องการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ และมีคุณสมบัติแบบไร้เชิง

เส้นของกาวมาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นแบบจำลองในการศึกษานี้จะทำการศึกษาแบบ 2 มิติ เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองแบบ 2 มิติ ผู้ศึกษาได้สร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ ขึ้นมาแล้วทำการวิเคราะห์ผลและนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ 2 มิติ ก่อนในเบื้องต้น ภาพที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของชิ้นส่วนหลักที่ใช้ในการศึกษา



ภาพที่ 3.1 มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง (ไม่ได้มาตราส่วน)



ก) แบบ 3 มิติ



ข) แบบ 2 มิติ

ภาพที่ 3.2 แบบจำลองของชิ้นส่วนหลักที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 คุณสมบัติของ Element ที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลอง

Element ชนิด CPE4R ใช้ในการจำลองชิ้นส่วนเหล็กและแผ่น CFRP เนื่องจาก element นี้เป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะจำลองชิ้นส่วนเหล็กแบบ 2 มิติ และ element ชนิดนี้เป็น plane strain element โดยคำนึงถึงค่าอัตราส่วนปัวส์ซองและค่าความเครียดที่ทำให้ทราบถึงการวิบัติของชิ้นส่วน

Element ชนิด COH2D4 ใช้ในการจำลองการที่ยึดระหว่างแผ่น CFRP ซึ่ง COH2D4 เป็น Element ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด ด้วยชั้นบาง ๆ คล้ายกาว หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อ Element ชนิดนี้ได้รับแรงกระทำแล้วจะสามารถคำนวณหาจุดเริ่มต้นของความเสียหายใน Element การขยายตัวของความเสียหาย (Propagation of Damage) จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

ในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ เทคนิคการจำลองปฏิสัมพันธ์ของการยึดติดกันระหว่างผิวของแผ่น CFRP กับ ผิวของคอนกรีต โดยใช้ Cohesive Element การใส่น้ำหนัก และ ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ดังนี้

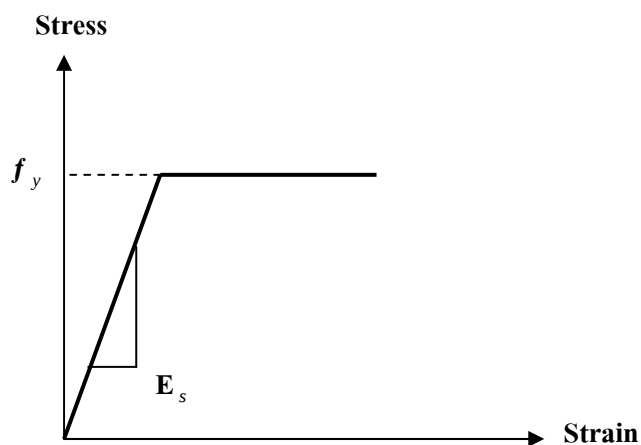
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงชนิดของ Element ที่ใช้ในแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็ก

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

3.1.2 พฤติกรรมของวัสดุ (Material constitutive behavior)

แบบจำลองชิ้นส่วนเหล็ก (Steel model)

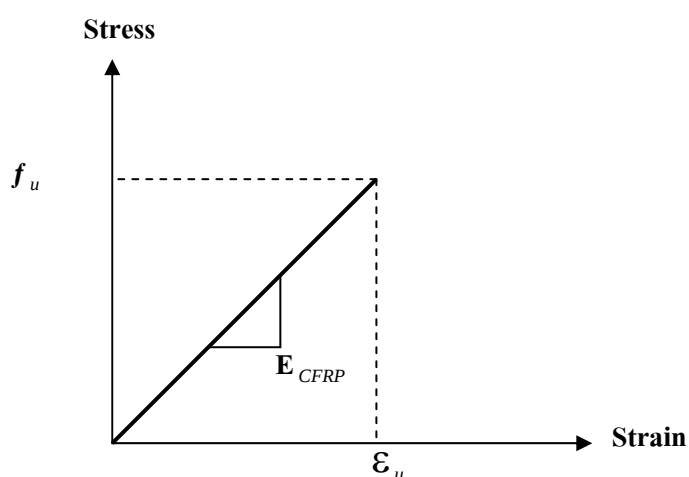
การจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กจะสมมติให้มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic Perfectly Plastic (ดูภาพที่ 3.3) โดยเหล็กเมื่อได้รับแรงดึงจะมีพฤติกรรมแบบ Elastic จนกระทั่งถึงจุด Yield หลังจากนั้นเหล็กจะเกิดการครากภายใต้แรงกระทำที่คงที่ ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (E^s), อัตราส่วนปัวส์ซอง (V), และ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (f^y)



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็ก

แบบจำลองแผ่น CFRP (CFRP model)

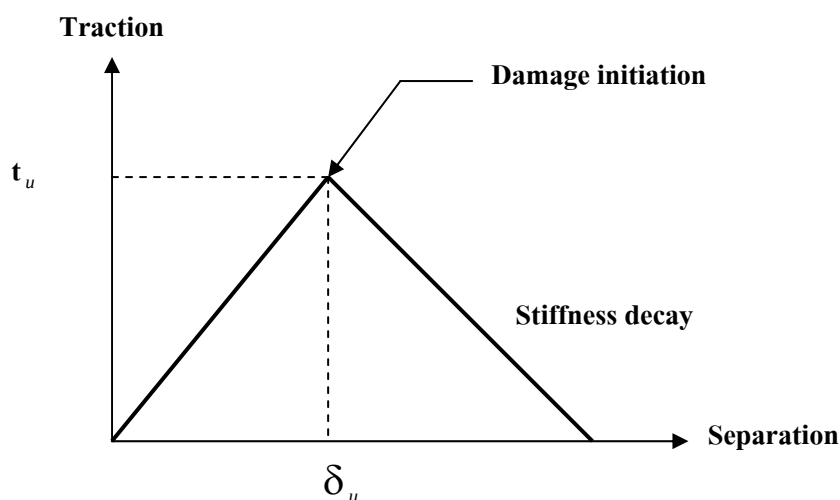
การจำลองพฤติกรรมของแผ่น CFRP โดยเมื่อแผ่น CFRP ได้รับแรงดึงจะมีพฤติกรรมแบบ elastic จนกระทั่งถึงความเครียดที่จุดประลัย (ϵ_u) (ดูภาพที่ 3.4) ณ จุดนี้ ที่แผ่น CFRP จะเริ่มฉีกขาด นั้นหมายถึงความสามารถในการรับแรงดึงจะลดลงเป็นศูนย์ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นสำหรับ CFRP model คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่น CFRP (E^{CFRP}), อัตราส่วนปัวส์ซอง (ν) และความเครียดที่จุดประลัย (ϵ_u)



ภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแผ่น CFRP

3.1.3 เทคนิคการจำลองปฏิสัมพันธ์ของการยึดติดกันระหว่างแผ่นCFRPและผิวคอนกรีตโดยใช้ cohesive element

Cohesive Element เป็น Element ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด ด้วยชั้นบาง ๆ คล้ายกาว หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความหนาแน่นน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อ Element ชนิดนี้ได้รับแรงกระทำแล้วจะสามารถคำนวณหาจุดเริ่มต้นของความเสียหายใน Element การขยายตัวของความเสียหาย (Propagation of Damage) จนกระทั่งเกิดการวิบัติในบริเวณของ Interface (Failure of the Bonded Interface) โดยพฤติกรรมของ Interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น หลังจากนั้น Element จะมีค่าความเสียหายใน Element จะมีค่าเพิ่มขึ้นในรูปแบบของเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 3.5 พฤติกรรมที่กล่าวมาข้างต้นเรียกว่า Linear Element Traction Separation Behavior จากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่า Cohesive Element สามารถนำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณ Interface ระหว่างผิวด้านรับแรงดึงของแผ่นเหล็กกับแผ่น CFRP ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.5 Linear element traction separation behavior ของ cohesive element

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง FE

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	อย่างน้อย 2800 MPa
2.	วัสดุเสริมแรง (CFRP)	หนา 1.4 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร	200 GPa	0.2	อย่างน้อย 2800 MPa
3.	วัสดุเชื่อมประสาน (Thixotropic epoxy resin)	หนา 1.1 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร	12.84 GPa	0.3	อย่างน้อย 30.2 MPa

3.2 การศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์

การดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้มเหลวของสะพานคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS นั้นจะมีขั้นตอนเริ่มต้น คือ การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของสะพานคอมโพสิตแล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นจากโปรแกรม ABAQUS ก่อน โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากสมการที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 หลังจากนั้นก็จะทำการศึกษาถึงผลของทิศทาง และจำนวนช่องจราจรที่วิ่งผ่านสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ก่อนว่ารูปแบบใดจะส่งผลให้เกิดค่าหน่วยแรงมากที่สุด โดยมีกรณีของน้ำหนักรถบรรทุกวิ่งตามช่องทางจราจรที่ศึกษา ดังนี้

- 1) รถบรรทุกวิ่ง 1 ช่องจราจร
- 2) รถบรรทุกวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทิศทางเดียวกัน)
- 3) รถบรรทุกวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทิศทางตรงข้ามกัน)

ภายหลังจากที่ได้ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP แล้ว เราก็จะเลือกใช้เฉพาะลักษณะการวิ่งของรถบรรทุกที่จะก่อให้เกิดค่าหน่วยแรงที่สูงที่สุดในการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย

CFRP ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังที่จะพิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัวไอ ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต หลังจากวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์แล้วจะทำให้ได้ค่าหน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นในคานรูปตัวไอ ซึ่งค่าหน่วยแรงนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาช่วงของหน่วยแรง (Stress range) ที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก ซึ่งช่วงของหน่วยแรงที่ได้จะสามารถนำไปใช้คำนวณหาการตอบสนองของความล้า (Fatigue cycle) ที่โครงสร้างสามารถรับได้ต่อไป

ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการศึกษาพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้น โดยความเสียหายเริ่มต้นของสะพานที่จะศึกษาได้แก่ การที่สะพานมีรอยร้าว ชนิดความลึกเท่ากันตลอดความกว้างคาน (Through thickness crack) 2 ขนาดคือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่บริเวณปีกกลางบริเวณกึ่งกลางของคานเหล็กรูปตัวไอ ของสะพานคอมโพสิต ทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และชนิดที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งกระบวนการศึกษาก็จะทำเช่นเดียวกับสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้นทุกประการ นอกจากนี้ตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพานเช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัว I และรูปแบบการเสริมกำลังก็จะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย ทั้งนี้กรณีศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กรณีศึกษาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้

รูปแบบของสะพาน		ไม่มีรอยร้าวที่คานเหล็ก			มีรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ที่คาน			มีรอยร้าว 6 มิลลิเมตร ที่คาน		
		ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate	CFRP deck	ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate	CFRP deck	ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate	CFRP deck
3 Girders	1 lane	/								
	2 lanes (ทางเดี่ยว)	/								
	2 lanes (สวนทาง)	/	/	/	/	/	/	/	/	/
5 Girders	1 lane	/								
	2 lanes (ทางเดี่ยว)	/								
	2 lanes (สวนทาง)	/	/	/	/	/	/	/	/	/

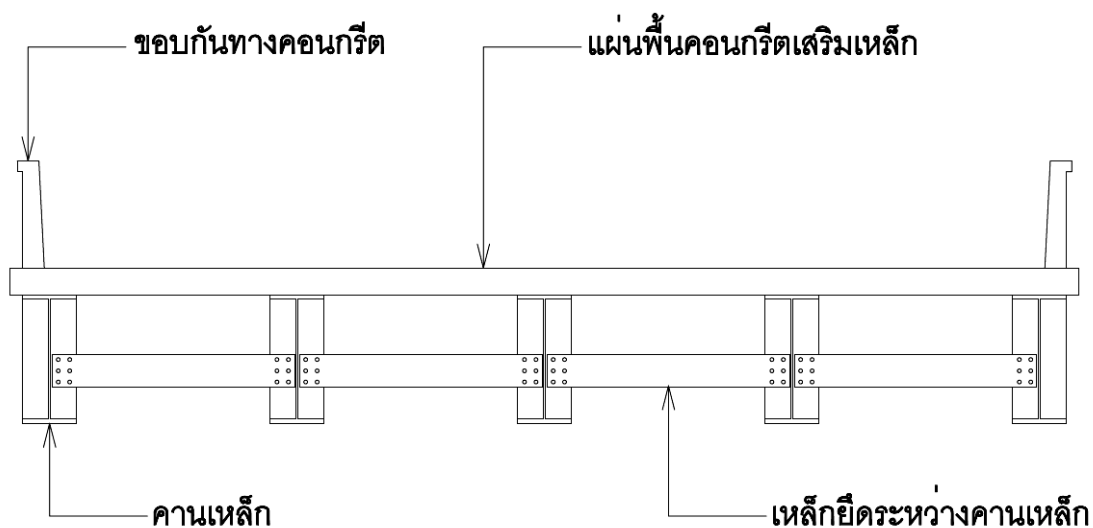
3.2.1 คุณสมบัติของสะพานคอมโพสิตที่ทำการศึกษา

สะพานคอมโพสิตที่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้เป็นสะพานต้นแบบที่ถูกออกแบบขึ้นเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกขนาด HS-20 ตามมาตรฐาน ASSHTO โดยที่รายละเอียดการออกแบบแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งสะพานคอมโพสิตนี้ได้ออกแบบเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุก

ของรถบรรทุกที่ 3,000 คันต่อวัน ความยาวของสะพานคอมโพสิต 1 ช่วง ที่ใช้ในการวิเคราะห์ นั้น มีความยาวระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 18 เมตร มีจุดรองรับเป็นแบบง่าย (Simply support) ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต มีดังนี้

- 1) แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce concrete deck)
- 2) คานเหล็ก (I-Beam girder)
- 3) เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm)
- 4) ขอบกันทางคอนกรีต (Concrete Barrier)
- 5) วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP)

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของสะพานคอมโพสิตแบบพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็ก แสดงให้เห็นดังภาพที่ 3.6



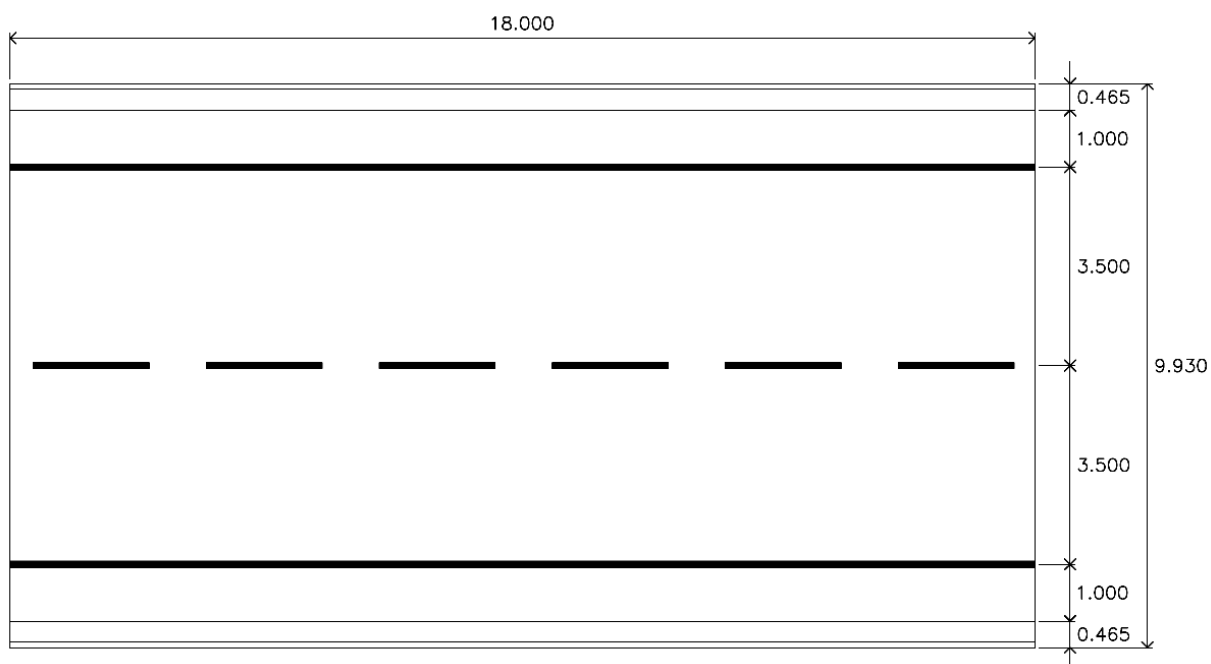
ภาพที่ 3.6 ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต

โดยที่แต่ละส่วนจะมีคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติของวัสดุแต่ละประเภท ดังนี้

ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติวัสดุ

▪ แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

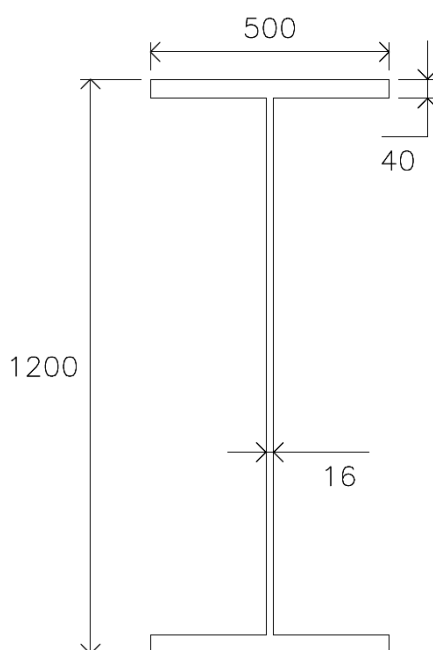
แผ่นพื้นของสะพานคอมโพสิตชนิด steel girder ที่ใช้ในบทความนี้เป็นสะพานคอมโพสิตมีความยาวตลอดช่วงเท่ากับ 18 เมตร และมีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 25 เซนติเมตร เสริมเหล็กสองชั้น ใช้เหล็ก RB9@0.10 เมตร โดยแบ่งออกเป็น 4 ช่องทางจราจร คือ 2 ช่อง ทางเดินรถยนต์ กว้าง ช่องละ 3.50 เมตร และ 2 ช่องทางเดินรถขนาดเล็ก กว้าง ช่องละ 1.00 เมตร รวมความกว้างทั้งหมดของสะพาน คือ 9.93 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ระยะการแบ่งเลน และความยาวของช่วงสะพาน (หน่วย เมตร)

▪ คานเหล็ก

คานเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเหล็กรูปพรรณชนิดปีกกว้าง (Wide Flange) ประเภท 1200WB455 มาตรฐานออสเตรเลีย มีความกว้างทั้งหมด 0.50 เมตร ลึก 1.2 เมตร ความกว้างของปีก 4 เซนติเมตร และความกว้างของเอว 1.6 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.8

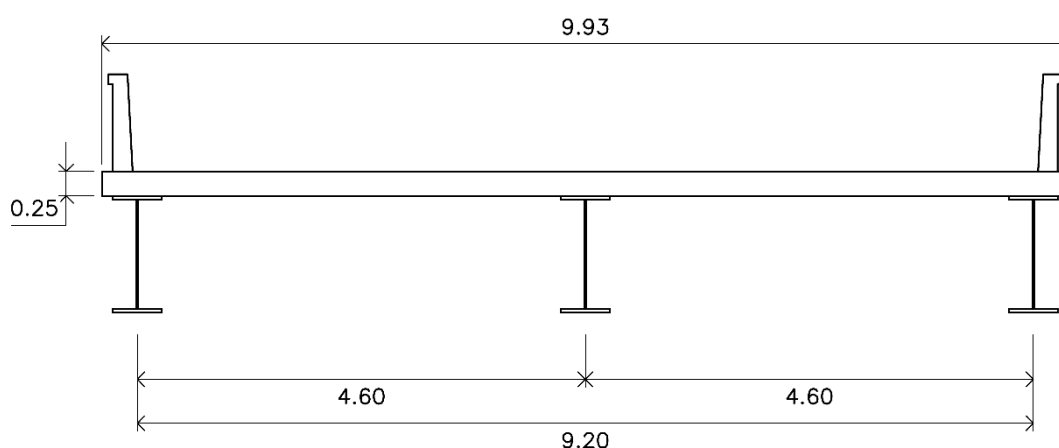


ภาพที่ 3.8 รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)

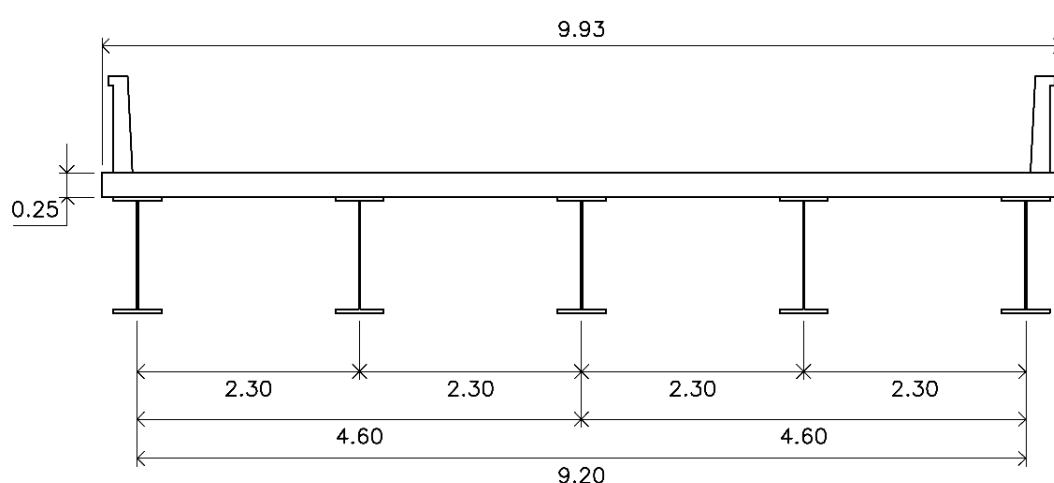
เนื่องจากความยาวของสะพานมากเกินไป หน้าตัดเหล็กรีดร้อนทั่วไปออกแบบไม่ผ่านตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงเลือกหน้าตัดประเภท Build up section ชนิด 1200WB455 ในการออกแบบสะพานเพราะเป็นหน้าตัดที่พอเพียงเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกในการออกแบบ

ในการสร้างแบบจำลองที่พิจารณาจะพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนของคานเหล็กอยู่ 2 กรณี คือ มีคานเหล็ก 3 ตัว และมีคานเหล็ก 5 ตัว โดยที่ระยะห่างของคานเหล็กในแบบจำลองของสะพานเท่ากับ 4.60 และ 2.3 เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.9

ในการเลือกพิจารณาแบบจำลองสะพานที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว เนื่องจากต้องการทราบถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานที่มีจำนวนคานเหล็กไม่เท่ากัน



(ก) สะพานคอมโพสิต ที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) สะพานคอมโพสิต ที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 3.9 ระยะห่างของคานเหล็ก (หน่วย เมตร)

▪ เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm)

สะพานคอมโพสิต จะมีเหล็กเพื่อยึดคานเหล็กไว้ด้วยกัน ซึ่งจะยึดอยู่ที่ด้านข้างทุกตัว โดยจะยึดที่จุดรองรับ และกึ่งกลางของช่วงความยาวสะพาน หรือเท่ากับระยะ 9 เมตร จากจุดรองรับ โดยมีความกว้างเท่ากับ 0.30 เมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร

▪ วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP)

โพลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีอยู่ 2 ประเภท คือ CFRP Laminate และ CFRP composite deck

แบบแผ่นกระดาดโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP Laminate) นั้น จะมีความหนา 1.4 มิลลิเมตร เป็นผลิตภัณฑ์ของซิก้า (Sika) รุ่น Sika CaboDur โดยในแบบจำลองนั้นจะใช้ร่วมกับกาว (Cohesive) ซึ่งจะมีความหนา 3 มิลลิเมตร ตามขั้นตอนการใช้งาน ผลิตภัณฑ์ของซิก้า (Sika) รุ่น SikaDur -30 (Sika, 2003)

แบบพื้นกลวงโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP composite deck) นั้นจะเลือกใช้ CFRP ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมกลวงขนาดกว้าง ยาว และสูง เท่ากับ 25 เซนติเมตรหนา 1.0 เซนติเมตร มาประกอบกับ CFRP ที่เป็นแบบแผ่นหนา ซึ่งจะอยู่ที่ผิวบน และผิวล่าง โดยทั้งผิวบนและผิวล่าง จะมีความหนาเท่ากัน คือ 1.0 เซนติเมตร โดย CFRP ทั้งหมดที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของสตรองเวล (Strongwell) รุ่น EXTERN (Strongwell, 1998)

▪ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของสะพาน นั้นจะแบ่งออกเป็น คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก และวัสดุเสริมพิเศษ โดยคุณสมบัติของวัสดุจะแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของคอนกรีต และเหล็ก

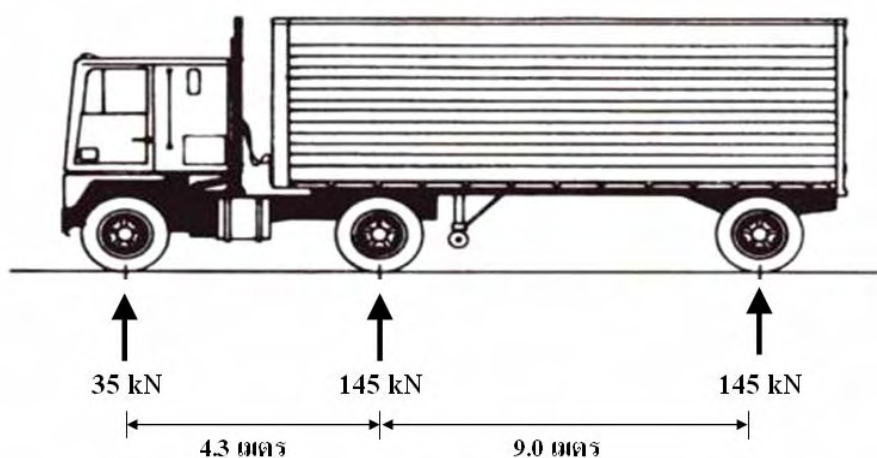
วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	โมดูลัสยืดหยุ่น (N/m^2)	Poisson's Ratio
คอนกรีต	2400	2.86×10^{10}	0.20
เหล็ก	7850	20.00×10^{10}	0.30

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย และกาว (Sika, 2003) และ(Strongwell, 1998)

วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	หน่วยแรงดึง (MPa)	หน่วยแรงอัด (MPa)	Poisson's Ratio
CFRP Composite Deck	1800	19.3	207	207	0.33
CFRP Laminate	1500	165	2800	-	0.30
วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	หน่วยแรงดึง (MPa)	Shear Strength (MPa)	-
กาว (Cohesive)	1770	12.8	33	18 - 20	-

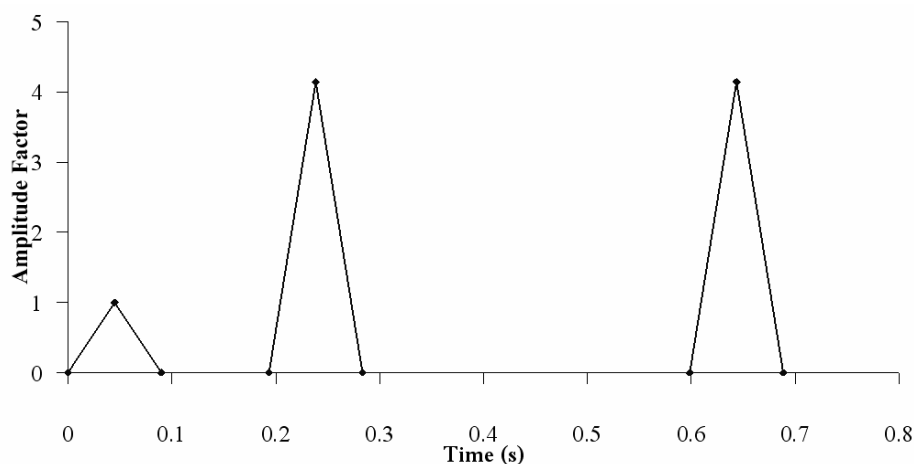
3.2.2 น้ำหนักบรรทุกทุก และการใส่น้ำหนักบรรทุกทุกในโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

น้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในแบบจำลองของสะพานนั้น จะเป็นรถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO (HS-20) ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งจะมีแรงกระทำอยู่ 3 เพลา โดยแต่ละเพลาก็จะมีน้ำหนักแตกต่างกัน เริ่มจากเพลารแรกที่ด้านหน้ารถจะมีน้ำหนักเท่ากับ 8,000 ปอนด์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 35 กิโลกรัมนิวตัน เพลาที่ 2 จะอยู่ห่างจากเพลารแรก 4.3 เมตร โดยมีน้ำหนักของเพลาร 32,000 ปอนด์ หรือประมาณ 145 กิโลกรัมนิวตัน และเพลารที่ 3 จะมีระยะห่างจากเพลารที่ 2 เท่ากับ 9.0 เมตร โดยมีน้ำหนักเท่ากับเพลารที่ 2 คือ 145 กิโลกรัมนิวตัน และระยะระหว่างล้อเท่ากับ 1.80 เมตร (AASHTO, 2003)



ภาพที่ 3.10 รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20 (AASHTO, 2003)

ในการใส่แรงที่เป็นน้ำหนักบรรทุกทุกในโปรแกรมนั้น จะต้องหากราฟ ซึ่งมาจากน้ำหนัก 3 เพลา หรือ 3 แรง ของรถบรรทุก โดยพิจารณา ตั้งแต่เริ่มเข้ามาในสะพานจนกระทั่งน้ำหนักวิ่งออกจากสะพาน ดังแสดงในภาพที่ 3.11 โดยจะพิจารณาการวิ่ง 1 ช่องจราจร และ 2 ช่องจราจร



ภาพที่ 3.11 กราฟน้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับแบบจำลอง

การวิ่งของรถบรรทุกบนสะพานจะพิจารณาอยู่ 3 กรณี คือ การวิ่งแบบ 1 ช่องจราจร การวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน) และการวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน) โดยแสดงให้เห็นดังภาพที่ 3.12

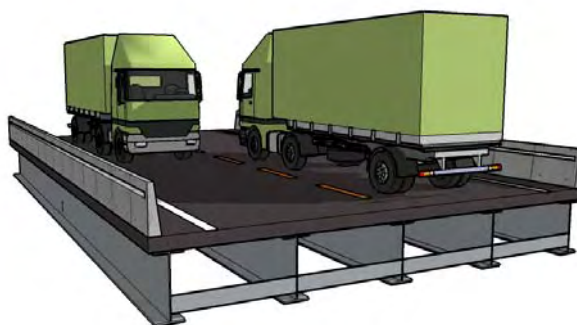


(ก) กรณีการวิ่งแบบ 1 ช่องจราจร



(ข) กรณีการวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)

ภาพที่ 3.12 กรณีศึกษาของน้ำหนักบรรทุกทุก

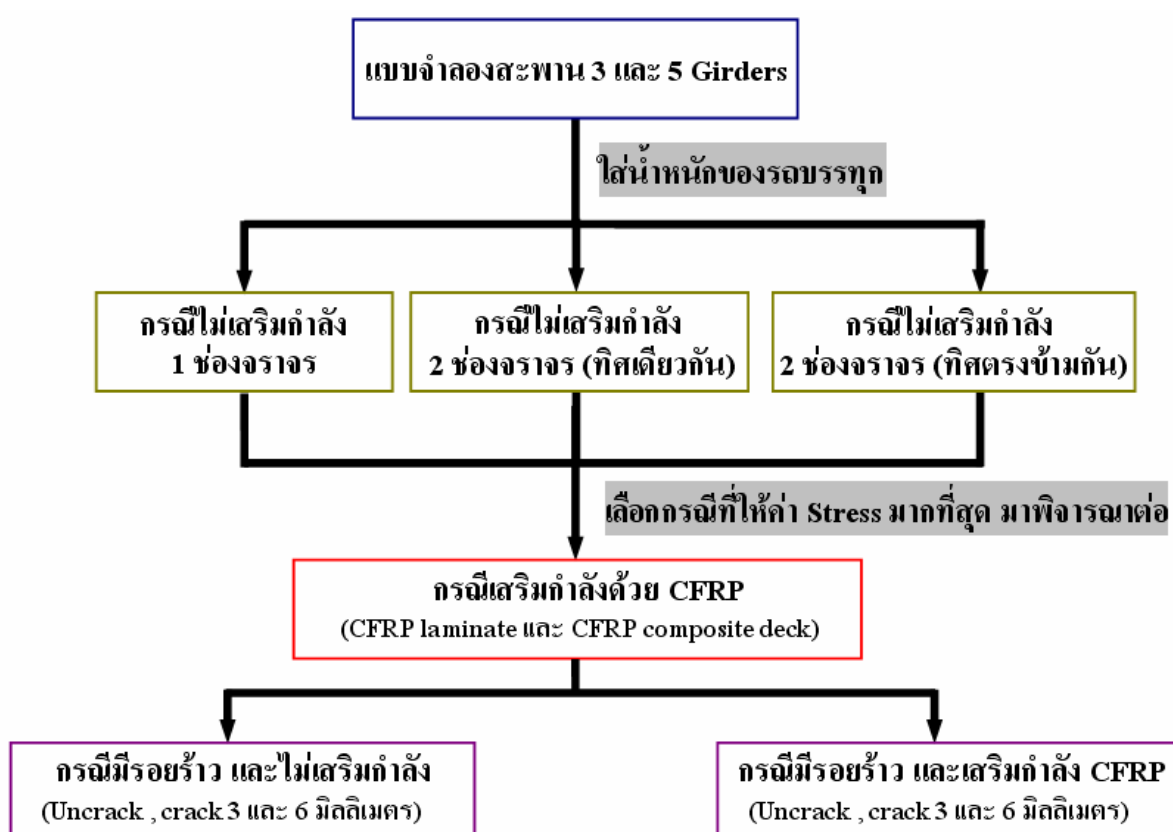


(ค) กรณีการวิ่งแบบ 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)

ภาพที่ 3.12 กรณีศึกษาของน้ำหนักบรรทุกทุก (ต่อ)

3.2.3 กรณีศึกษาของสะพานคอมโพสิต

กรณีศึกษาสะพานคอมโพสิตได้แบ่งออกเป็น ขั้นตอนในการพิจารณา ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนในการศึกษาแบบจำลอง

ขั้นตอนดังกล่าวจะแบ่งได้ออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 กรณีศึกษาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย กรณีที่ 2 จะทำการพิจารณาต่อโดยใช้กรณีของน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้ค่าหน่วยแรงมากที่สุด ซึ่งก็คือน้ำหนักบรรทุกทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร ซึ่งกระทำกับแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย FRP และในกรณีที่ 3 พิจารณาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้นเกิดขึ้น โดยมีขนาดของรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร ทั้งกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง และกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทั้ง 3 กรณี จะเป็นผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ และความล้าของสะพานคอมโพสิต ซึ่งผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด ส่วนผลการตอบสนองความล้า นั้นคือ อายุการใช้งาน หรืออายุความล้า และจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งบนสะพาน

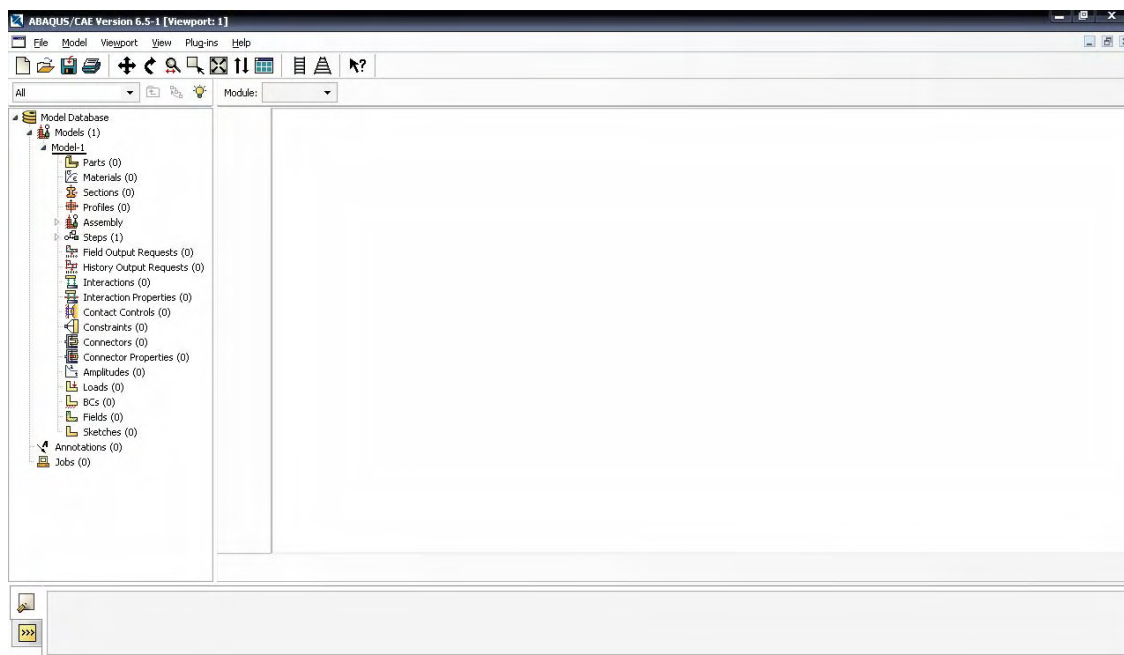
3.2.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS

การวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานคอมโพสิต จะใช้โปรแกรม ABAQUS ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะมีรายละเอียดในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

รูปแบบของโปรแกรม และรายละเอียดการใช้งาน

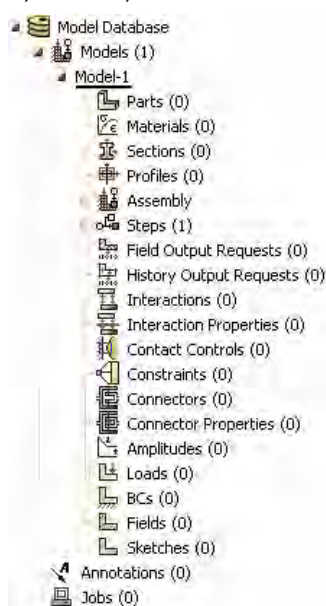
ในตัวโปรแกรมจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method) ขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ (Analysis Method) และขั้นตอนแสดงผลการวิเคราะห์ (Output Method) โดยในแต่ละส่วนจะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- **ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method)** จะเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ใส่คุณสมบัติของวัสดุ ใส่ข้อกำหนด ใส่แรงกระทำ และการสร้างไฟล์ข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ในส่วนของ ขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยรูปร่างหน้าตาของตัวโปรแกรมนั้น ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 รูปแบบของส่วนโปรแกรมในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method)

จากภาพที่ 3.14 จะใช้คำสั่งด้านซ้ายมือของรูปในการสร้างแบบจำลอง โดยส่วนประกอบของคำสั่งนั้นจะแสดงดังภาพที่ 3.15 ซึ่งจะมีคำสั่งที่สำคัญดังนี้ Parts , Materials , Sections , Profiles , Assembly , Steps , Field-History Output Requests , Interactions , Contact Controls , Constrains , Connectors , Amplitude , Loads , BCs , Fields , Sketches และ Jobs



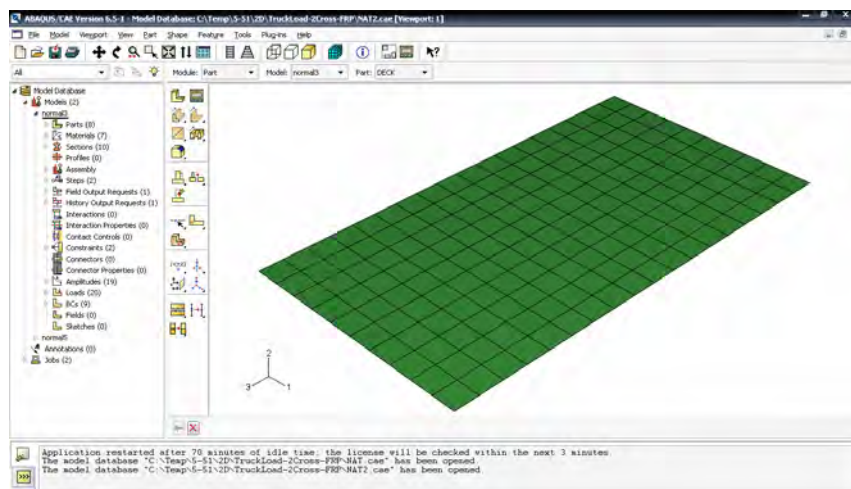
ภาพที่ 3.15 คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

จากภาพที่ 3.15 ในการสร้างแบบจำลองของสะพานนั้น จะมีขั้นตอนการสร้างจากคำสั่งต่าง ๆ ดังนี้

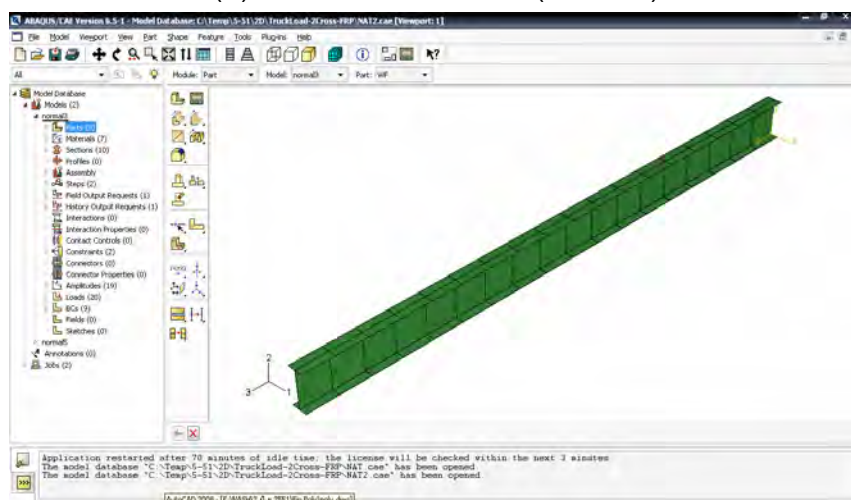
Parts จะเป็นการสร้างส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองขึ้นมา โดยในการสร้างแบบจำลองของสะพานนั้นจะมี Part อยู่ทั้งหมด 6 Parts คือ พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Slab) คานเหล็ก (Steel girder) เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm) แผ่นวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP laminate) กาว (Cohesive) และ วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย ชนิดแผ่นพื้นกลวง (CFRP composite deck) โดยในแต่ละ Parts นั้นจะแสดงในภาพที่ 3.16 ในการสร้าง Parts นั้นเราจะต้องเลือกกว่าจะให้ Parts มีรูปแบบใด เช่น 2 มิติ หรือ 3 มิติ และใช้รูปแบบการสร้างต่าง ๆ ที่อยู่ในคำสั่ง Parts ในการสร้างแบบจำลองขึ้นมา ซึ่งแต่ละ Part ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนั้นจะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 Element type ของแต่ละ Part

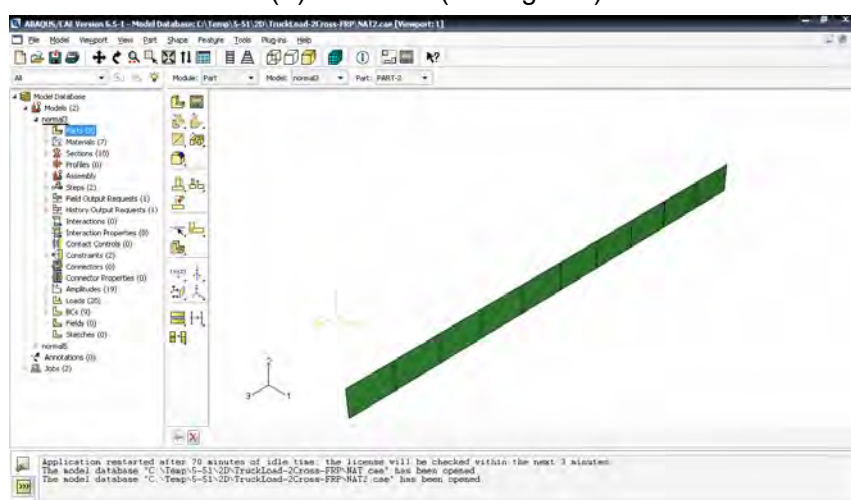
Part	Element type
RC Slab	Shell element (S4R)
Steel girder	Shell element (S4R)
Diaphragm	Shell element (S4R)
CFRP laminate	Solid element (C3D8R)
Cohesive	Cohesive element (COH3D8)
CFRP composite deck	Shell element (S4R)



(ก) พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Slab)

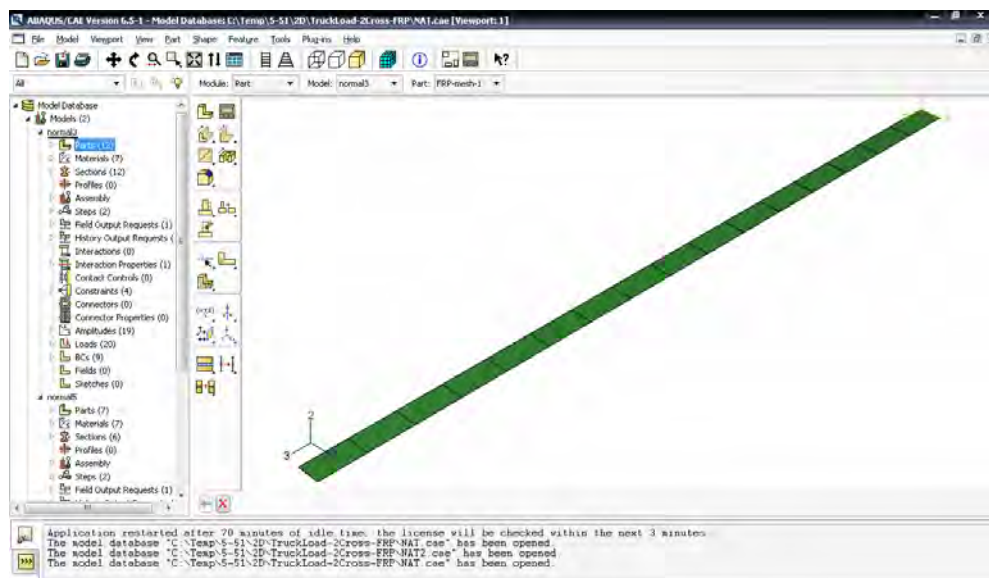


(ข) คานเหล็ก (Steel girder)

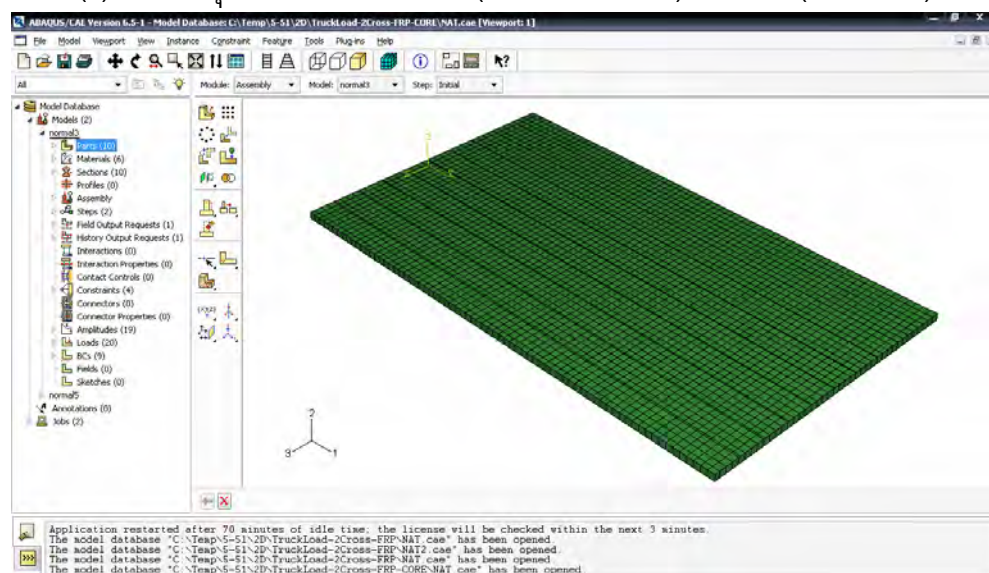


(ค) เหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก (Diaphragm)

ภาพที่ 3.16 ส่วนต่าง ๆ ของ Parts ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต



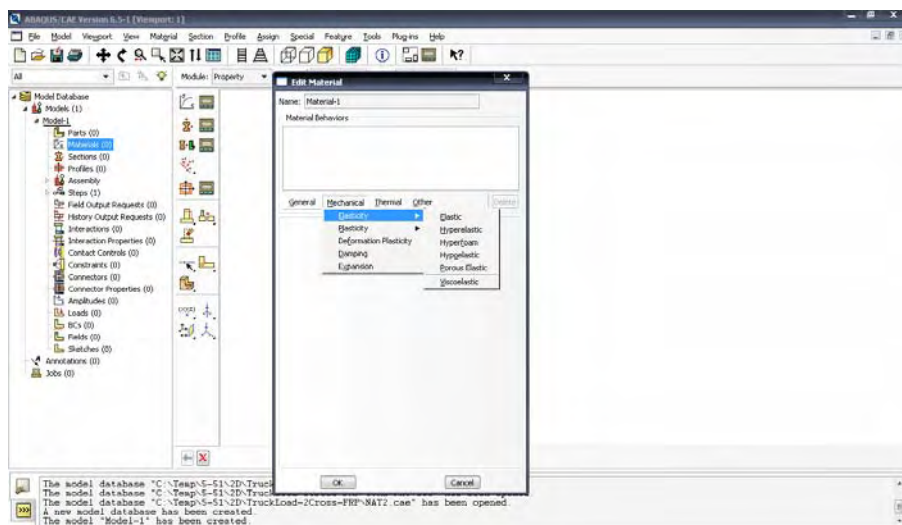
(ง) แผ่นวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (CFRP laminate) และกาว (Cohesive)



(จ) วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ชนิดแผ่นพื้นกลาง (CFRP composite deck)

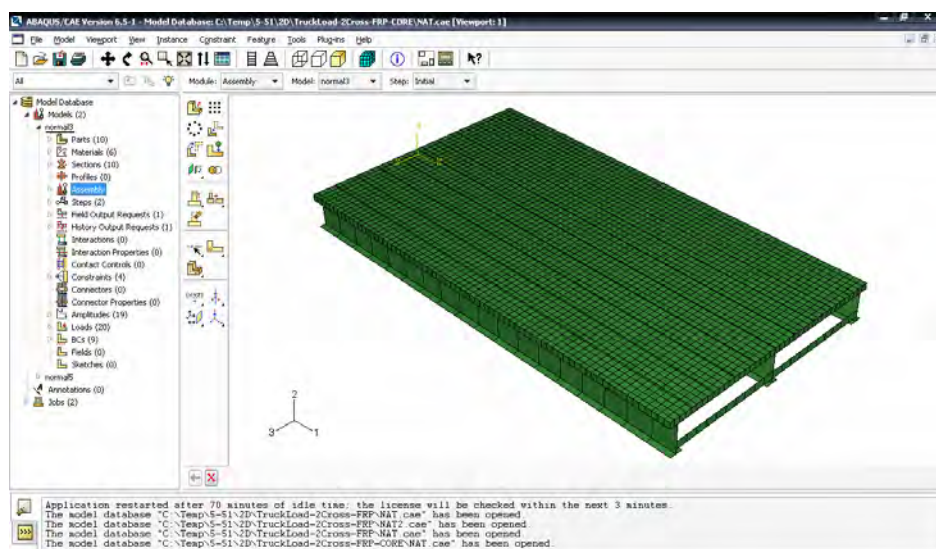
ภาพที่ 3.16 ส่วนต่าง ๆ ของ Parts ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต (ต่อ)

Materials จะเป็นการสร้างคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อที่จะนำไปแทนใน ส่วนของ Parts โดยรูปแบบของการใส่คุณสมบัติต่าง ๆ นั้นดังแสดง ในภาพที่ 3.17 โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ นั้นดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5



ภาพที่ 3.17 การใส่คุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลอง

Assembly เป็นการนำ Parts แต่ละชิ้นที่ได้ทำการสร้างไว้ มารวมกันจนเป็นแบบจำลองของโครงสร้าง ซึ่งในวิชานิพนธ์นี้จะได้รูปแบบของสะพานดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แบบจำลองที่นำแต่ละ Parts มารวมกันใน Assembly

Constrains เป็นคำสั่งข้อกำหนดที่ใส่ในแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น การยึดติดกันของแต่ละ Parts ในแบบจำลอง ก็จะใช้คำสั่ง constrains ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนั้นการยึดติดกันของแต่ละ part นั้นจะทำการยึดติดกันด้วยการยึดติดแบบยึดแน่น (Tie) ซึ่งจะมีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยึดกับคานเหล็ก คานเหล็กที่ยึดกับ Diaphragm คานเหล็กที่ยึดกับกาว และกาวที่ยึดกับ CFRP laminate

Loads เป็นคำสั่งในการใส่แรงกระทำในแบบจำลอง ทั้งแรงกระทำแบบคงที่ และแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว โดยแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนี้จะกำหนดแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว

BCs เป็นคำสั่งที่ใส่ Boundary condition ในแบบจำลองซึ่งก็คือ จุดรองรับ โดยแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตจะเป็นจุดรองรับแบบง่าย (Simple Support)

Jobs เป็นคำสั่งในการนำ code ของแบบจำลองไปใช้ในส่วนขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ (Analysis Method) ซึ่งไฟล์จะมีนามสกุลเป็น .inp

- ข้อกำหนดพื้นฐานที่ใส่ในแบบจำลอง ส่วนของข้อกำหนดพื้นฐานที่จะใส่ให้กับแบบจำลอง นั้นมีอยู่ 2 อย่าง คือ

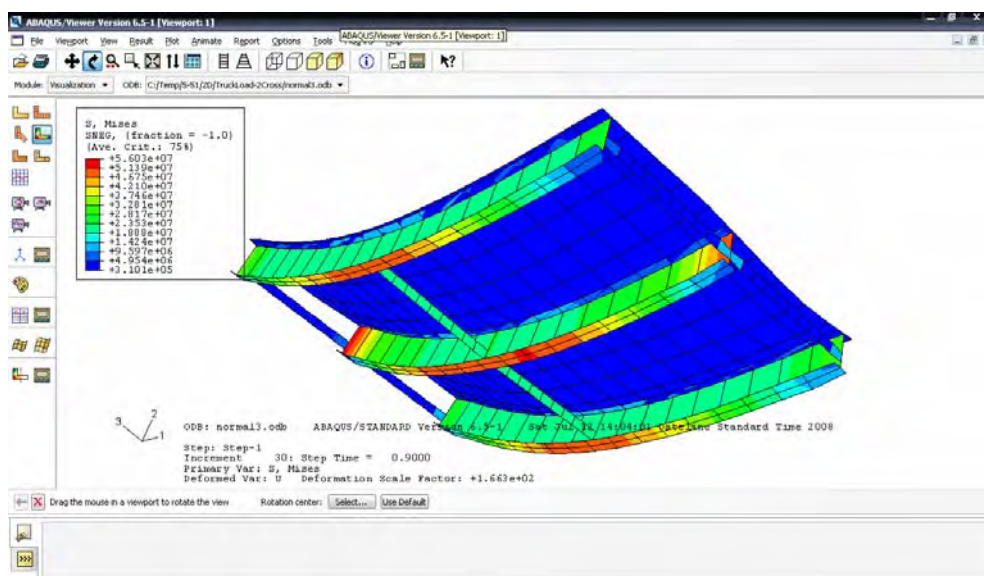
ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ใส่ในแบบจำลองของสะพานนี้จะเป็นข้อมูลที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของสะพานคอมโพสิต ประเภทแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็กนั้นจะใช้ เท่ากับ ร้อยละ 5

ขนาดช่วงเวลาที่แบ่งในแบบจำลอง (Step size) แบบจำลองของสะพานจะเป็นแบบจำลองที่กำหนดให้เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็น 10 วินาที และได้แบ่งขนาดช่วงเวลาออกเป็นช่วงละ 0.05 วินาที เพราะต้องการข้อมูลของผลการวิเคราะห์ที่ละเอียด

- ขั้นตอนในการสร้างรอยร้าวที่กลางคานเหล็กในแบบจำลอง ในการสร้างรอยร้าวที่กลางคานเหล็กสามารถทำได้โดยการแบ่งปีกคานเหล็กด้านล่าง ออกเป็น 2 ชั้น โดยที่ชั้นบนกำหนดให้ไม่มีความหนา ในส่วนของชั้นล่างจะทำการแบ่ง mesh ของปีกคานล่างในช่วงกลางคานให้มีความละเอียดมาก ๆ โดยที่บริเวณที่เกิดรอยร้าวจะกำหนดให้มีความหนาลดลงตามกรณีศึกษา และในบริเวณอื่น ๆ ให้กำหนดให้มีความหนาเท่าเดิม

- ขั้นตอนในการดำเนินการวิเคราะห์ (Analysis Method) จะเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างวิเคราะห์แบบจำลอง โดยจะใช้โปรแกรม Abaqus command ในการดำเนินการ ซึ่งรูปแบบของโปรแกรมจะใช้คำสั่งในการวิเคราะห์ ดังนี้ Abaqus j=(ชื่อไฟล์) .int

- ขั้นตอนแสดงผลการวิเคราะห์ (Output Method) จะเป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น ค่าหน่วยแรง แรงกิริยา และการแอ่นตัว เป็นต้น โดยรูปแบบของผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 3.19



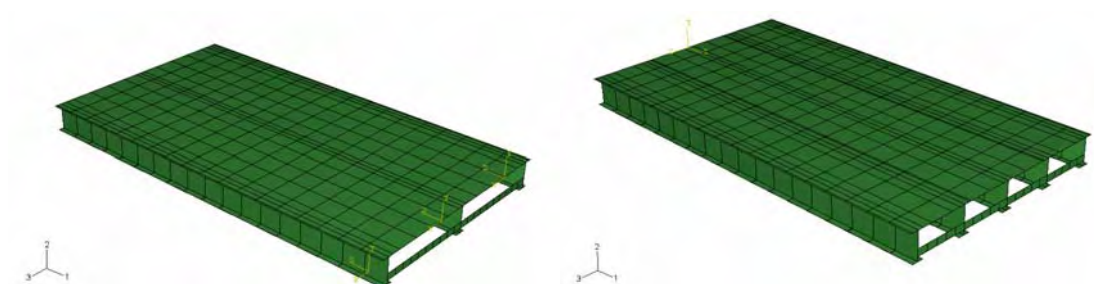
ภาพที่ 3.19 ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS

3.2.5 ลำดับขั้นตอนการศึกษา

ในการดำเนินการศึกษาได้ทำการแบ่งงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

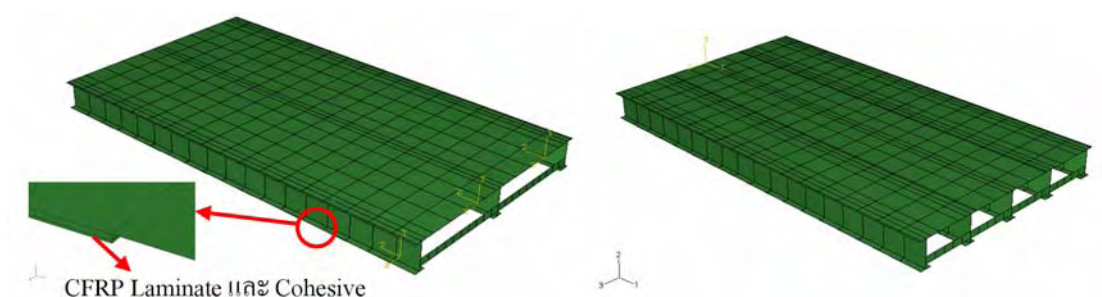
สร้างแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองของสะพานโดยใช้โปรแกรม ABAQUS นั้นจะสร้างสะพานเป็นแบบอีลิเมนต์แบบแผ่น (Shell element) โดยที่ตัวสะพานคอมโพสิตมีความยาวทั้งหมด 18 เมตร โดยที่แบบจำลองของสะพานที่สร้างขึ้นจะเป็นชนิดจุดรองรับแบบง่าย (Simple support) ซึ่งแบบจำลองจะมีอยู่ 3 ประเภท ดังภาพที่ 3.20

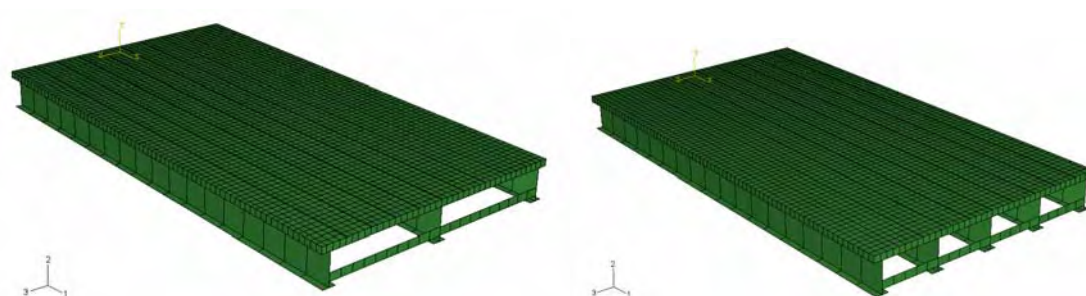


(ก) แบบจำลองสะพานคอมโพสิตที่มี 3 และ 5 คานเหล็ก (Uncrack , crack 3 และ 6 มิลลิเมตร)

ภาพที่ 3.20 แบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ศึกษา



(ข) แบบจำลองสะพานคอมโพสิตที่มี 3 และ 5 คานเหล็ก พร้อมเสริมด้วย CFRP Laminate (Uncrack , crack 3 และ 6 มิลลิเมตร)



(ค) แบบจำลองสะพานคอมโพสิตที่มี 3 และ 5 คานเหล็ก ที่เปลี่ยนแผ่นพื้นเป็น CFRP Composite Deck (Uncrack , crack 3 และ 6 มิลลิเมตร)

ภาพที่ 3.20 แบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ศึกษา (ต่อ)

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น จะใช้การตรวจสอบโดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติ มาใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองของสะพาน ซึ่งจะใช้สมการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ เปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม โดยจะตรวจสอบสะพานคอมโพสิต ทั้ง 3 และ 5 คานเหล็ก

ศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต

การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานจะมีอยู่ 2 แบบ คือ ค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด ซึ่งจะพิจารณากรณีสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง สะพานที่มีการเสริมกำลัง และสะพานที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น ขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกรูปแบบต่าง ๆ

ศึกษาความล้าที่เกิดในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต

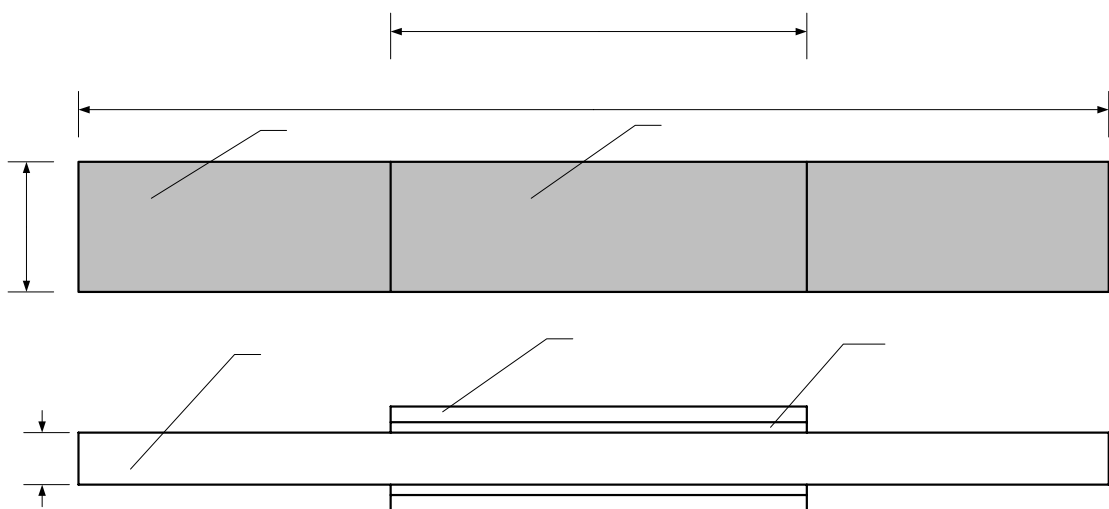
ในขั้นตอนนี้จะศึกษาผลของความล้าจากแบบจำลองของสะพาน จะศึกษาอยู่ 2 แบบ คือ อายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต หรือค่าอายุความล้า และจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน โดยพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง สะพานที่มีการเสริมกำลัง และสะพานที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น ขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุก 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

บทที่ 4

ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริม กำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ สำหรับข้อมูลของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้อ้างอิงจากบทความที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ คือ “Fatigue Performance of Tensile Steel Members Strengthened with CFRP Plates” โดย Bocciarelli et al. (2009) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากบทความที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของการกระจายของหน่วยแรงในชิ้นกาว และการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 4.1

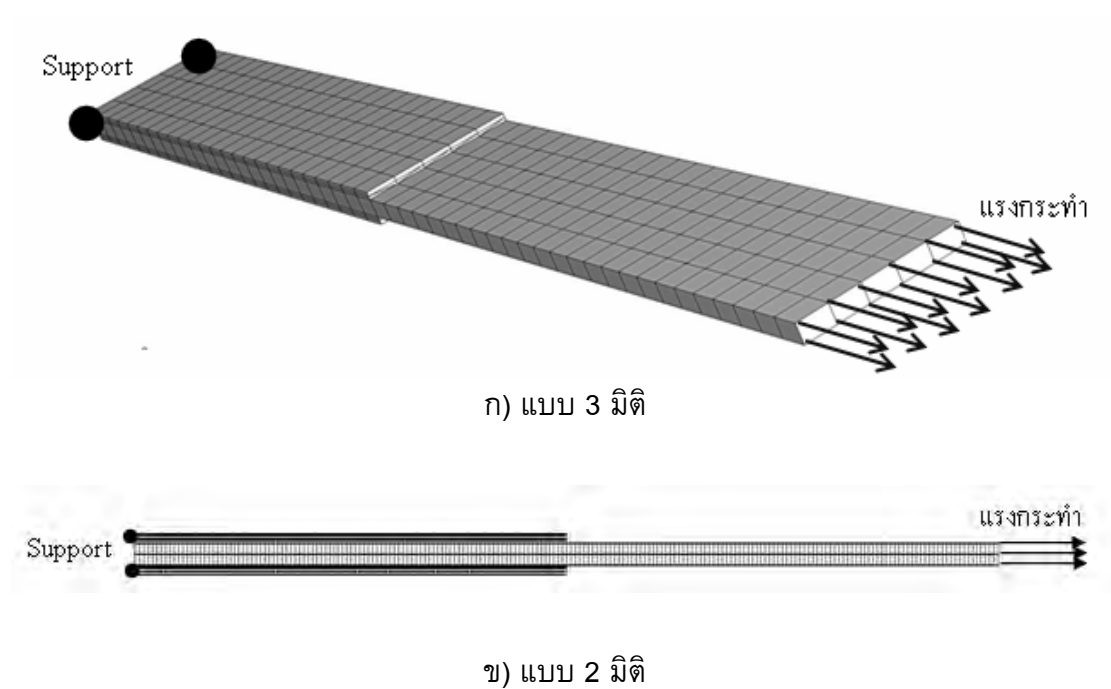


ภาพที่ 4.1 มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง (ไม่ได้มาตราส่วน)

ทั้งนี้ชิ้นส่วนในภาพที่ได้ถูกทำการทดลองโดย Bocciarelli et al. (2009) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาในครั้งนี้ได้แสดงในภาพที่ 4.3



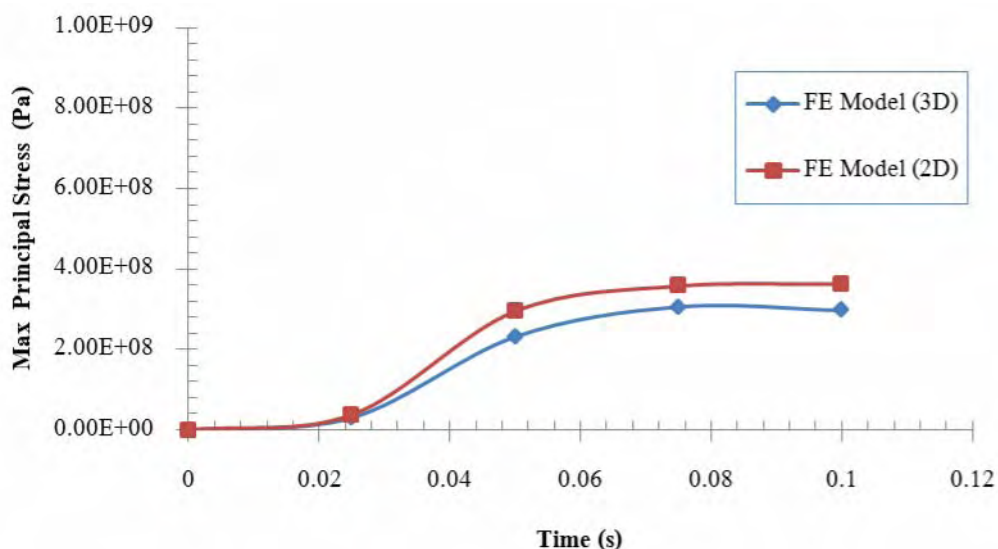
ภาพที่ 4.2 แสดงรูปการทดสอบที่ศึกษาโดย Bocciarelli et al. (2009)



ภาพที่ 4.3 แบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.2 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง 2 มิติ กับ 3 มิติ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสอบเทียบแบบจำลองแบบ 2 มิติ กับ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขของจุดรองรับเดียวกัน ภายใต้แรงดึงแบบสถิตในระยะเวลา 0.1 วินาที แล้วทำการอ่านค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.4

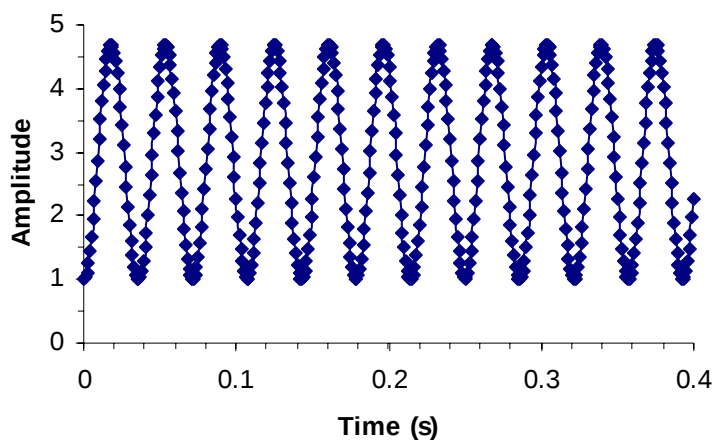


ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุดของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ

จากรูปพบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดในชิ้นส่วนของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง 2 มิติ สามารถจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ใกล้เคียงพฤติกรรมจริง ดังนั้นเพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ อันเนื่องมาจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ และมีคุณสมบัติแบบไร้เชิงเส้นของกาว ดังนั้นจึงจะทำการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 2 มิติ ตลอดการศึกษา

4.3 พฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ในการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แสดงตัวอย่างของ Amplitude ที่ป้อนลงในโปรแกรมโดยใช้สมการ

$$a = A_0 + A \times (\sin \cdot \omega \cdot t)^2$$

โดยความถี่ของแรงกระทำแบบซ้ำๆ นั้นใช้ค่าเดียวกับการทดลองของ Bocciarelli et al. (2009) คือ 14 Hz โดยช่วงหน่วยแรงที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 4 ช่วงหน่วยแรงได้แก่ 83, 100, 120 และ 160 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า Stress Ratio มีค่าคงที่คือ 0.4 ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดของแต่ละช่วงหน่วยแรงได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

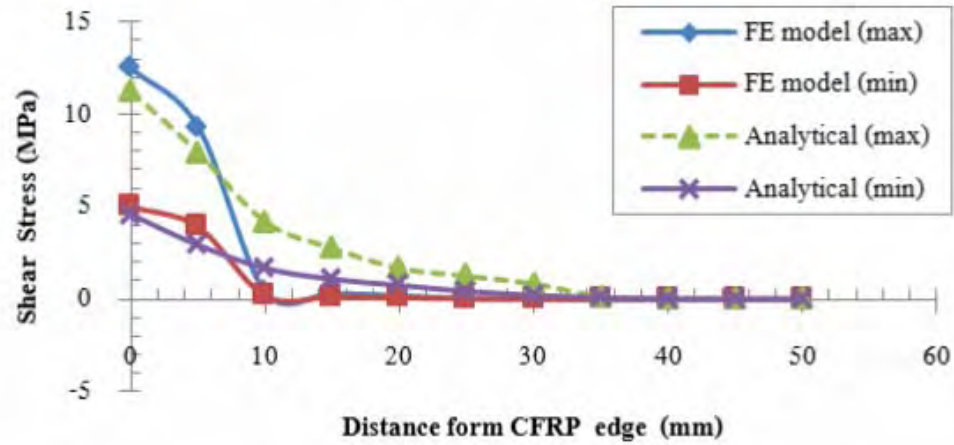
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดของแต่ละช่วงหน่วยแรงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

ชิ้นส่วน ทดสอบ	แรงในแนวแกน (ต่ำสุด; สูงสุด [kN])	หน่วยแรงดึง (ต่ำสุด; สูงสุด) [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	อัตราส่วน หน่วยแรงดึง
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

4.3.1 ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงบริเวณชั้นกาว

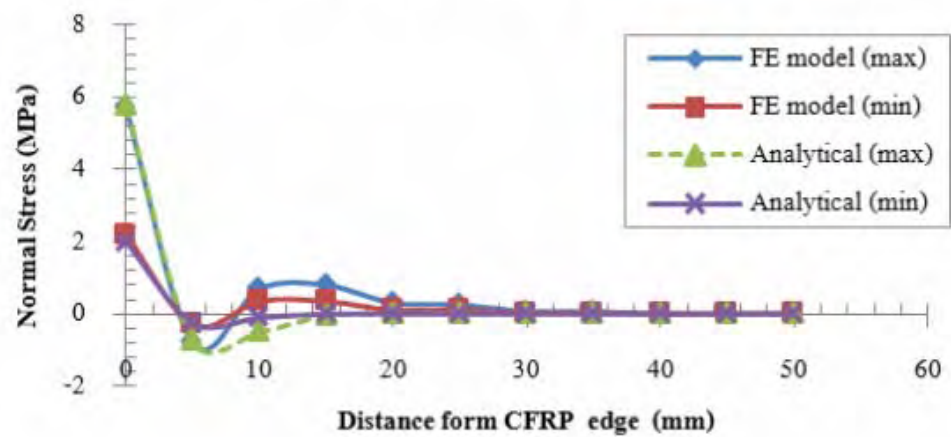
ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำๆ แล้วก็ทำการอ่านค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นกาวที่เชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น CFRP ซึ่งค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ในหัวข้อต่อไป โดยค่าที่อ่านได้จากแบบจำลองจะถูกแสดงเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์โดย Bocciarelli et al. (2009) ดังแสดงในภาพที่ 4.6-4.9

Fatigue Stress Ranges 83 MPa



ก) หน่วยแรงเฉือน

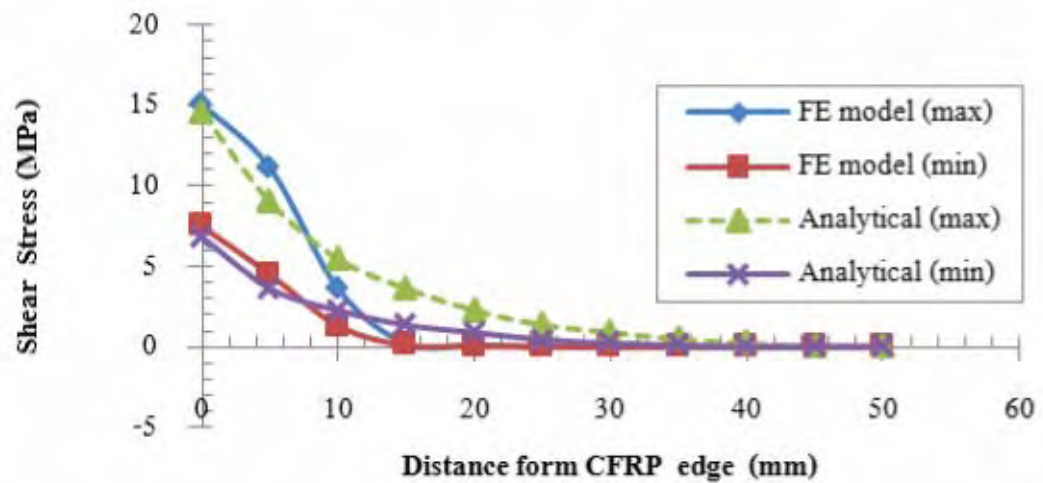
Fatigue Stress Ranges 83 MPa



ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

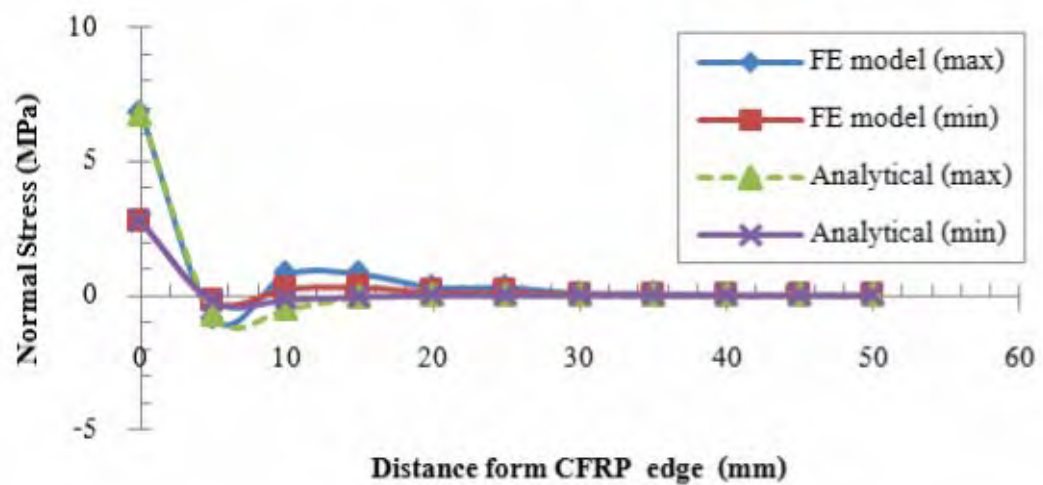
ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 83$ MPa)

Fatigue Stress Ranges 100 MPa



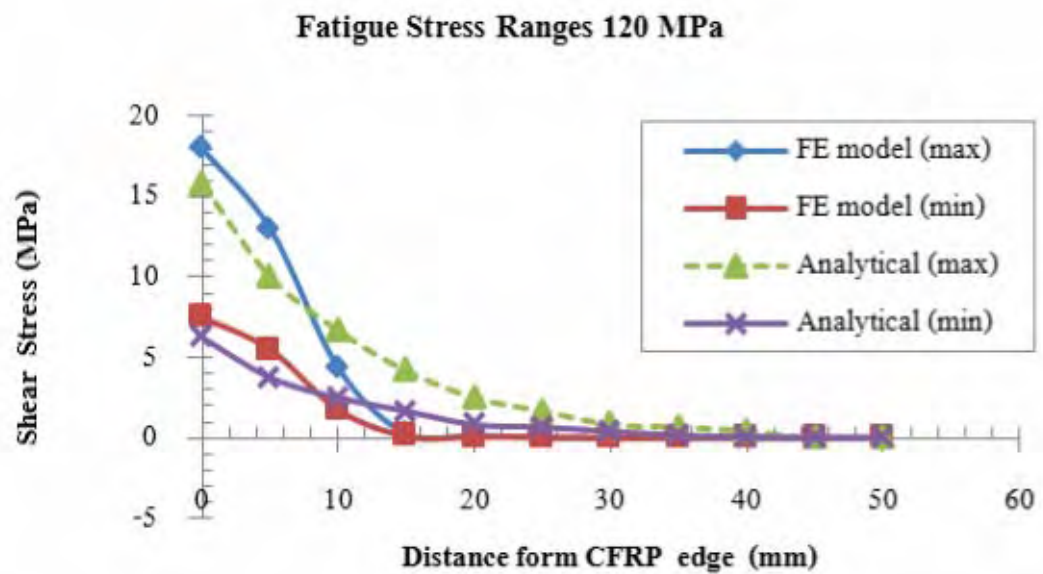
ก) หน่วยแรงเฉือน

Fatigue Stress Ranges 100 MPa

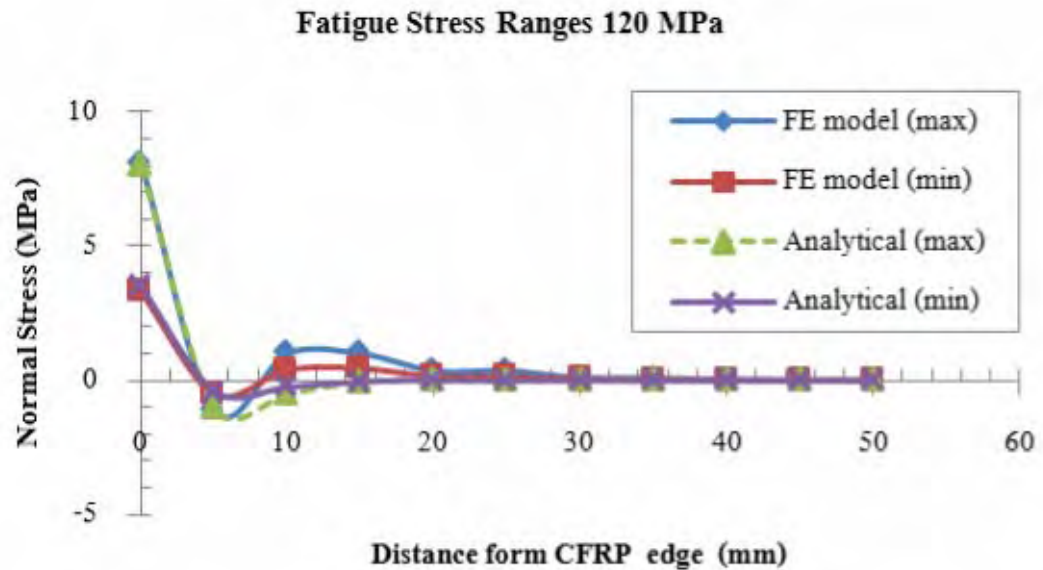


ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 100$ MPa)

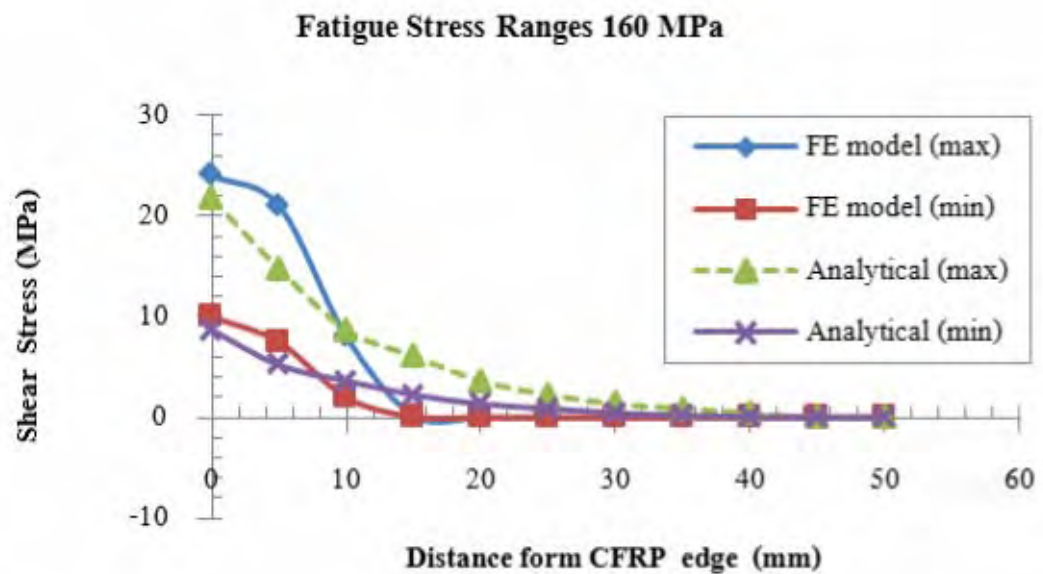


ก) หน่วยแรงเฉือน

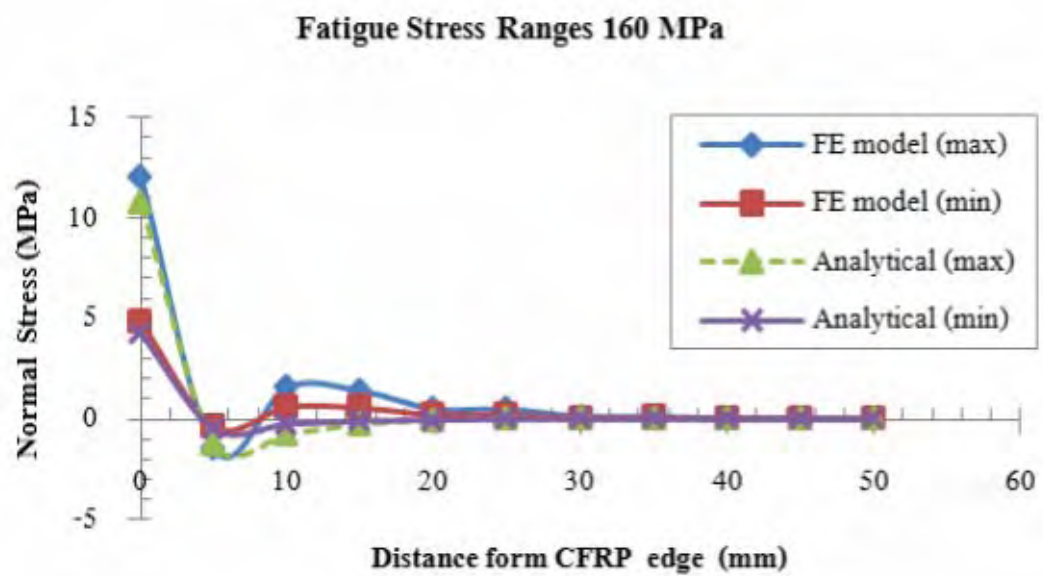


ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 120$ MPa)



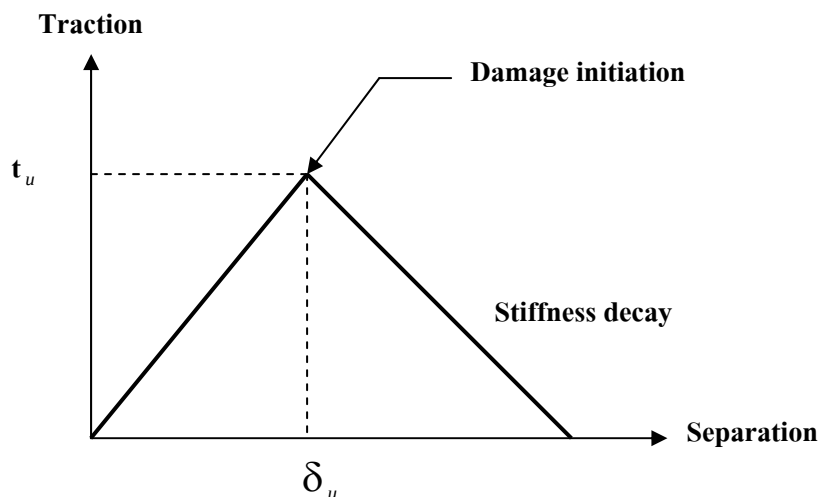
ก) หน่วยแรงเฉือน



ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 160$ MPa)

จากภาพที่ 4.6-4.9 จะพบว่าค่าหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์กับค่าที่ได้จาก Analytical model พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งในกรณีของ หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดึงฉาก ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่า การหลุดลอกของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนี้นั่นเอง อย่างไรก็ตามก็จะสังเกตเห็นลักษณะการลดลงของหน่วยแรงที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงเร็วกว่า Analytical model เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ใน Analytical model ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) แต่ในแบบจำลองได้จำลองพฤติกรรมของ interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้น element จะมีค่าความเสียหายใน element จะมีค่าเพิ่มขึ้นในรูปแบบของเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 Linear element traction separation behavior ของ cohesive element

ซึ่งการสะสมของความเสียหายนี้เองจึงทำให้ element นั้นไม่สามารถรับแรงได้ ค่าหน่วยแรงจึงลดลงเร็วกว่า Analytical model เราจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นในการศึกษานี้มีความถูกต้องมากกว่า Analytical model ที่เสนอโดย Bocciarelli et al. (2009)

4.3.2 การทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

สืบเนื่องจากการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ไปจนกระทั่งวัตถุนั้นวิบัตินั้นเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากจะต้องเผชิญกับปัญหาของความไร้เชิงเส้นของวัสดุ รวมทั้งหน่วยความจำขนาดใหญ่สำหรับบันทึกข้อมูล และที่สำคัญอย่างยิ่งเวลาในการวิเคราะห์ซึ่งต้องใช้เวลาอย่างมาก ผู้ศึกษาจึงได้นำเสนอวิธีการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ อย่างง่ายแต่ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยผู้ศึกษาขออ้างถึงสมการที่จะใช้ประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 อีกครั้งหนึ่ง

Caprino (2000) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประมาณค่าอายุการใช้งานของแผ่น CFRP ภายใต้แรงดึงแบบซ้ำๆ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$f_n = \overline{f_u} - \alpha S_{\max} (1-R)(n^\beta - 1) \quad (4.1)$$

เมื่อ f_n = ค่ากำลังหลังจากให้แรงไป n รอบ (MPa)
 $\overline{f_u}$ = ค่ากำลังของวัสดุตั้งต้น (การ) (MPa)
 $S_{\max}$ = ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)
 $S_{\min}$ = ค่าหน่วยแรงเฉือนต่ำสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)
 R = stress ratio = $\frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ (%)
 n = จำนวนรอบของรอบน้ำหนักบรรทุก
 α, β = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกา

ให้ N_f เป็นอายุของความล้าของชิ้นส่วนทดสอบ ถ้า $n = N_f$, $f_n = S_{\max}$ ดังนั้น N_f จะหาได้จาก

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{\alpha(1-R)} \left(\frac{\overline{f_u}}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.2)$$

ในลำดับต่อมาหาค่า α, β จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากสมการที่ 4.2

$$\left(\frac{\overline{f_u}}{S_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right) = \alpha (N_f^\beta - 1) \quad (4.3)$$

ให้ $K = \left(\frac{\overline{f_u}}{S_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right)$, เมื่อ

$$K = \alpha (N_f^\beta - 1) \quad (4.4)$$

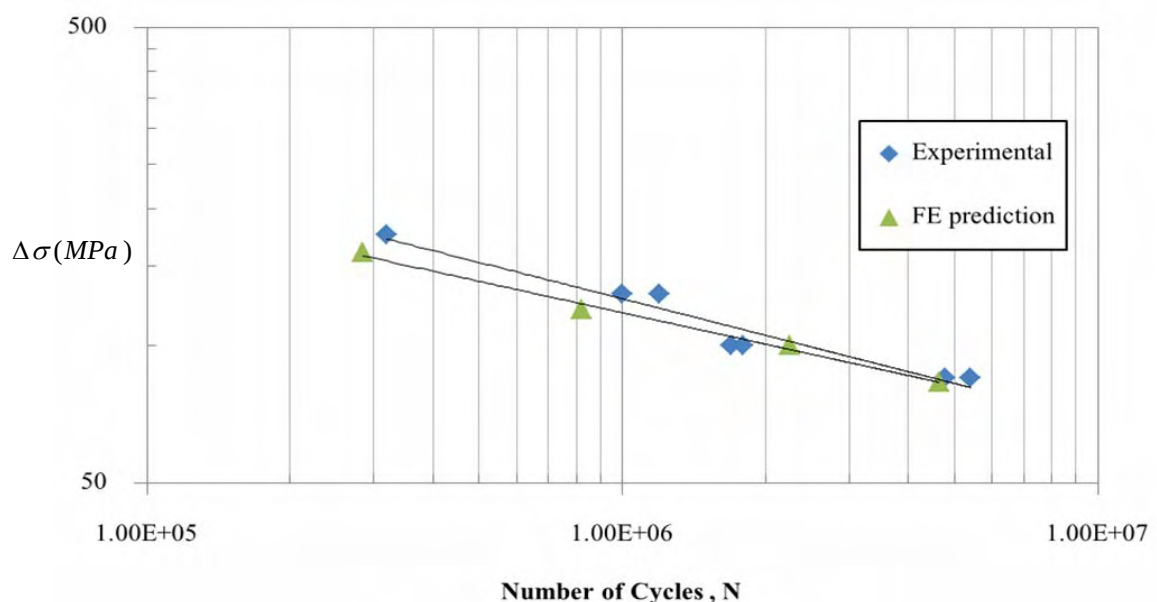
โดยที่ α คือ ความชัน ของเส้นตรง และเนื่องจากมีตัวแปรสองตัวในสมการคือ ค่า α และ β ซึ่งค่าทั้งสองสามารถหาได้โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งจากการศึกษาของ Caprino (2000) พบว่าค่าทั้งสองคือ $\alpha = 0.004$ และ $\beta = 0.39$ ดังนั้นแบบจำลองหาค่าอายุของความล้าของแผ่น เหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะสามารถหาได้จากสมการ

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{0.004(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{0.39}} \quad (4.5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.5 ทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.11

ตารางที่ 4.2 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



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experimental กับ FE prediction

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า %Error ที่เกิดขึ้นจากการทำนายมีค่าสูงสุดเพียง 18.82 % ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ถ้าหากพิจารณาจากกราฟที่ 4.11 แล้ว จะยัง

พบว่าวิธีการทำนายที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยในการประเมินพฤติกรรมความล้าของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มช่วงของหน่วยแรงจาก 83, 100, 120 และ 160 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า ความเสถียร ของชิ้นส่วนนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด (ดูได้จากจำนวนรอบที่ลดลงอย่างมาก) ซึ่งการลดลงนี้เป็นผลมาจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP จากบริเวณปลายของแผ่น CFRP ซึ่งจุดนี้เองถือเป็นจุดอ่อนของการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างเหล็กด้วย CFRP

4.4 การศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ภายหลังที่ได้ทำเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว และใช้ค่าหน่วยแรงที่ได้ไปใช้ในการประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ในหัวข้อที่ 4.3 ไปแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาว และอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ความหนาของชั้นกาว และความหนาของแผ่น CFRP โดยกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบจะต้องทำการศึกษาใน 4 ช่วงหน่วยแรงคือ 83, 100, 120 และ 160 MPa ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์จำนวน 36 โมเดล โดยการให้สัญลักษณ์ CT1.2/GT1.0 แทนกรณีศึกษาที่ความหนาของแผ่น CFRP 1.2 mm และความหนากาว 1.0 mm เป็นต้น

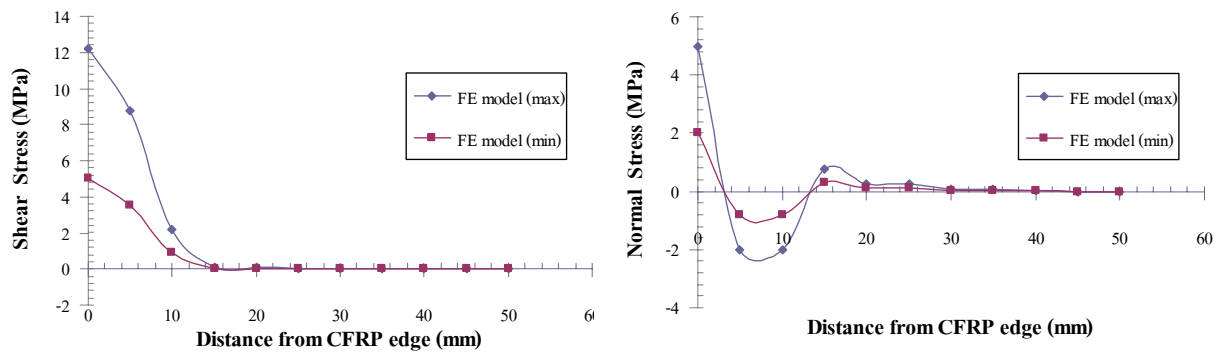
ตารางที่ 4.3 กรณีศึกษาในการศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

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

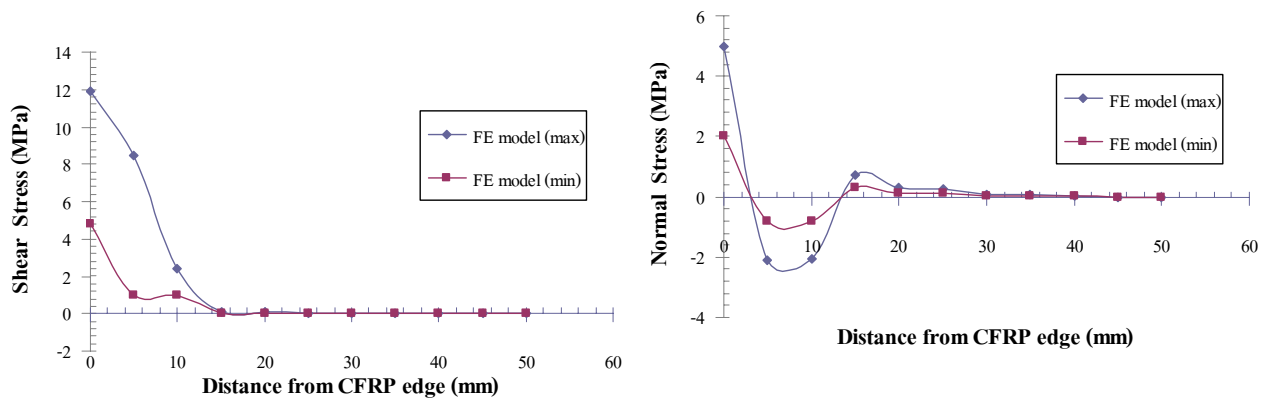
4.4.1 ผลของความหนาของชั้นกาบต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

การกระจายของหน่วยแรง

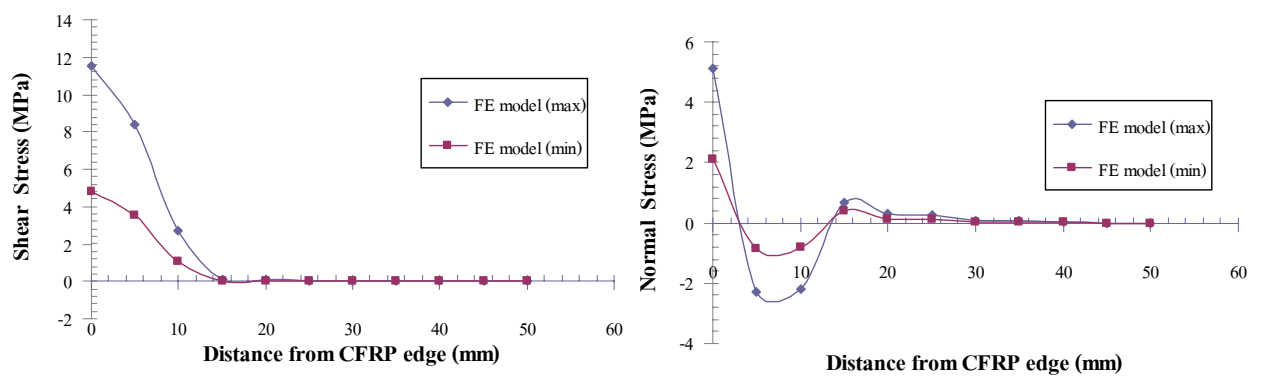
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาบของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนาของกาบเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังภาพที่ 4.12



ก) โมเดล CT1.2/GT1.0



ข) โมเดล CT1.2/GT1.1



ค) โมเดล CT1.2/GT1.2

ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงตึงฉาก ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83 \text{ MPa}$)

จากภาพที่ 4.12 พบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดที่บริเวณกาวจะมีค่ามากที่สุดบริเวณของแผ่น CFRP และค่อยลดลงเมื่อเลื่อนเข้าไปในตัวชิ้นส่วน โดยถ้าหากมีการเพิ่มความหนาเป็น 1.1 mm และ 1.2 mm (รูป 4.12 ข และ 4.12 ค) จะพบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุด จะลดลงจาก 12.2 MPa เหลือ 11.9 MPa และ 11.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่า หน่วยแรงเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของกาวก็จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนขึ้น ส่วนค่าหน่วยแรงเฉือน ต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มลดลงตามความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่า หน่วยแรงดึงฉาก ที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่า หน่วยแรงดึงฉากนั้นจะไม่ได้ขึ้นกับการเปลี่ยนความหนาของกาวเลย อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือ ค่า หน่วยแรงเฉือน ดังนั้นการที่ค่า หน่วยแรงเฉือน ลดลงนั้นจะมีผลดี คือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นเพิ่มขึ้น ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป สำหรับผลการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆสามารถดูได้จากภาคผนวก ก

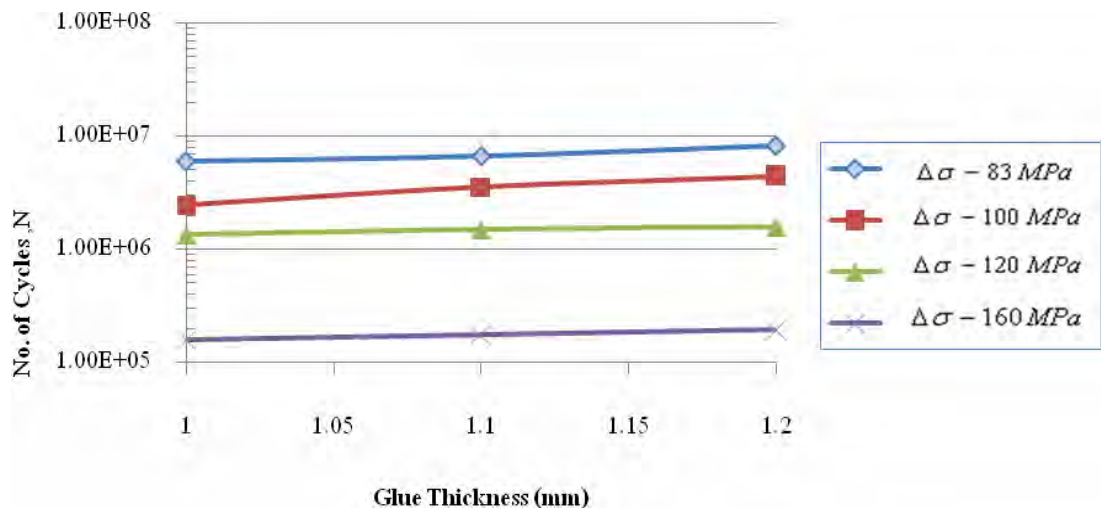
อายุการใช้งาน

จากค่า Shear Stress ที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ โดยการใช้สมการที่ 4.5 ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของแผ่น 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) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2 ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 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 4.4 จะพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นกาวจาก 1 mm ไปเป็น 1.2 mm สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้มากถึง 33% ในส่วนของกรณีศึกษาอื่นๆสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4.13



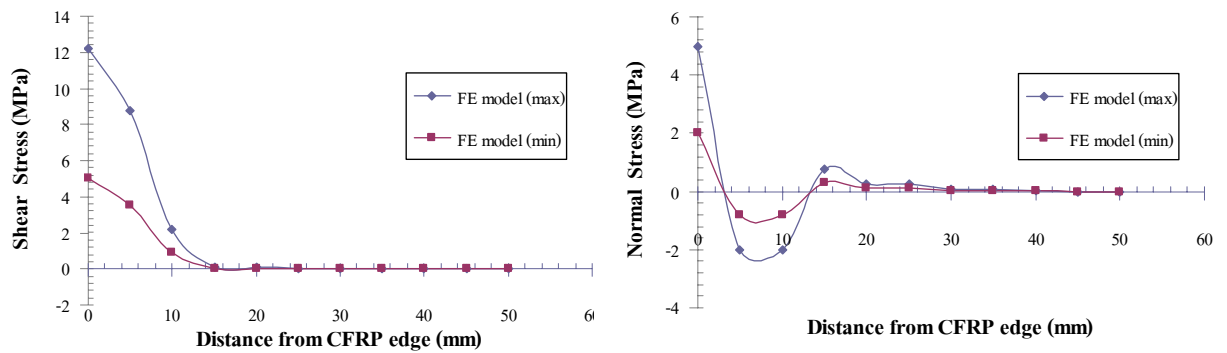
ภาพที่ 4.13 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.2 mm)

จากภาพที่ 4.13 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงของหน่วยแรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาอื่นๆ สามารถดูได้ในภาคผนวก ข

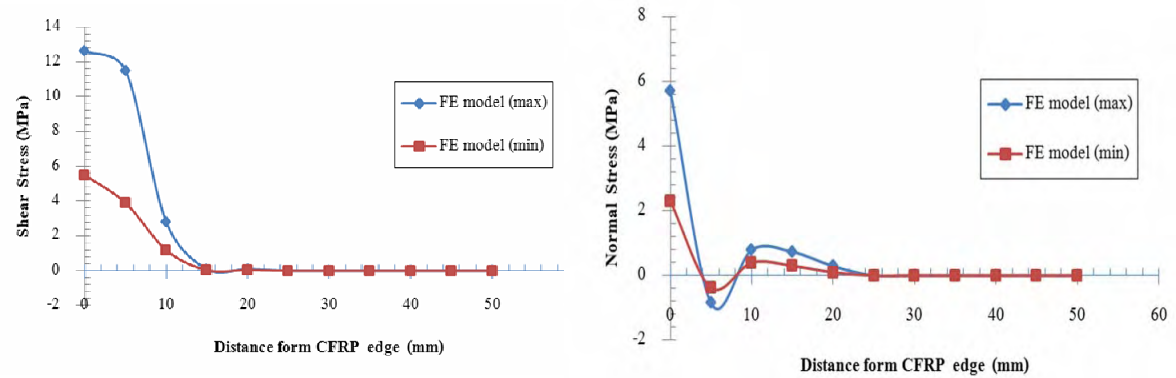
4.4.2 ผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

การกระจายของหน่วยแรง

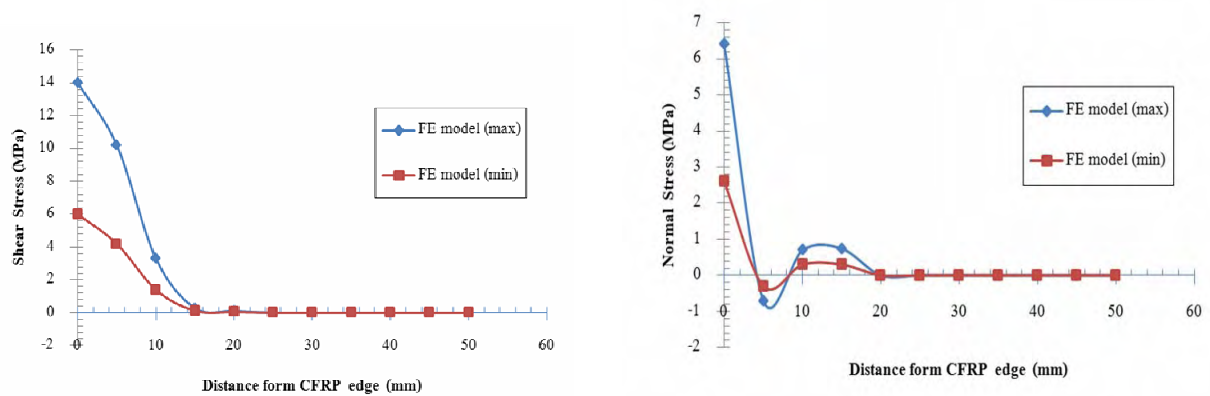
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาวของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของกาว คงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2, 1.4 และ 1.6 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังภาพที่ 4.14



ก) โมเดล CT1.2/GT1.0



ข) โมเดล CT1.4/GT1.0



ค) โมเดล CT1.6/GT1.0

ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงตั้งฉาก ในกรณีที่ความหนาของ
 กาวคงที่ แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP ($\Delta\sigma = 83 \text{ MPa}$)

จากภาพที่ 4.14 พบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดที่บริเวณกาวจะมีค่ามากที่สุดบริเวณของแผ่น CFRP และค่อยลดลงเมื่อเลื่อนเข้าไปในตัวชิ้นส่วน โดยถ้าหากมีการเพิ่มความหนาเป็น 1.4 mm และ 1.6 mm (รูป 4.12 ข และ 4.12 ค) จะพบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้นจากจาก 12.2 MPa เป็น 13.3 MPa และ 14 MPa ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า หน่วยแรงเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง อย่างไรก็ตามการเพิ่มเฉพาะความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชั้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปให้แผ่น CFRP นั้นเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ จุดนี้เองทำให้กาวเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ส่วนค่า หน่วยแรงเฉือน ต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่น CFRP ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่า หน่วยแรงตึงฉาก ที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่า หน่วยแรงตึงฉาก นั้นจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า หน่วยแรงเฉือน อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือ ค่า หน่วยแรงเฉือน ดังนั้นการที่ค่า หน่วยแรงเฉือน เพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลเสียคือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป สำหรับผลการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆสามารถดูได้จากภาคผนวก ก

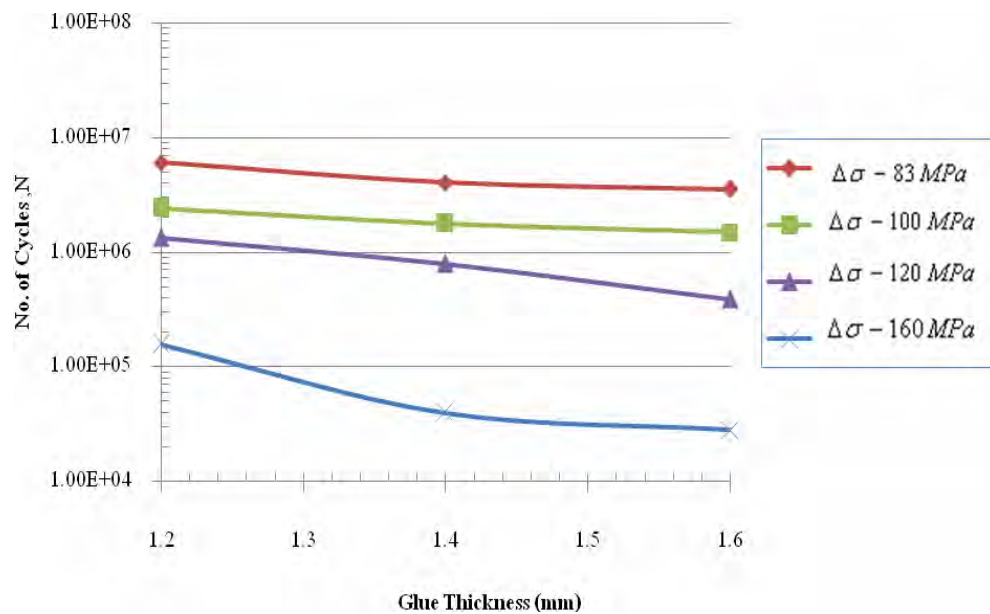
อายุการใช้งาน

จากค่า หน่วยแรงเฉือน ที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ โดยการใช้สมการที่ 4.5 ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่ความหนากาว คงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2, 1.4 และ 1.6 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0 ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 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 4.5 จะพบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จาก 1.2 mm ไปเป็น 1.6 mm โดยที่ความหนากาวคงที่นั้น จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลงสูงสุดประมาณ 41.51% ในส่วนของกรณีศึกษาอื่นๆสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากระดาษที่ = 1.0 mm)

จากภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวจะทำให้ อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าลดลงในทุกช่วงของหน่วยแรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวนั้น จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง ในส่วนของผลการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาอื่นๆ สามารถดูได้ในภาคผนวก ข

บทที่ 5

ผลการศึกษาพฤติกรรมของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์

5.1 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสะพานในการตรวจสอบความถูกต้อง โดยจะใช้ค่าความถี่ธรรมชาติจากสมการที่ 2.16 มา เปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งจากสมการที่ใช้ได้มีการวิจัยโดยการนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง พบว่าสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากสมการ และจากแบบจำลองนั้น จะแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต จากสมการ และแบบจำลอง

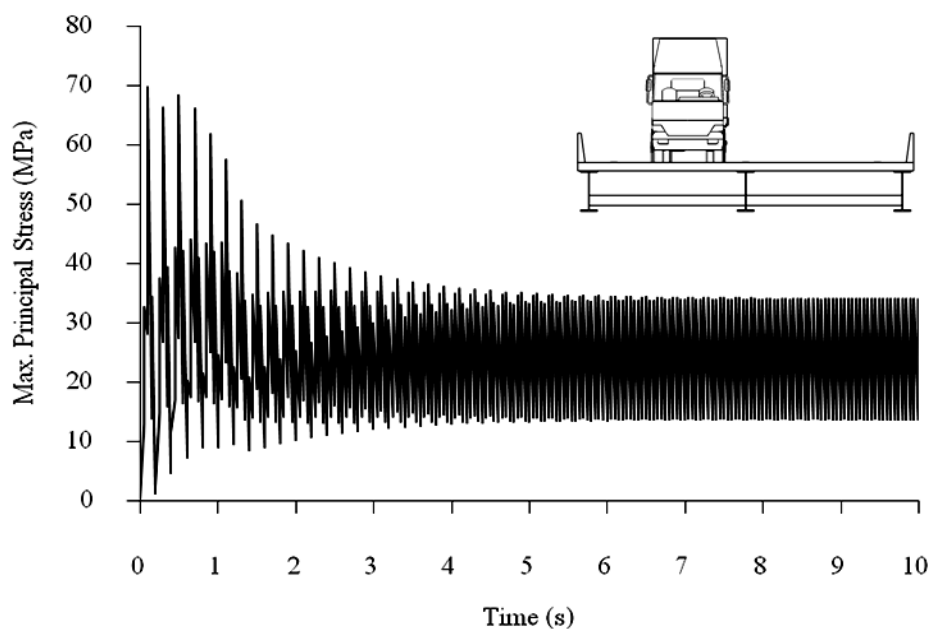
จำนวนคานเหล็ก (ตัว)	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		คลาดเคลื่อนร้อยละ
	จากสมการที่ 2.16	จากแบบจำลอง	
3	7.894	7.794	1.27
5	9.398	9.324	0.79
3 (CFRP composite deck)	10.476	10.423	0.51
5 (CFRP composite deck)	11.106	10.921	1.67

จากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากโปรแกรม และจากการใช้สมการที่ 2.16 พบว่าไม่มีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 1.7 แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

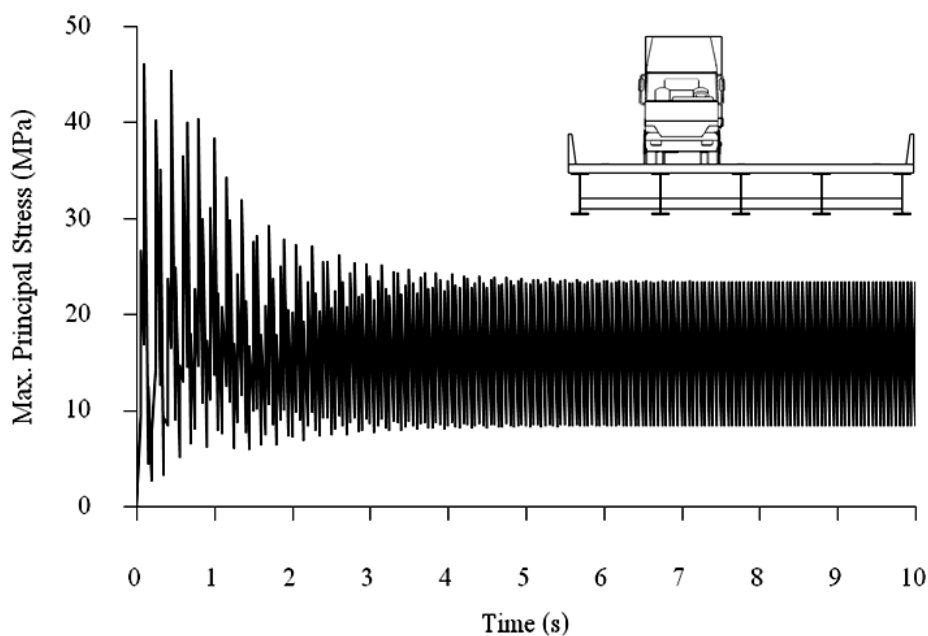
5.2 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

จากการวิเคราะห์สะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP จากแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต 2 รูปแบบ คือ ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานเหล็ก และค่าการแอ่นตัวสูงสุด โดยที่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่วิ่ง 1 ช่องจราจร 2 ช่องจราจร (ทางเดียวกัน) และ 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

5.2.1 กรณีรถวิ่ง 1 ช่องจราจร จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ ในภาพที่ 5.1 และ 5.2 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนรถวิ่ง 1 ช่องทางจราจร ตามลำดับ

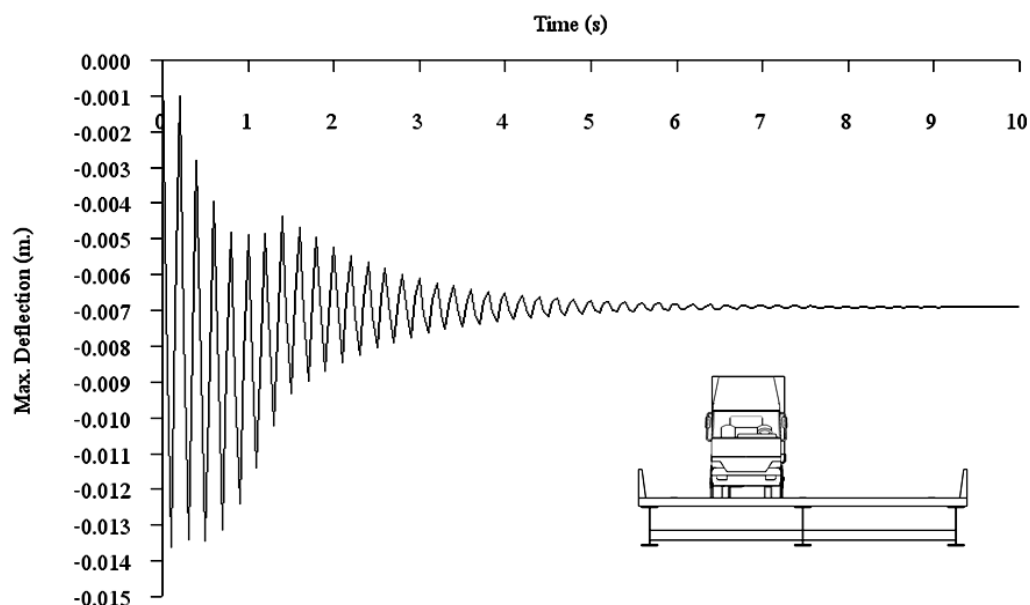


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

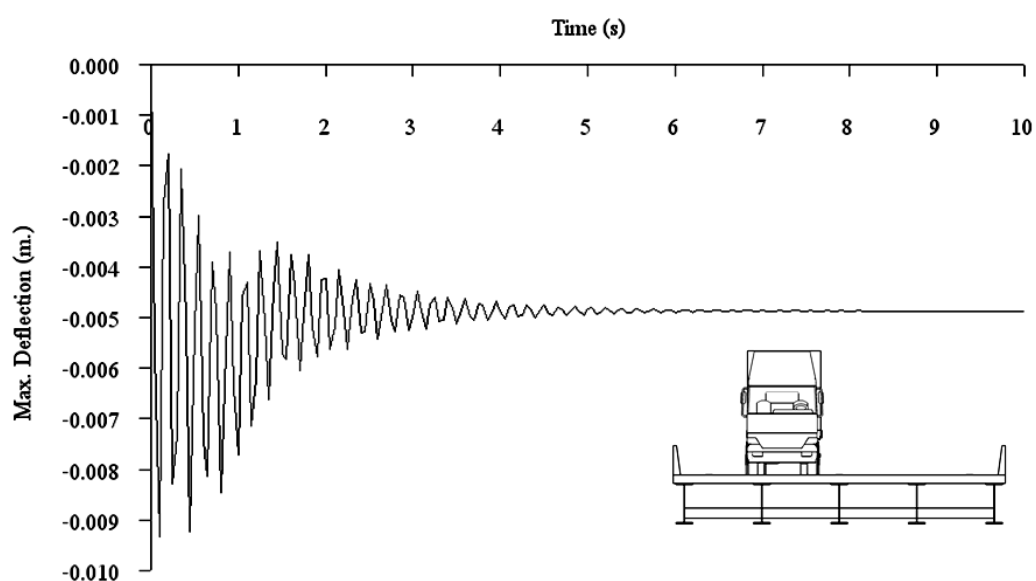


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.1 ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร



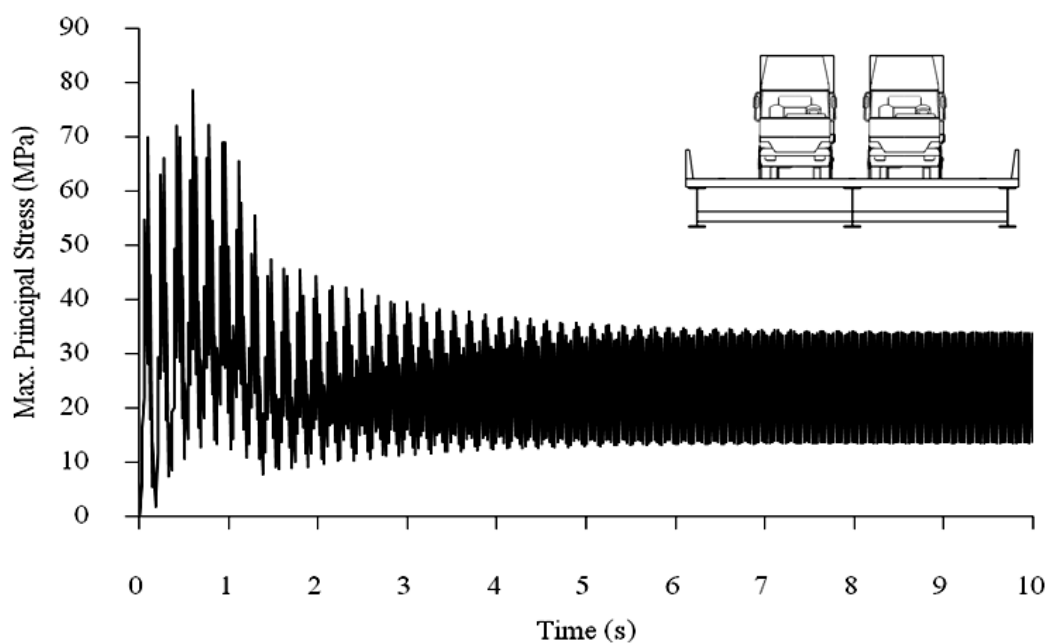
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



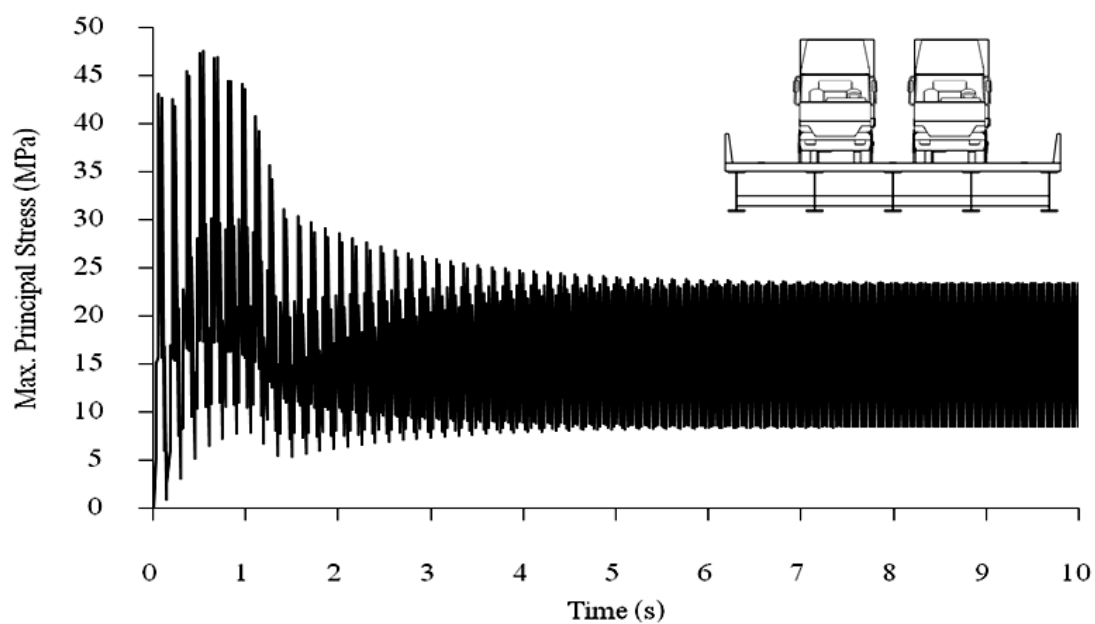
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.2 ค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร

5.2.2 กรณีวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน) จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของกรณีที่วิ่งในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.3 และ 5.4 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนรถวิ่ง 2 ช่องทางจราจร (วิ่งทางเดียวกัน) ตามลำดับ

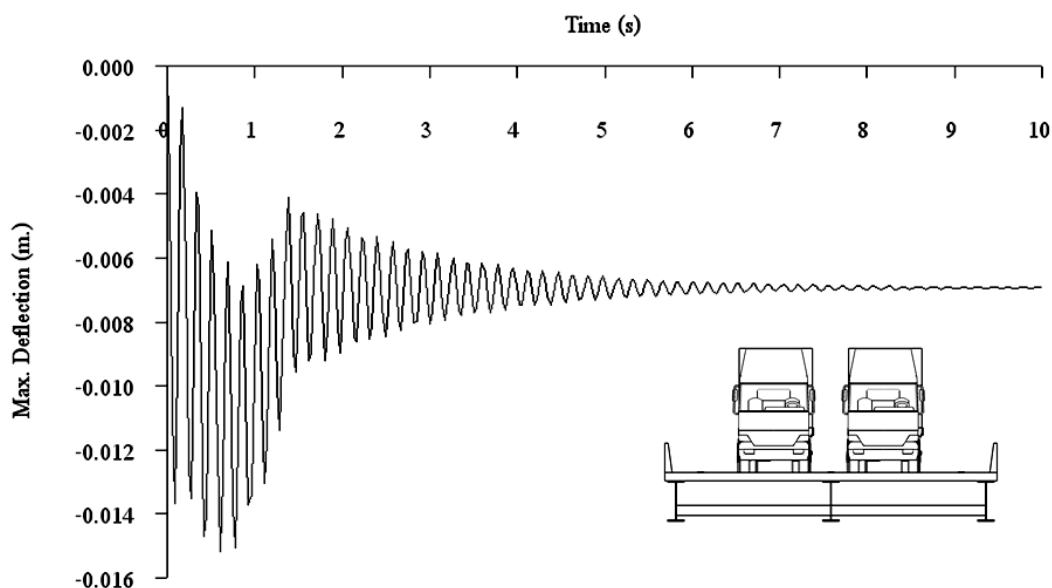


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

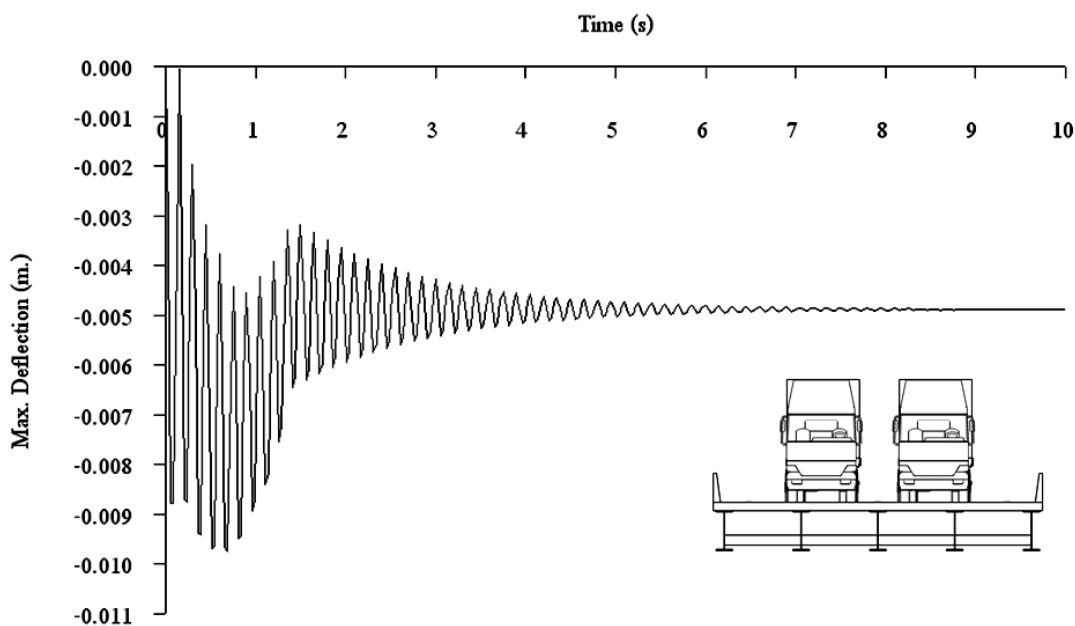


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.3 ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)



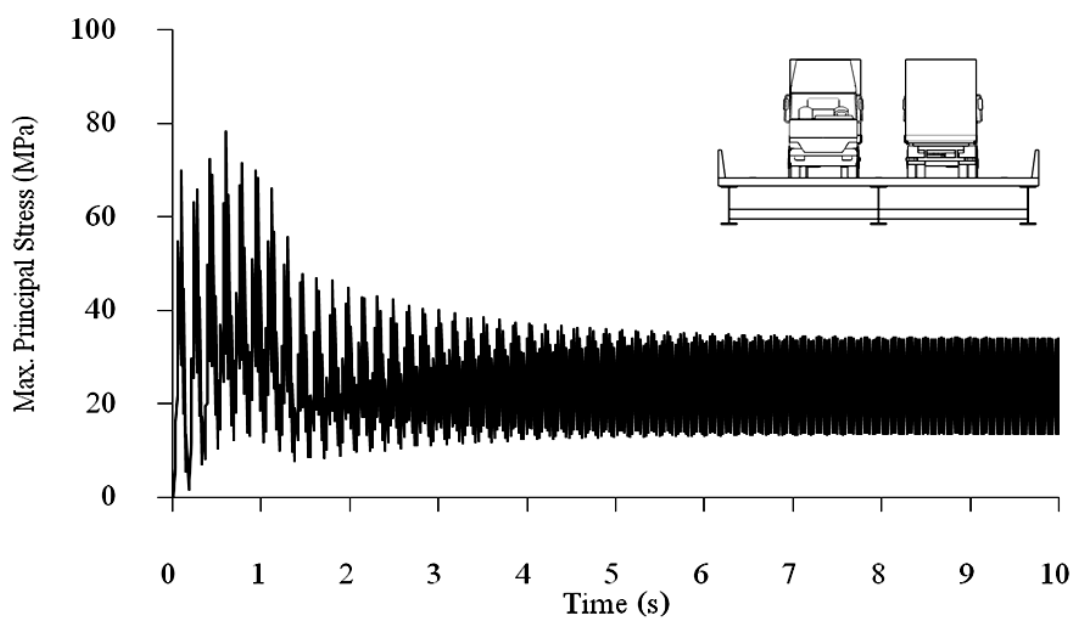
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



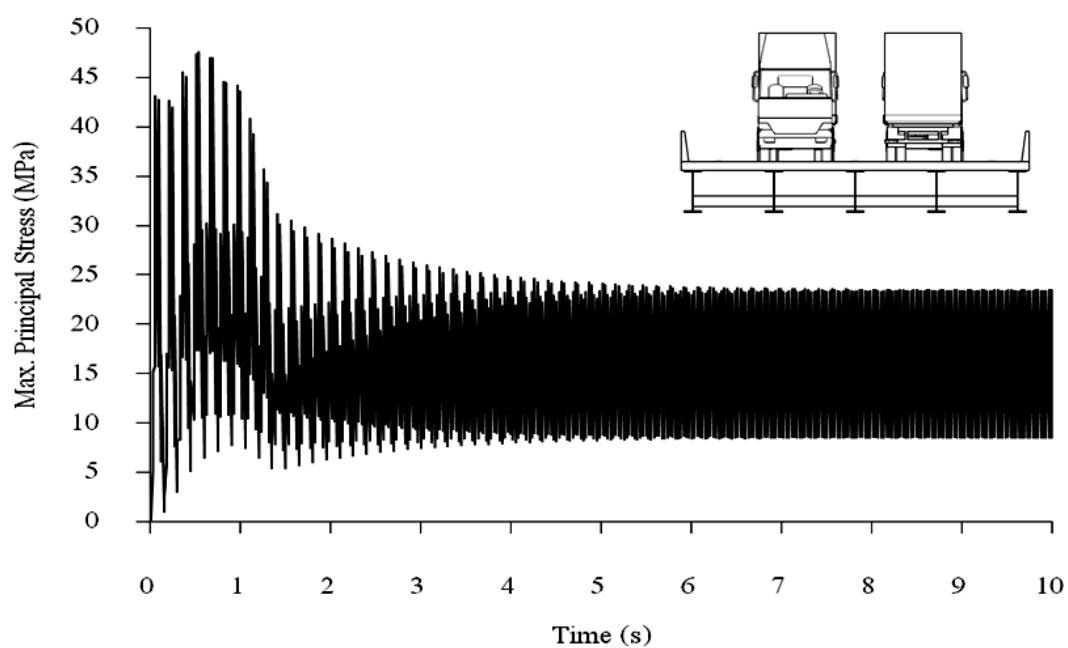
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.4 ค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)

5.2.3 กรณีวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน) จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของกรณีวิ่งสวนทางกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.5 และ 5.6 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนวิ่ง 2 ช่องทางจราจร (วิ่งสวนทางกัน) ตามลำดับ

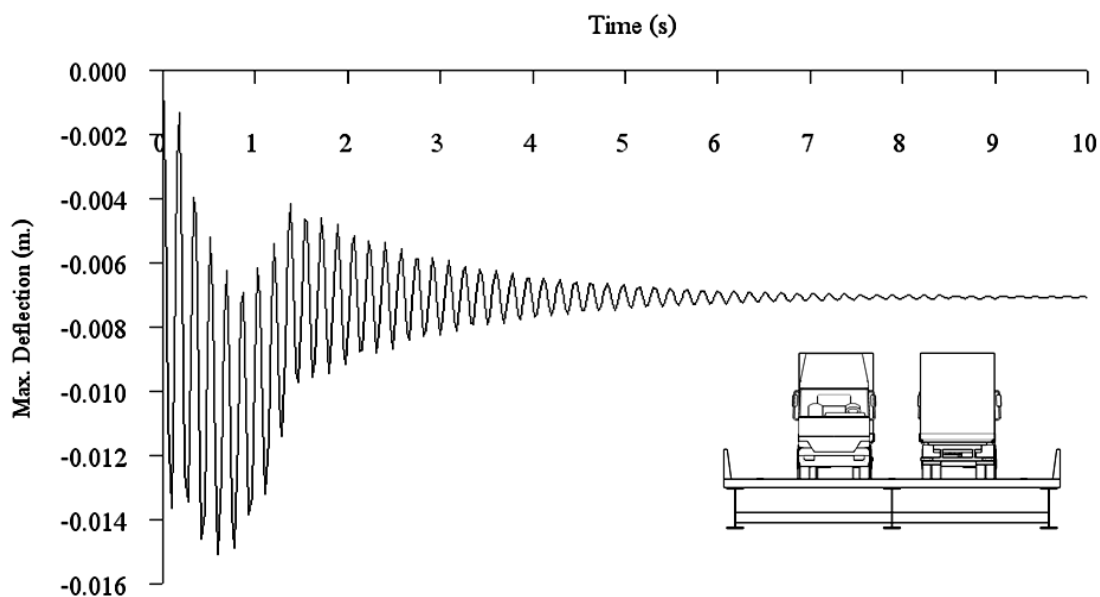


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

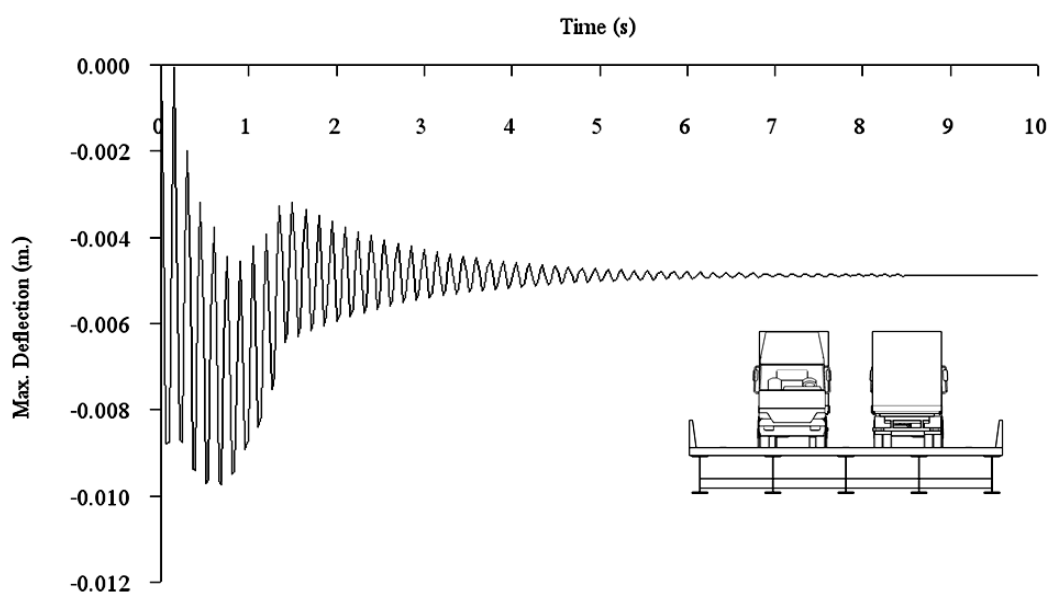


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.5 ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.6 ค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)

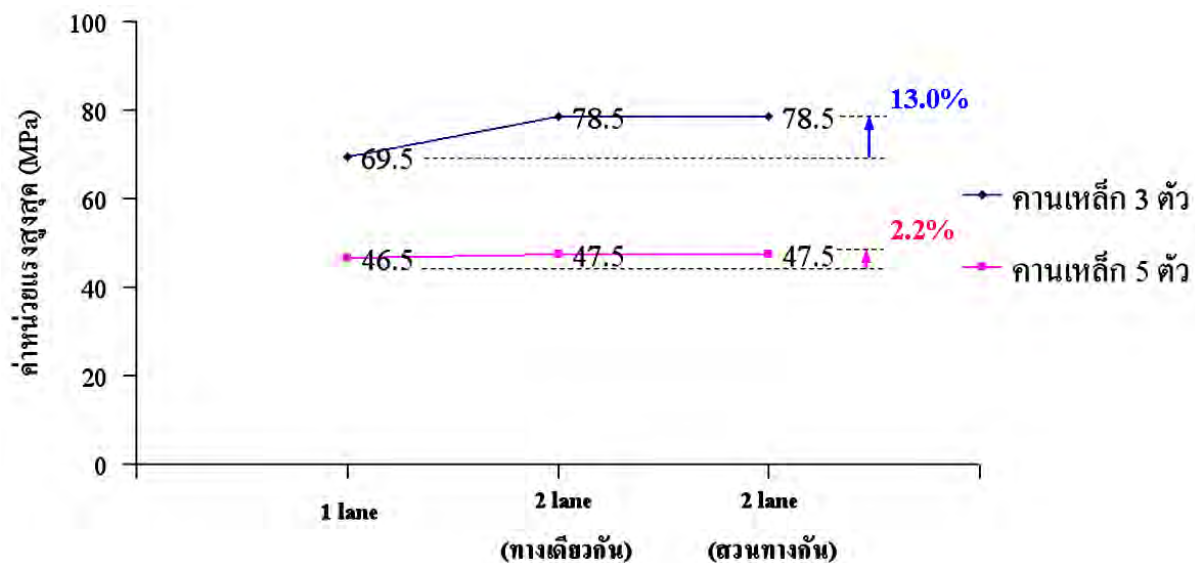
จากหัวข้อที่ 5.2.1 ถึง 5.2.3 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุก 3 รูปแบบ

ตารางที่ 5.2 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกลักษณะต่าง ๆ

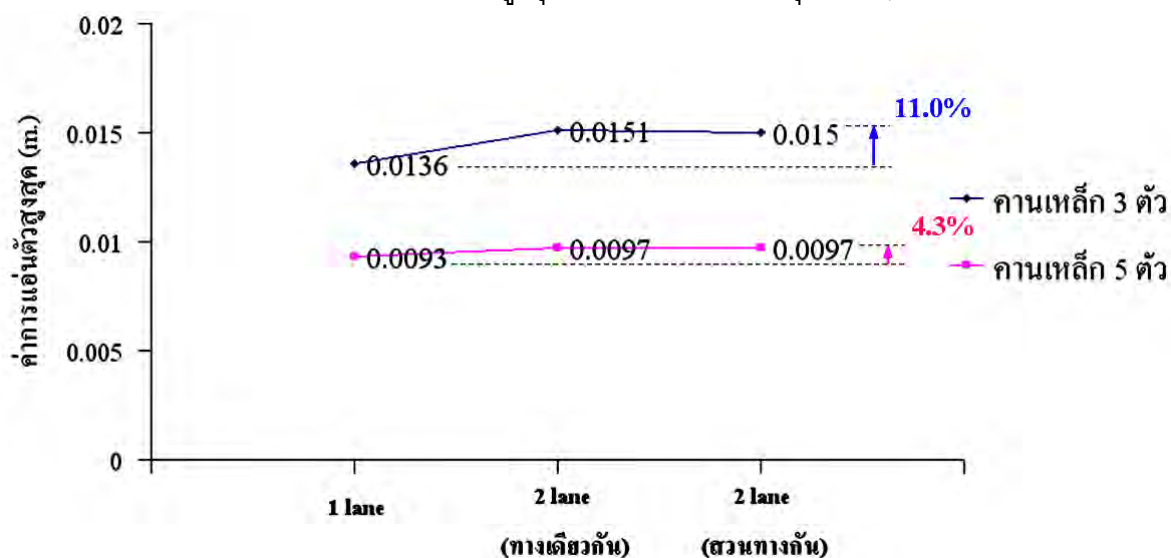
รูปแบบของสะพาน		กรณีที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	
		Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
3 Girders	1 lane	69.5	-0.0136
	2 lanes (ทางเดียวกัน)	78.5	-0.0151
	2 lanes (สวนทางกัน)	78.5	-0.015
5 Girders	1 lane	46.5	-0.0093
	2 lanes (ทางเดียวกัน)	47.5	-0.0097
	2 lanes (สวนทางกัน)	47.5	-0.0097

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุดจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีรถวิ่ง 2 ช่องจราจร ทั้งกรณีสะพานที่มี 3 และ 5 คาน โดยในกรณีสะพานที่มี 3 คาน ค่าการแอ่นตัวและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับกรณีที่รถวิ่ง 1 ช่องจราจร ค่าการเพิ่มขึ้นนี้เกิดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของสะพานที่มี 5 คาน จะพบว่าค่าการแอ่นตัวและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 4 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มจำนวนคานจะทำให้ค่าสถิติเอนของสะพานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจากรถวิ่ง 2 ช่องจราจรจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ภาพที่ 5.7 และ 5.8 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับทิศทางการวิ่งของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งกรณีที่มียานบรรทุกวิ่ง 2 ช่องจราจร จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุด



ภาพที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ



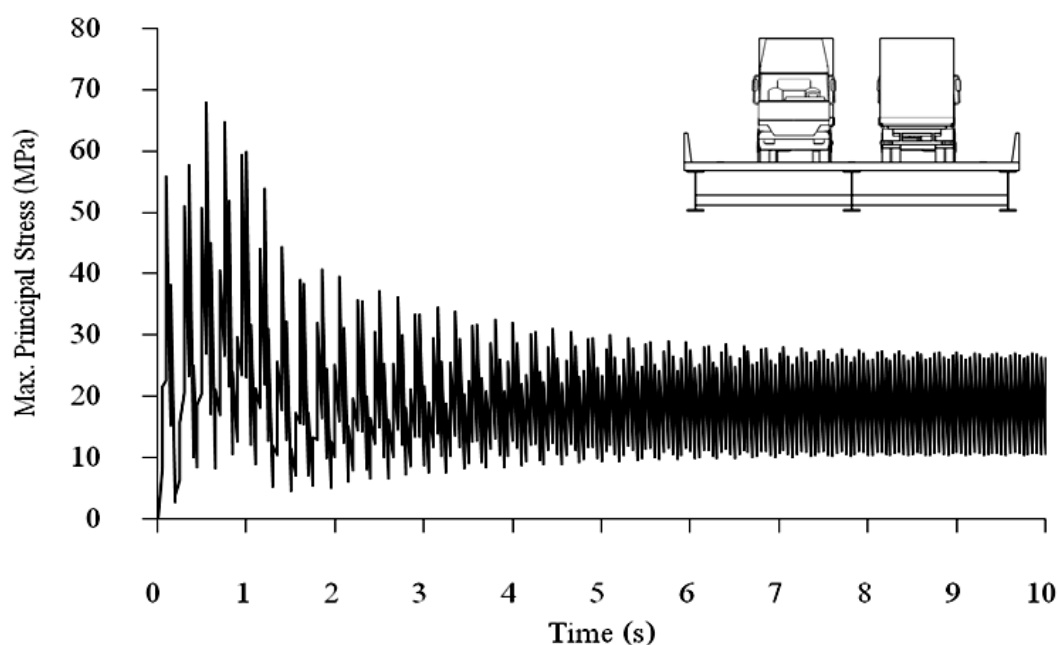
ภาพที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ

5.3 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากหัวข้อที่แล้วแสดงให้เห็นว่า กรณีที่รถวิ่ง 2 ช่องจราจร จะมีผลต่อหน่วยแรงสูงสุด และการแอ่นตัวสูงสุดของสะพานคอมโพสิต มากกว่ากรณีที่รถวิ่ง 1 ช่องจราจร ดังนั้นในการศึกษาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP จะพิจารณากรณีของรถที่วิ่งบนสะพานเพียงแค่กรณีเดียว คือ กรณีที่รถวิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน) และจะพิจารณาการเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิตด้วย CFRP 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัว I ที่ทำหน้าที่รับแรงดิ่ง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งผล

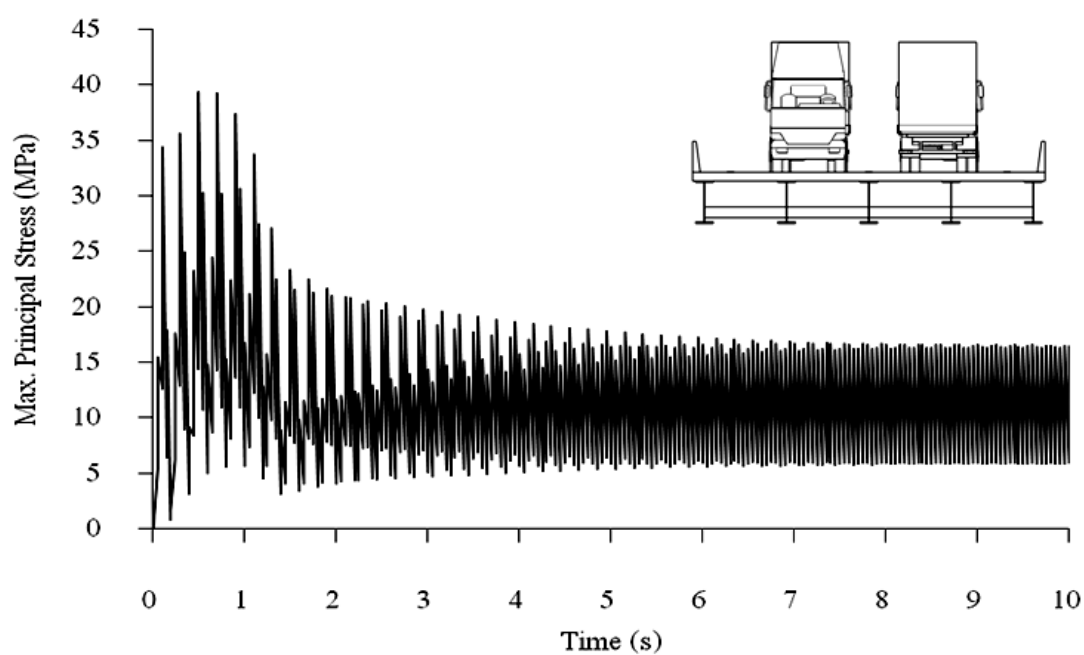
ที่ได้จากการวิเคราะห์สะพานคอมโพสิตที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP จากแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ในรูปของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานเหล็ก และค่าการแอ่นตัวสูงสุด

5.3.1 กรณีที่เสริมกำลังโดยใช้ CFRP laminate เป็นการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัว I ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง เพื่อช่วยในการรับแรงของปีกคานเหล็ก ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate ดังแสดงในภาพที่ 5.9 และ 5.10 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิต



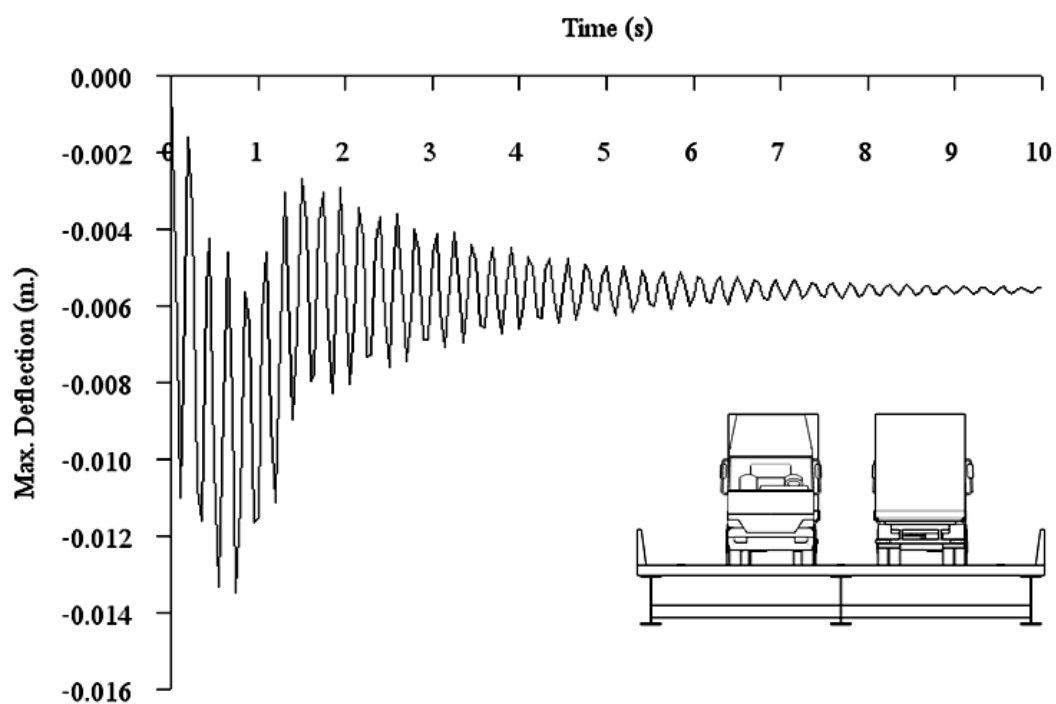
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

ภาพที่ 5.9 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



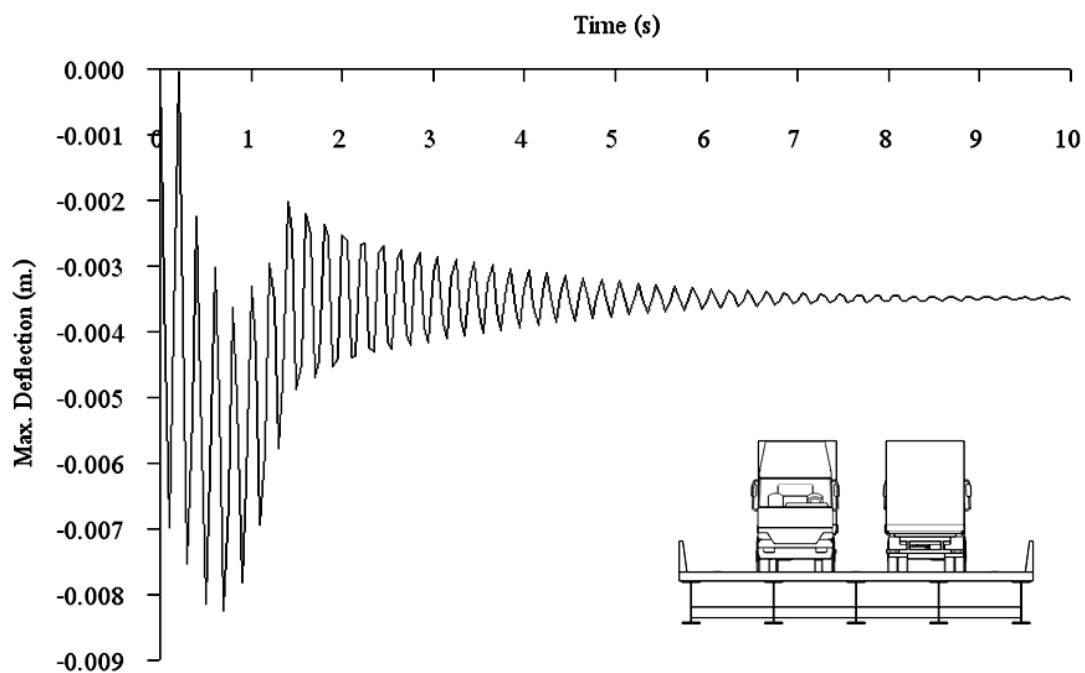
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.9 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate (ต่อ)



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

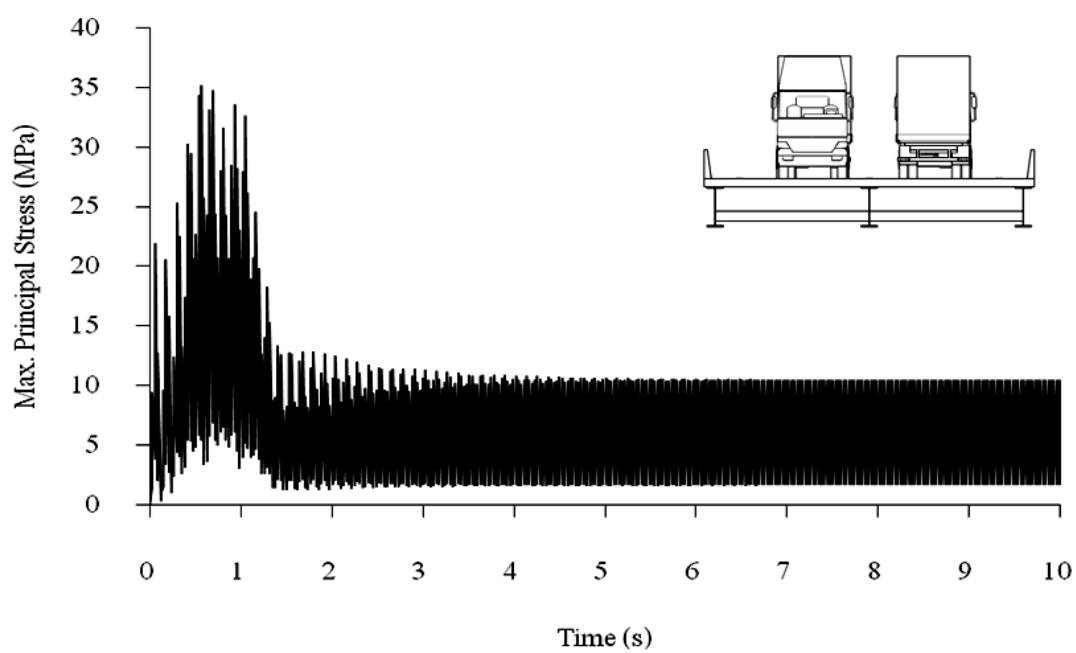
ภาพที่ 5.10 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



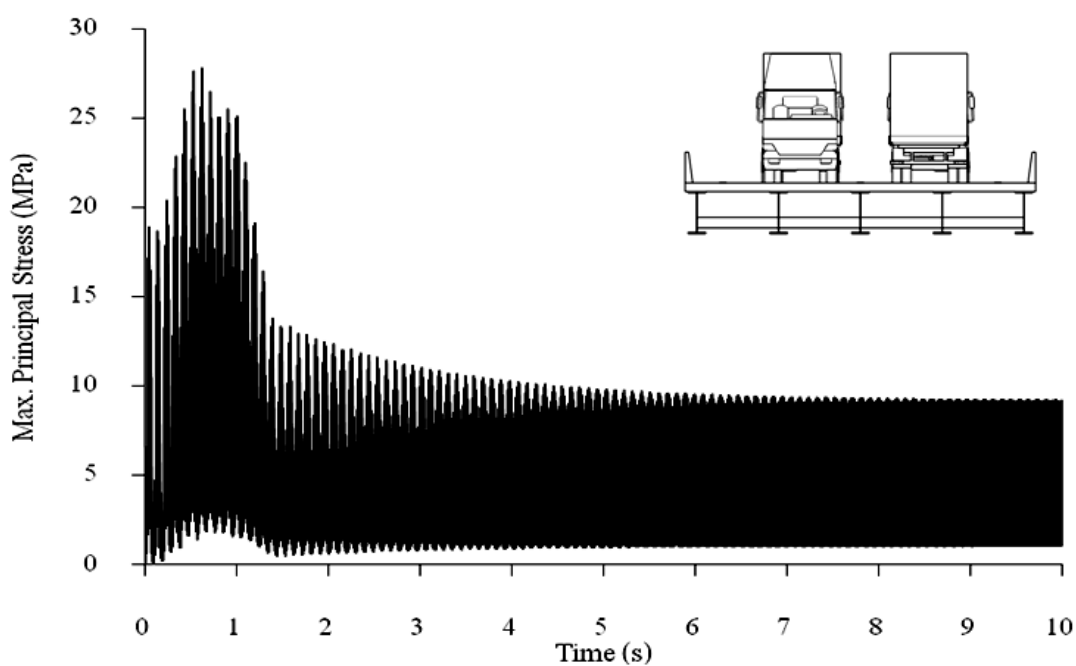
(ข) แบบสะพานที่มีคานหลัก 5 ตัว

ภาพที่ 5.10 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate (ต่อ)

5.3.2 กรณีที่เสริมกำลังโดยใช้ CFRP composite deck เป็นการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ดังแสดงในภาพที่ 5.11 และ 5.12 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิต

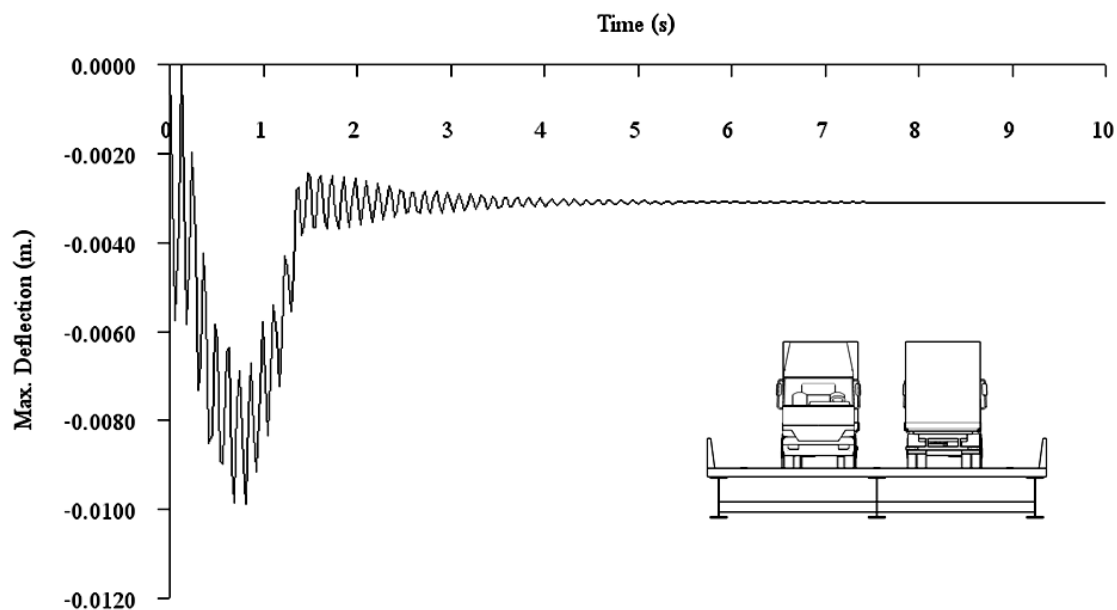


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

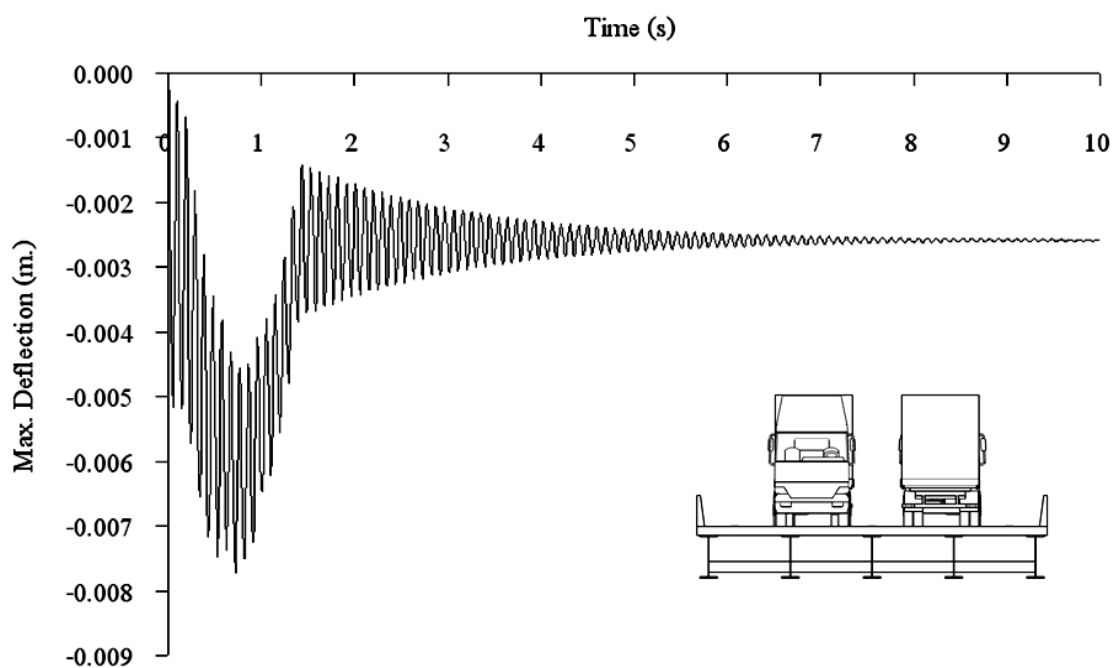


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.11 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.12 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

จากหัวข้อที่ 5.3.1 ถึง 5.3.2 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ทั้งแบบ CFRP laminate และ CFRP composite deck ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่

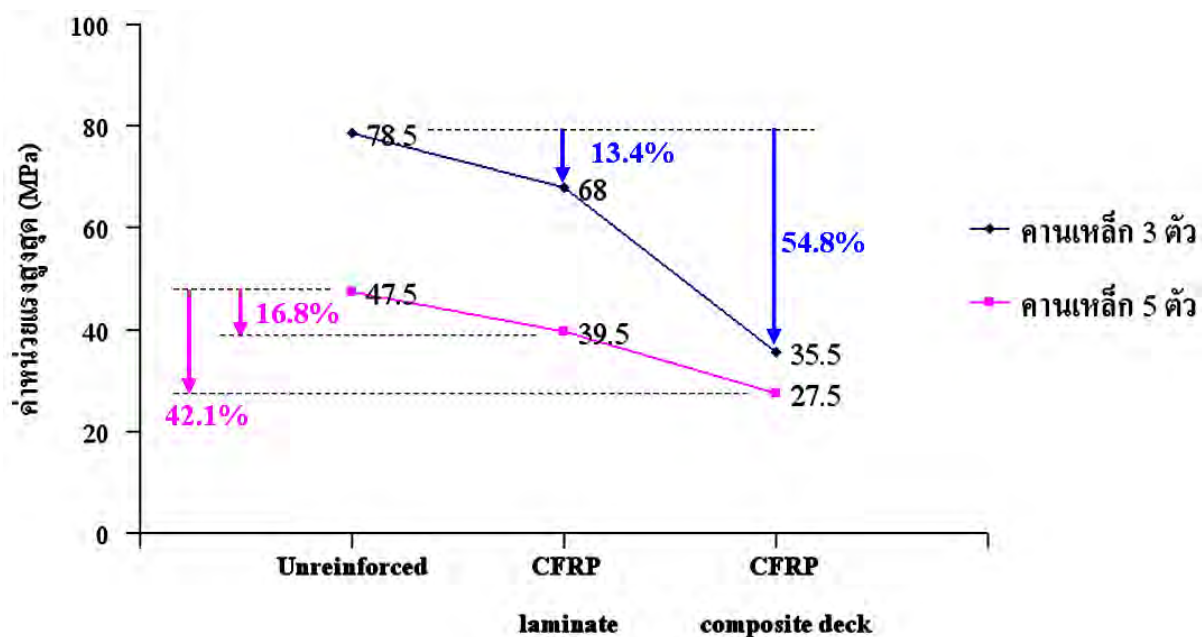
เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน) เพราะเป็นกรณีที่ทำให้ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ที่สูงที่สุด

ตารางที่ 5.3 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

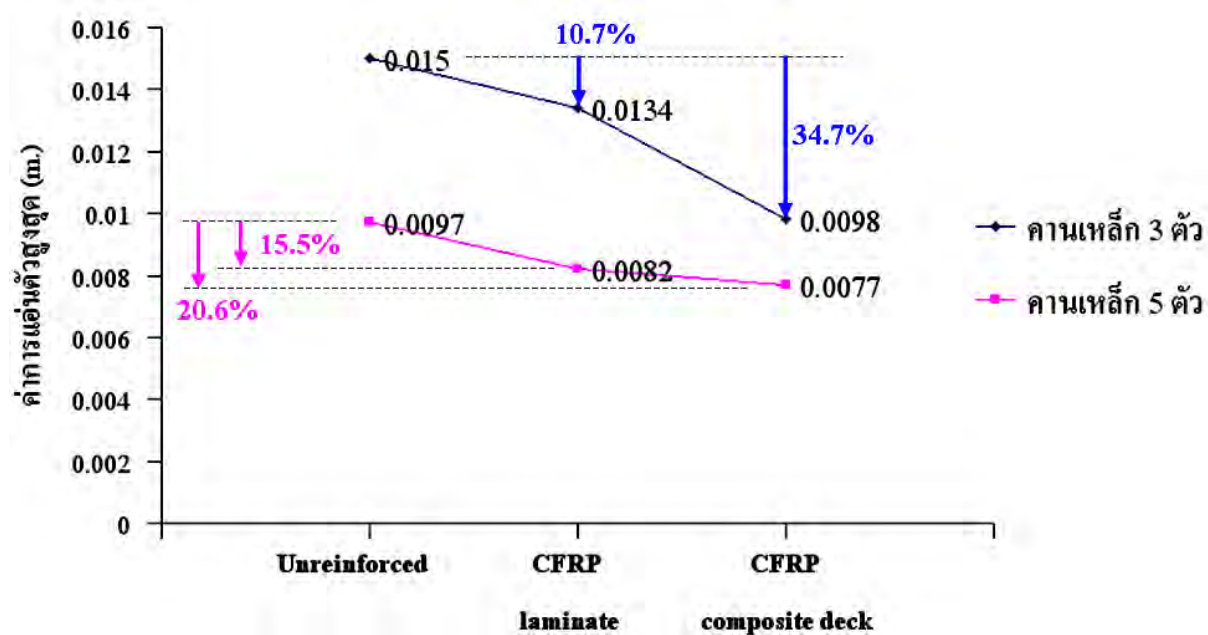
รูปแบบของ สะพาน	กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate		กรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	
	Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)	Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
3 Girders 2 lanes	68.0	-0.0134	35.5	-0.0098
5 Girders 2 lanes	39.5	-0.0082	27.5	-0.0077

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck จะให้ค่าการตอบสนองที่ต่ำกว่า สะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate เช่น สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 ตัว เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck จะทำให้ค่าหน่วยแรง ลดลงประมาณร้อยละ 48 และค่าการแอ่นตัวลดลงประมาณร้อยละ 27 จากสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate ส่วนสะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 5 ตัว เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck จะทำให้ค่าหน่วยแรง ลดลงประมาณร้อยละ 30 และค่าการแอ่นตัวลดลงประมาณร้อยละ 6 จากสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

ภาพที่ 5.13 และ 5.14 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP แบบต่าง ๆ ซึ่งกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์ลดลงกว่า กรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP

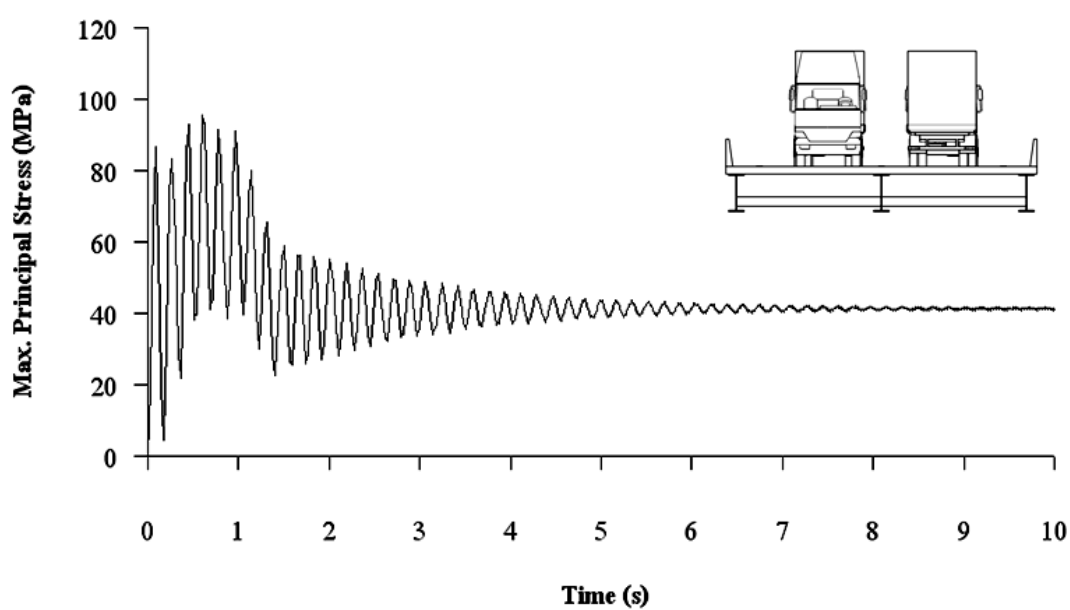


ภาพที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP

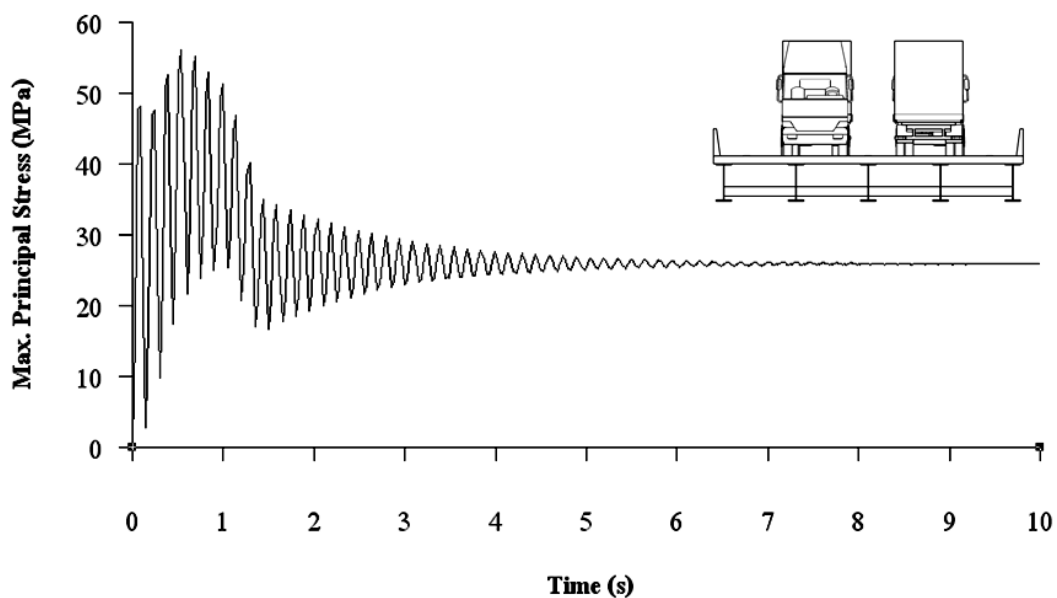
5.4 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น (ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น) จะพิจารณาสะพานมีรอยร้าวชนิด through thickness 2 ขนาดคือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่บริเวณปีกข้างบริเวณกึ่งกลางของคานเหล็กรูปตัว I ซึ่งจะเป็นสะพานที่มีคานเหล็กทั้ง 3 และ 5 ตัว

5.4.1 กรณีที่ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ที่คานเหล็กจะมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ดังแสดงในภาพที่ 5.15 และ 5.16 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิต

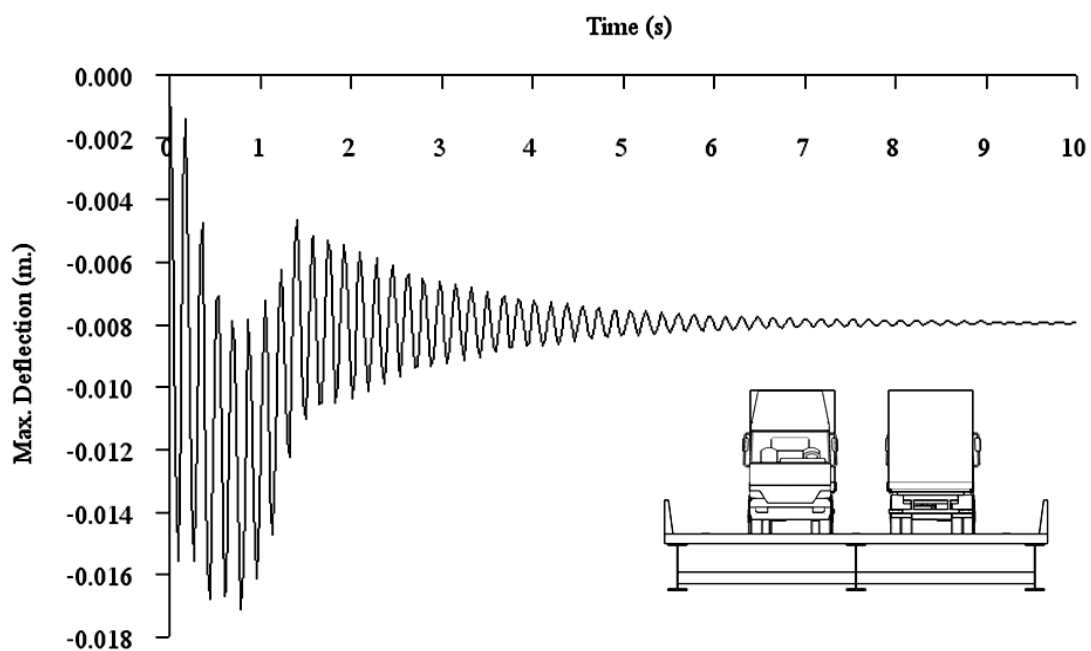


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

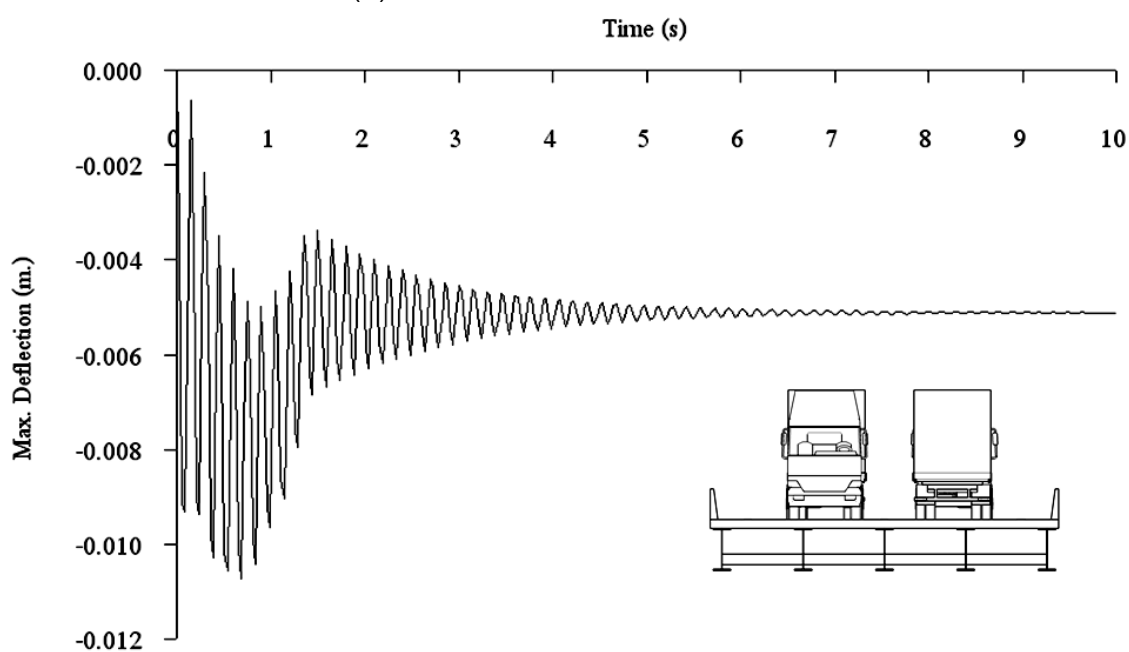


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.15 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP



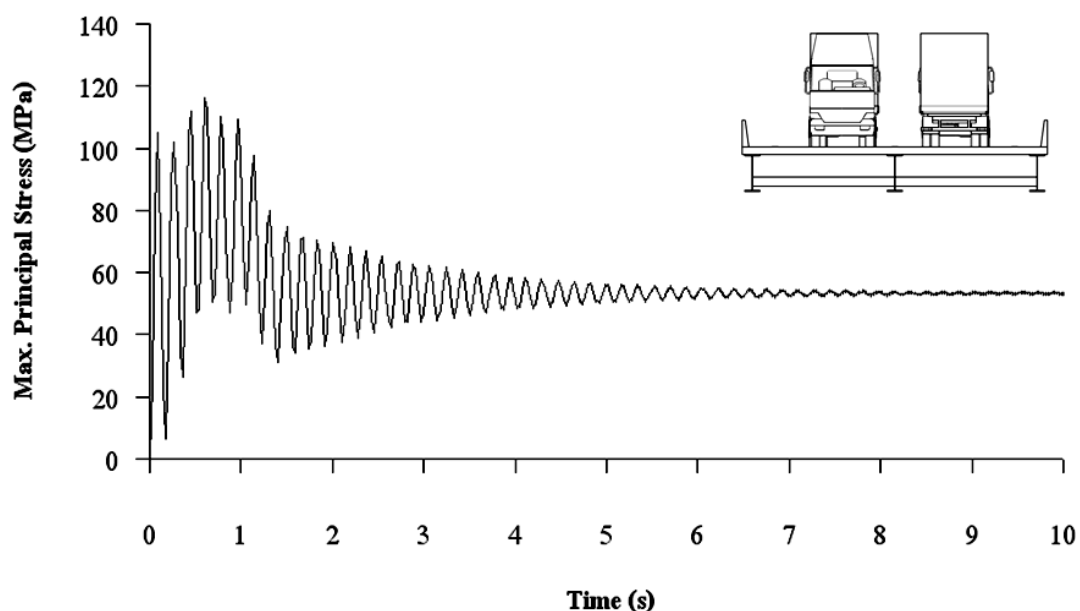
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



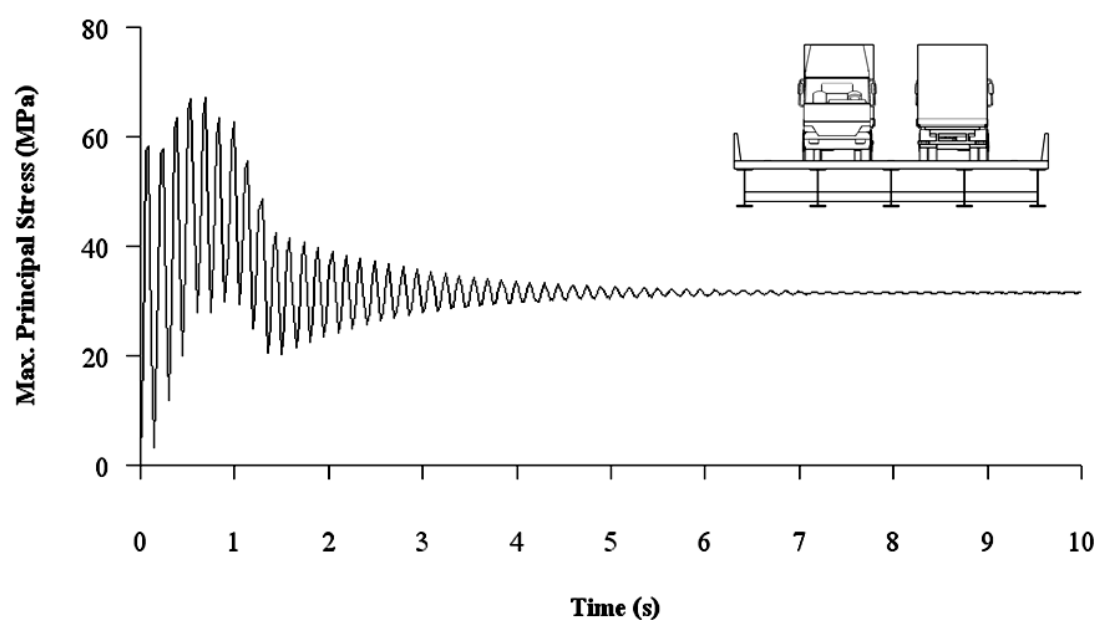
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.16 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

5.4.2 กรณีที่ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ที่คานเหล็กจะมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ดังแสดงในภาพที่ 5.17 และ 5.18 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิต

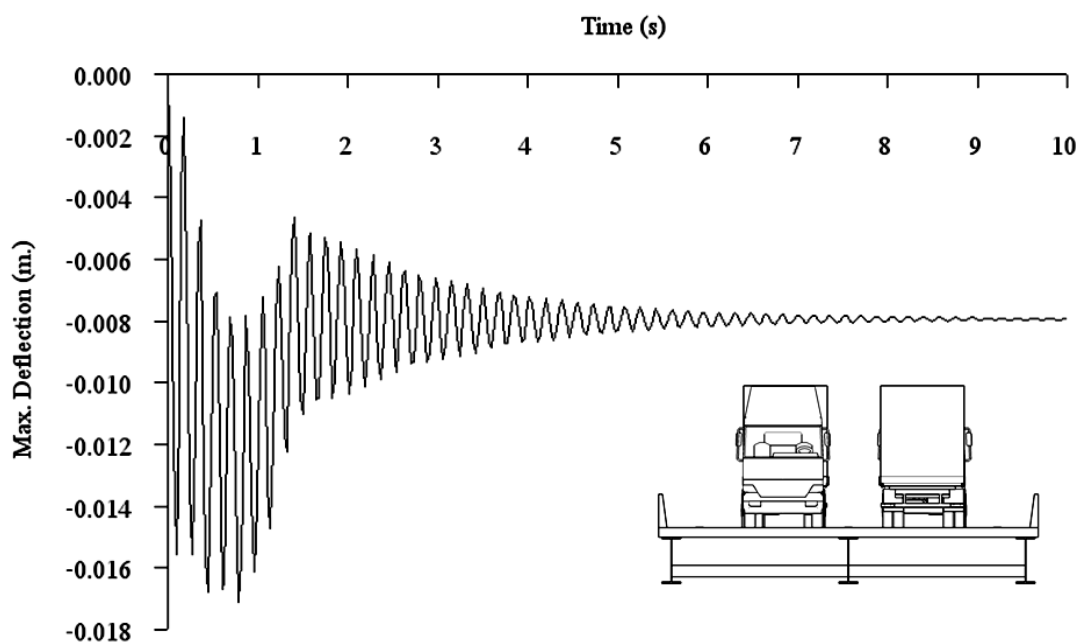


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

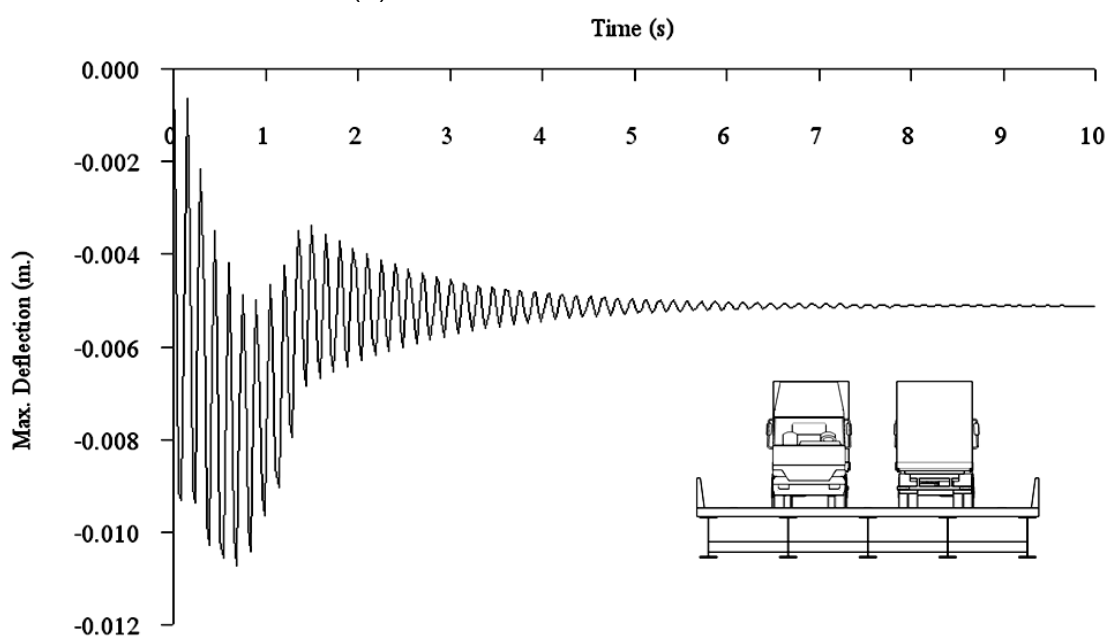


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.17 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.18 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

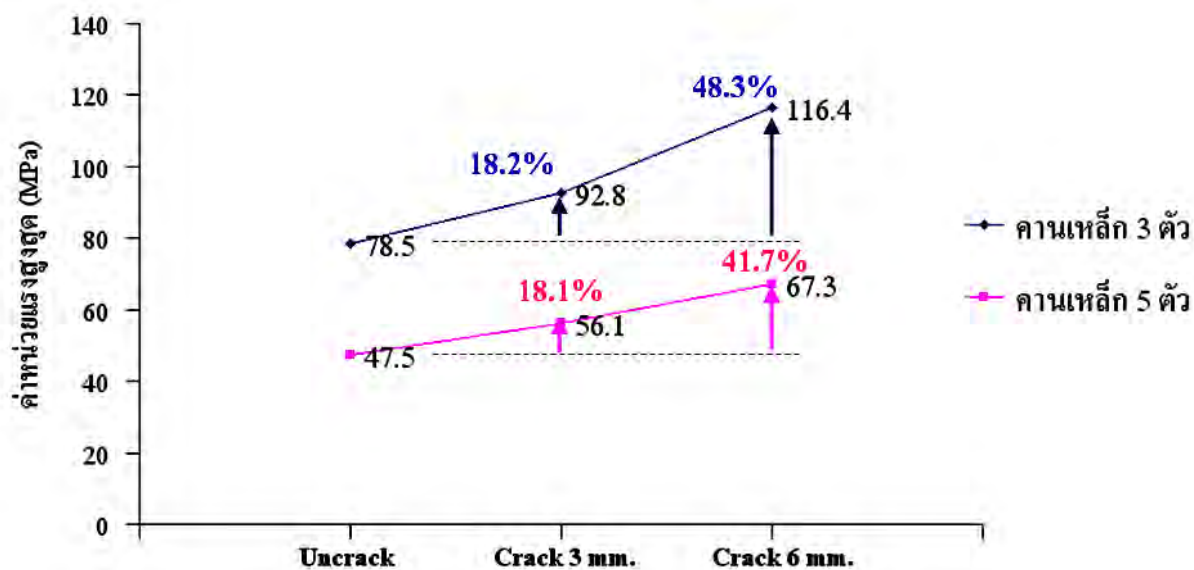
จากหัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.2 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

ตารางที่ 5.4 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร

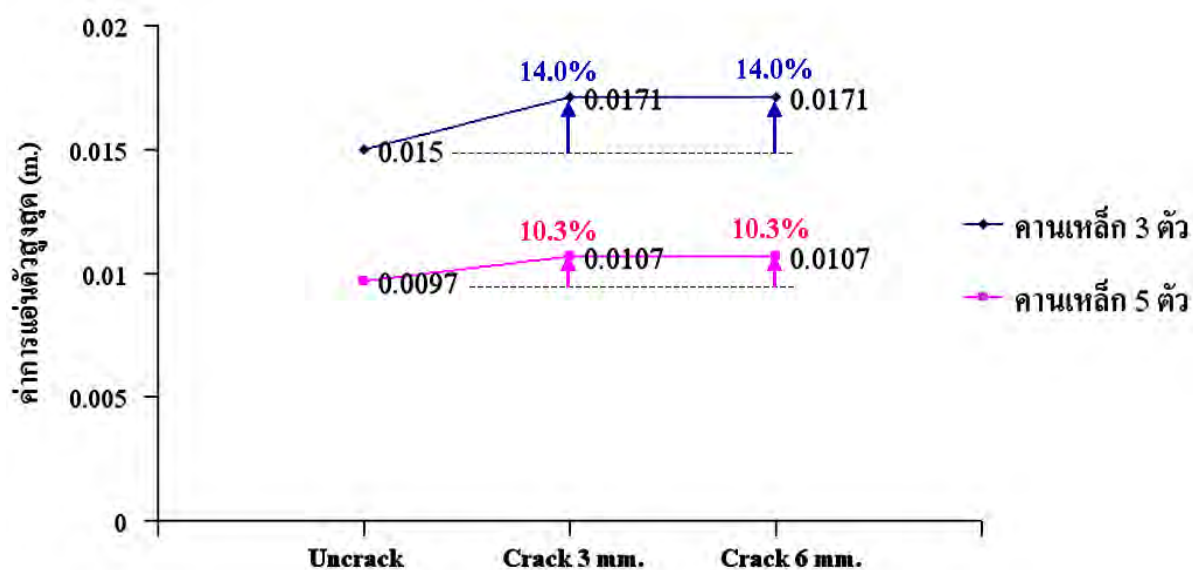
รูปแบบของสะพาน		กรณีที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	
		Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
รอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร	3 Girders	92.8	-0.0171
	5 Girders	56.1	-0.0107
รอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร	3 Girders	116.4	-0.0171
	5 Girders	67.3	-0.0107

จากตารางที่ 5.4 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีรอยร้าว 6 มิลลิเมตร ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับกรณีที่มีรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ของสะพานที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว ส่วนสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าวเริ่มต้นไม่เท่ากันจะมีผลต่อค่าการแอ่นตัวไม่มาก

ภาพที่ 5.19 และ 5.20 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตมีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์เพิ่มขึ้นมากกว่า กรณีที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5.19 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ

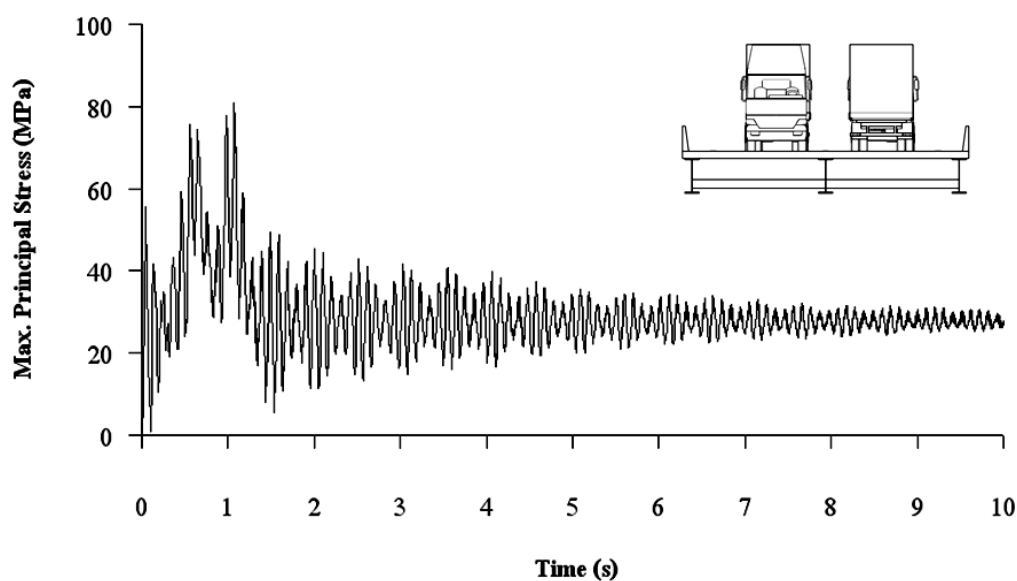


ภาพที่ 5.20 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ

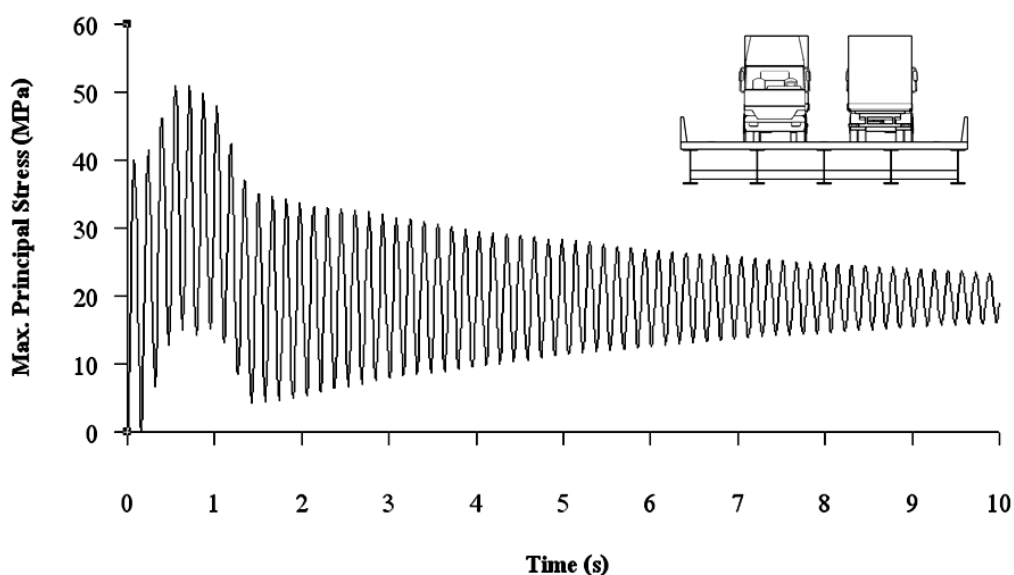
5.5 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และเสริมกำลังด้วย CFRP

สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น (ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น) จะพิจารณาสะพานมีรอยร้าวชนิด through thickness 2 ขนาดคือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่บริเวณปีกล่างบริเวณกึ่งกลางของคานเหล็กรูปตัว I ซึ่งจะเป็นสะพานที่มีคานเหล็กทั้ง 3 และ 5 ตัว ทำการเสริมกำลังด้วย CFRP laminate และ CFRP composite deck

5.5.1 กรณีที่ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ที่คานเหล็กจะมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ดังแสดงในภาพที่ 5.21 และ 5.22 แสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP ส่วนภาพที่ 5.23 และ 5.24 แสดงค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP

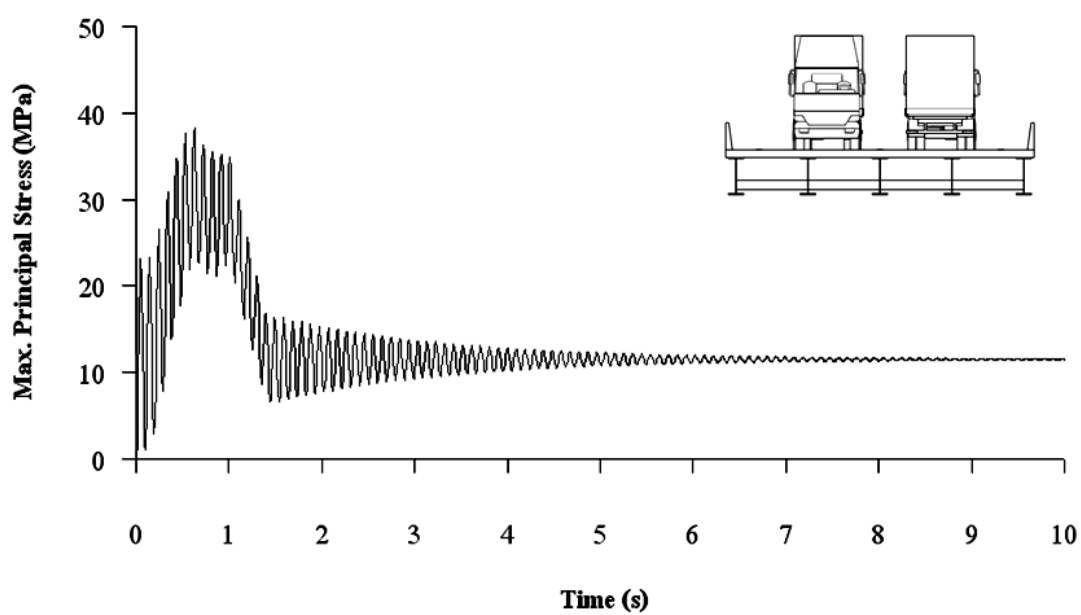
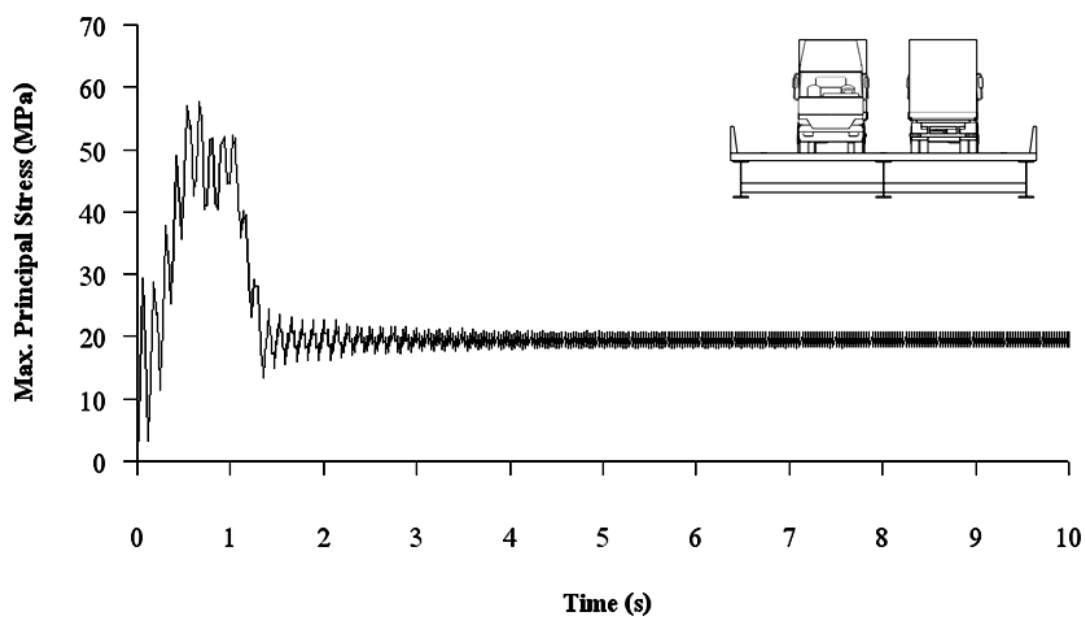


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

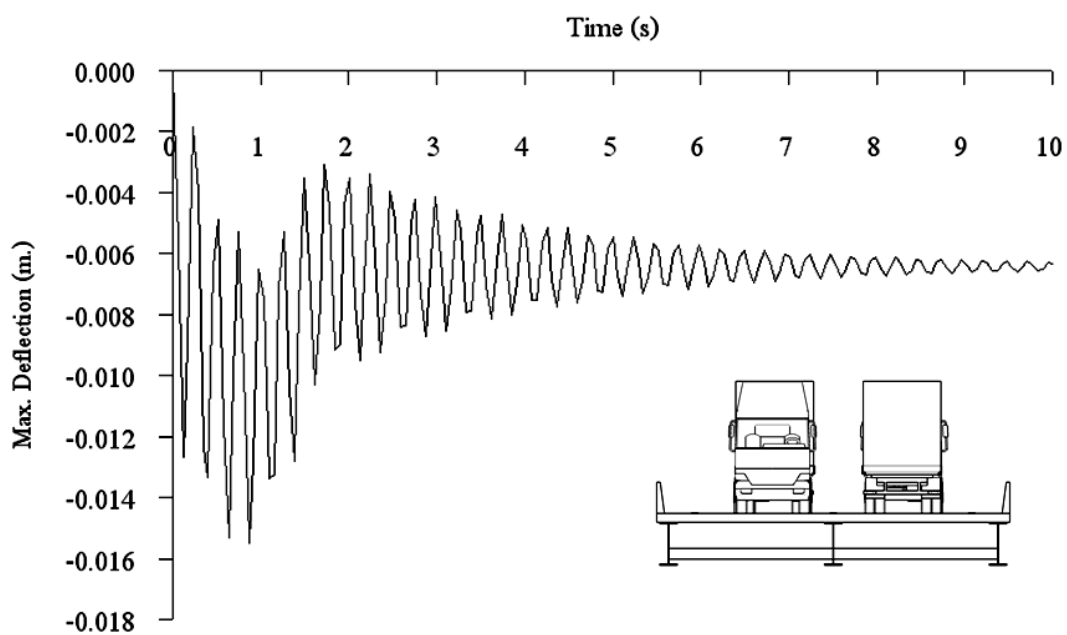


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

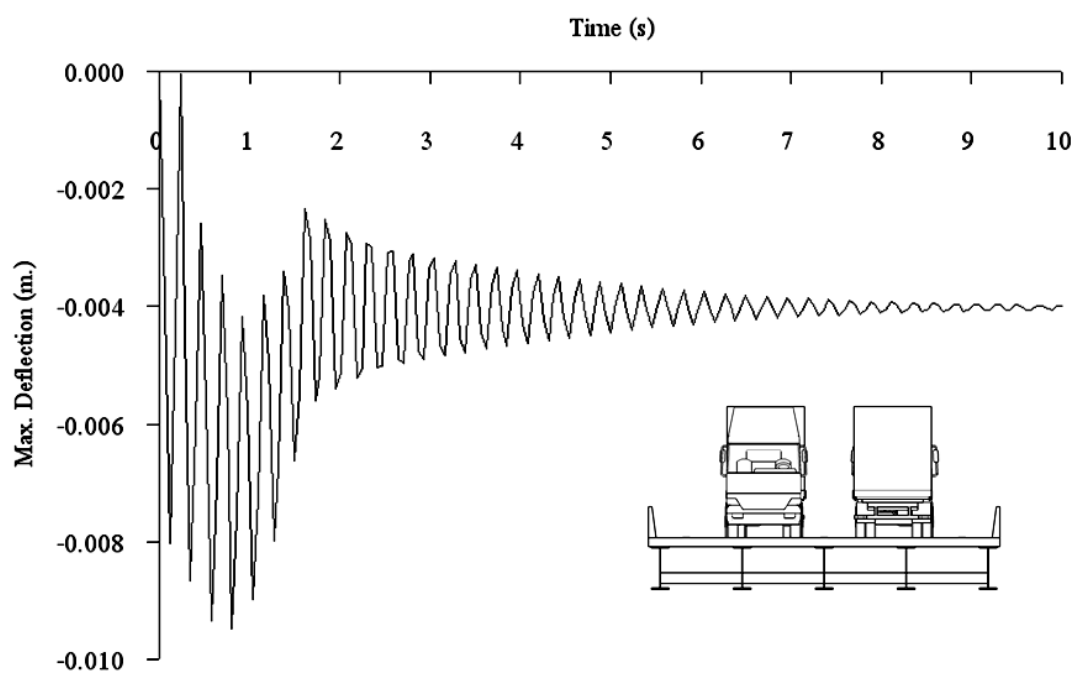
ภาพที่ 5.21 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.22 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

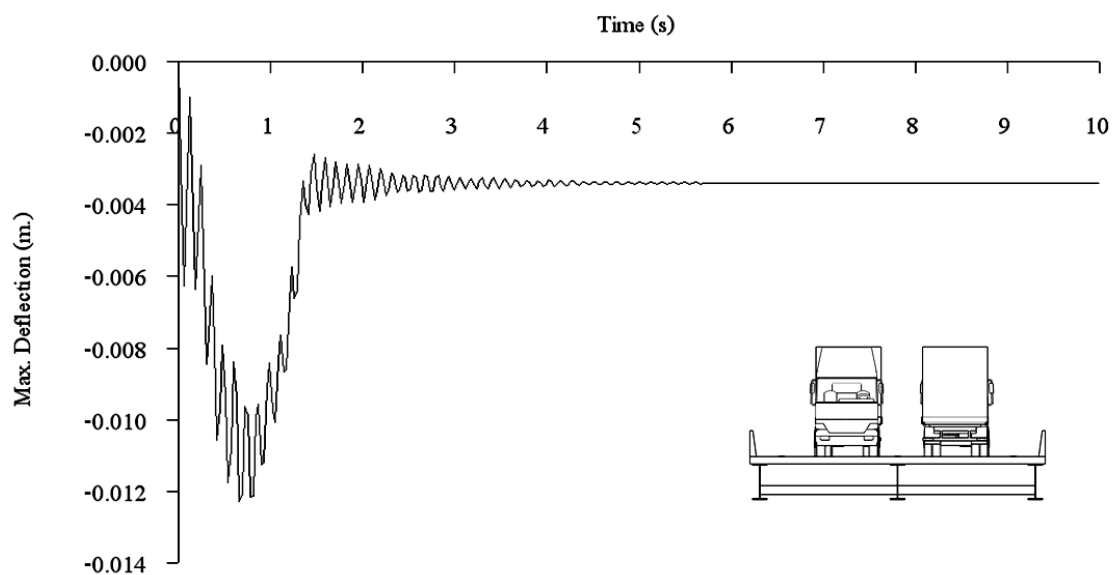


(ก) แบบสะพานที่มีคานหลัก 3 ตัว

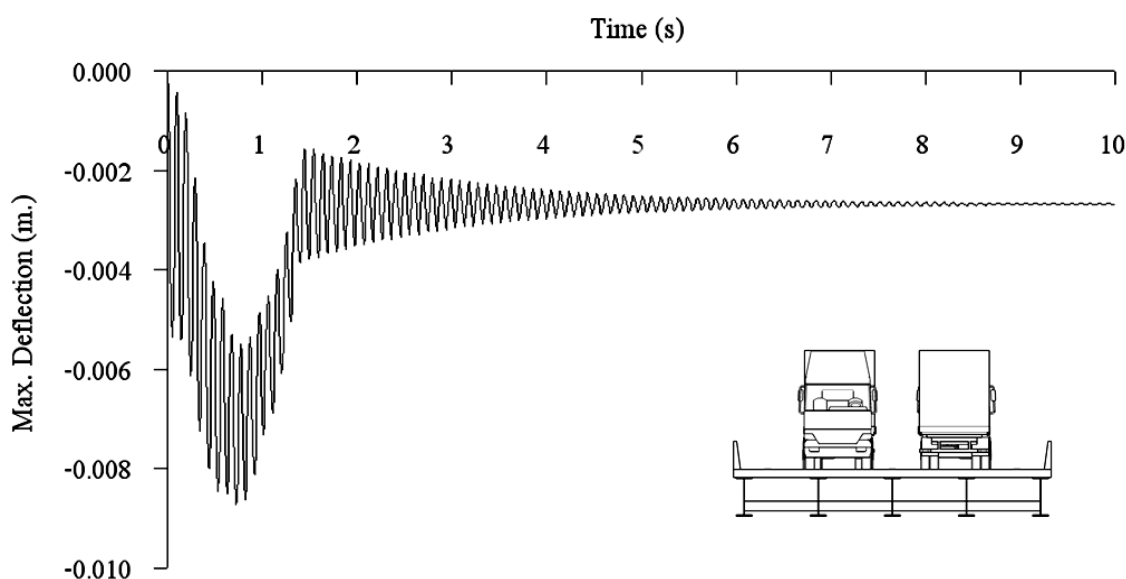


(ข) แบบสะพานที่มีคานหลัก 5 ตัว

ภาพที่ 5.23 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



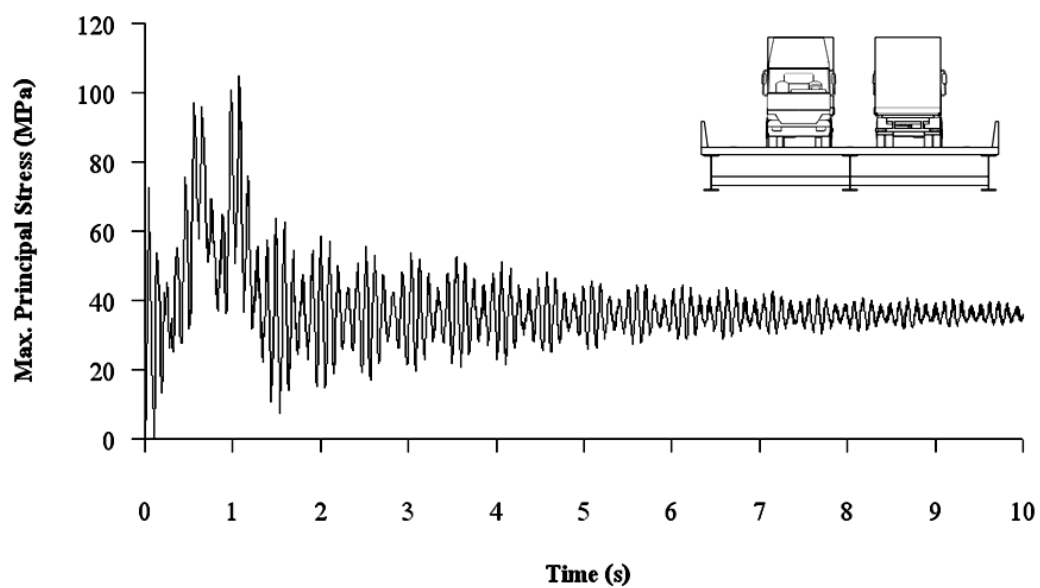
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



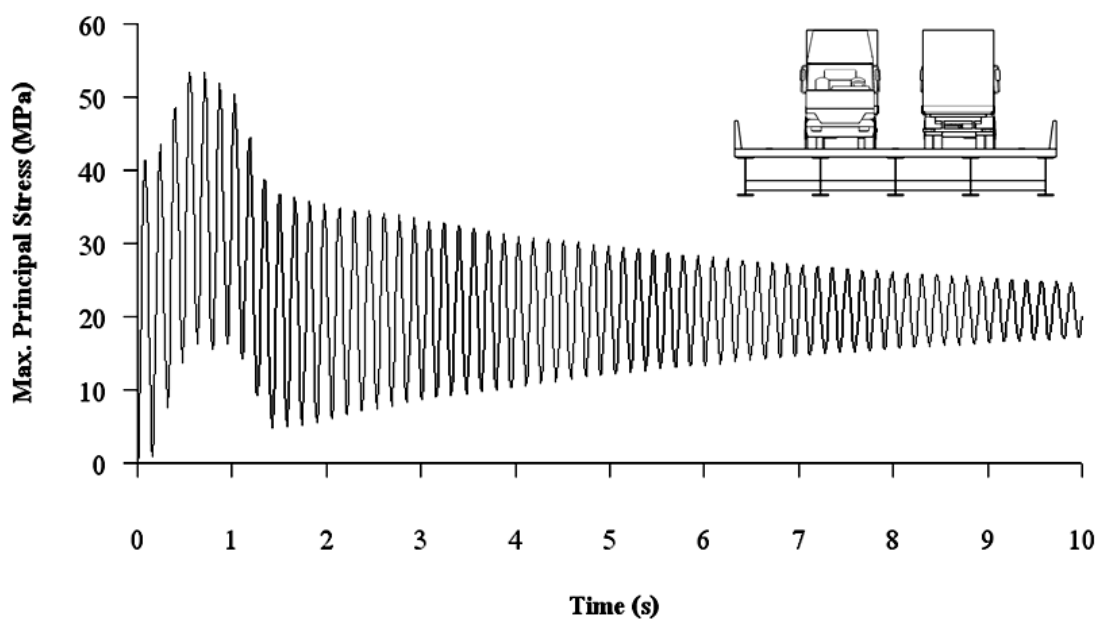
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.24 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

5.5.2 กรณีที่ขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ในกรณีนี้ที่คานเหล็กจะมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ดังแสดงในภาพที่ 5.25 และ 5.26 แสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP ส่วนภาพที่ 5.27 และ 5.28 แสดงค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP

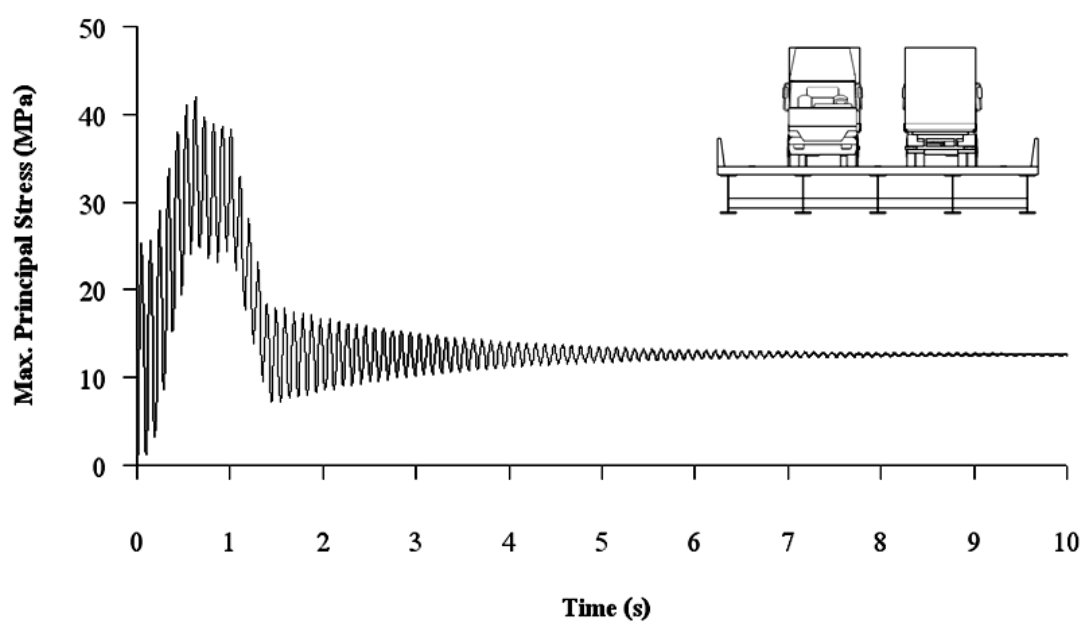
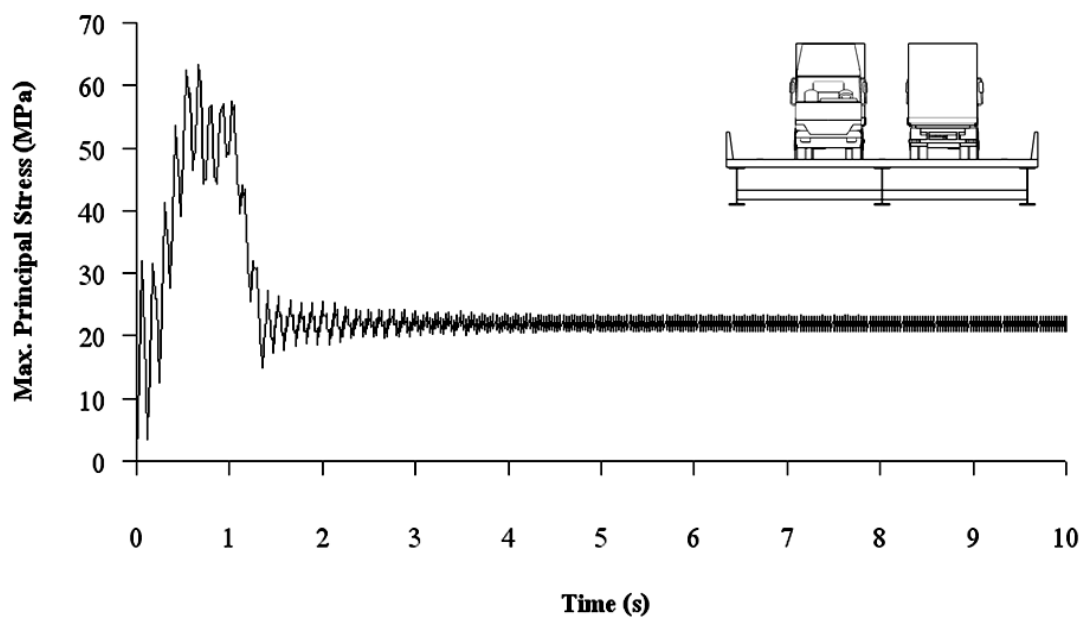


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

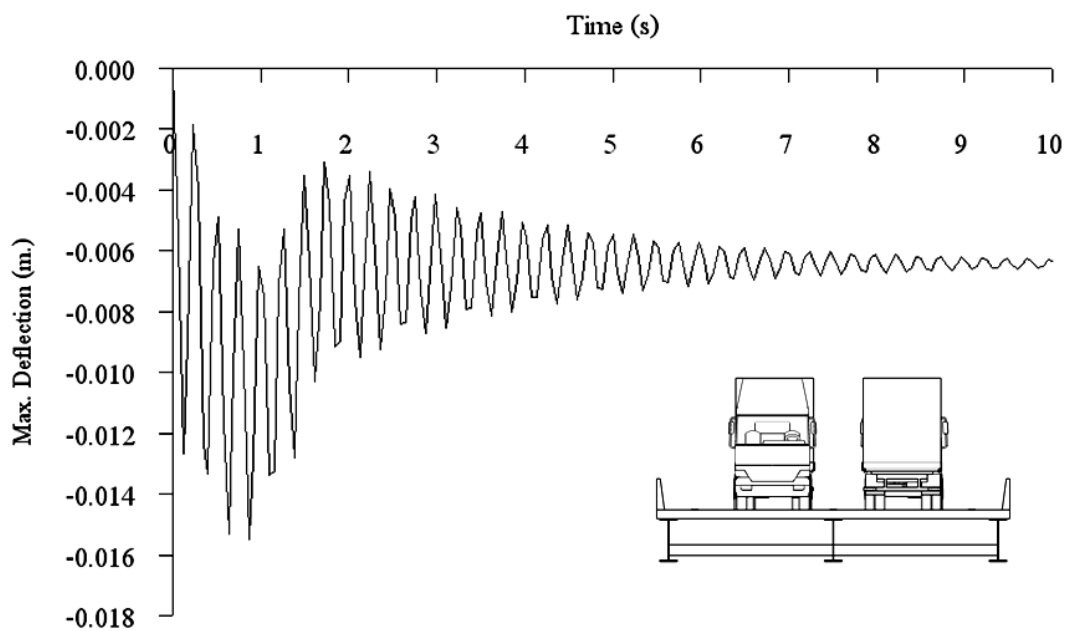


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

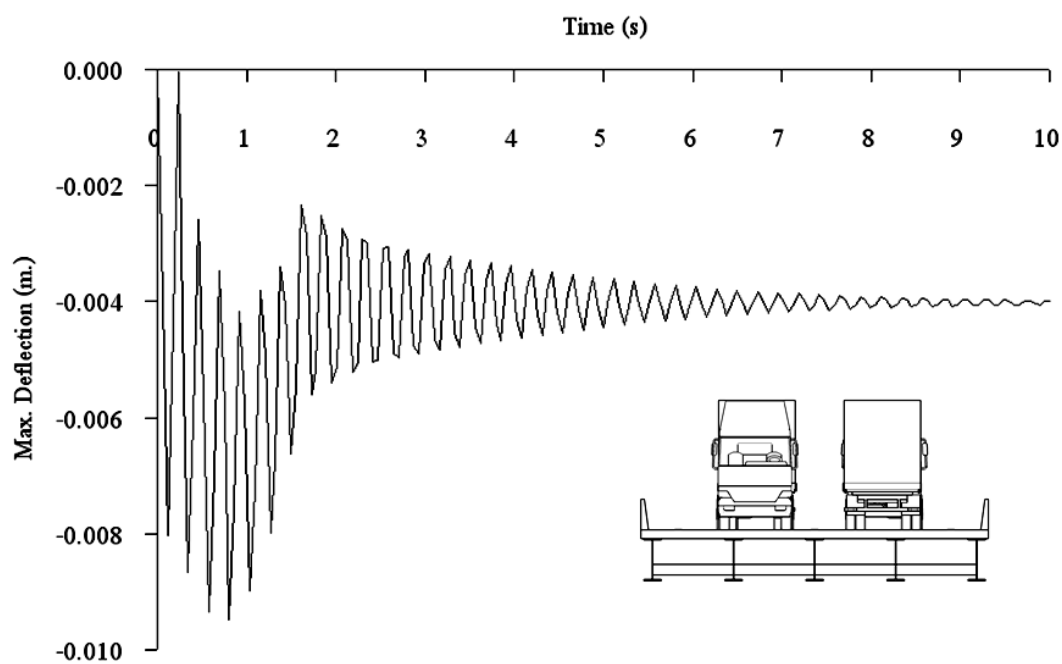
ภาพที่ 5.25 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.26 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

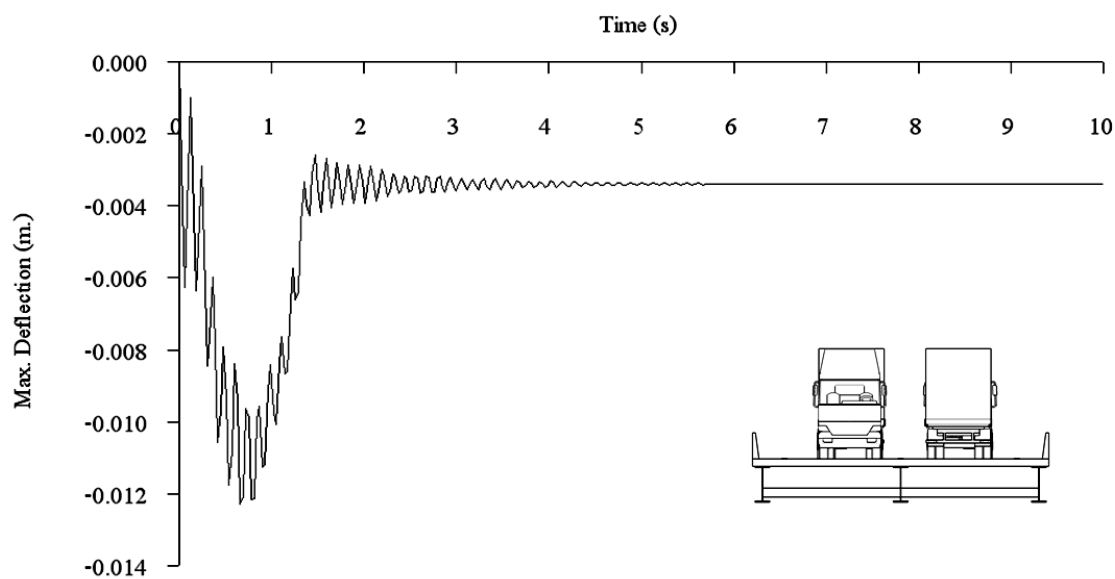


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

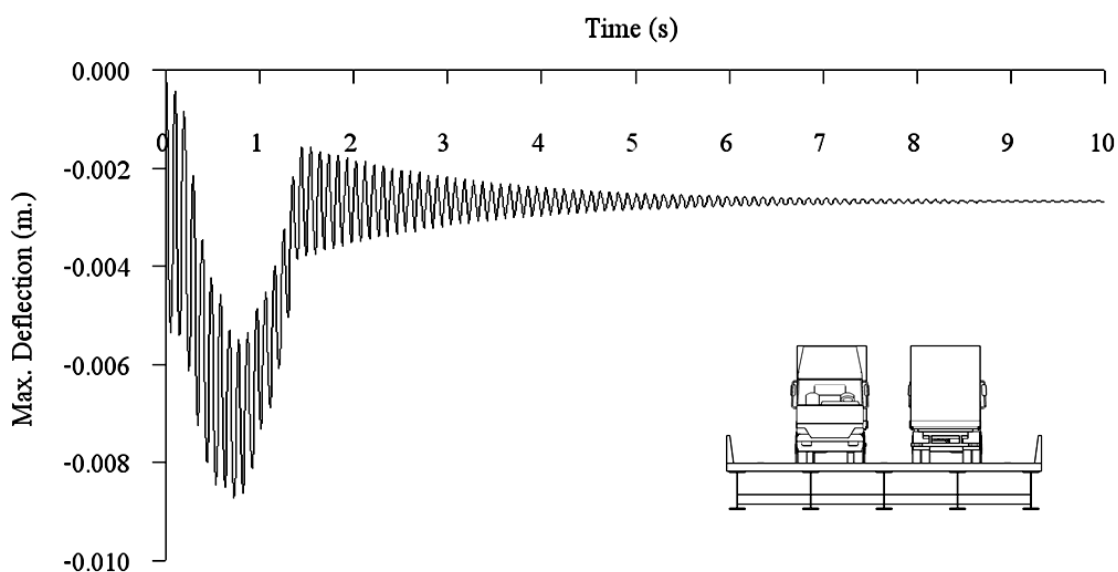


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.27 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.28 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

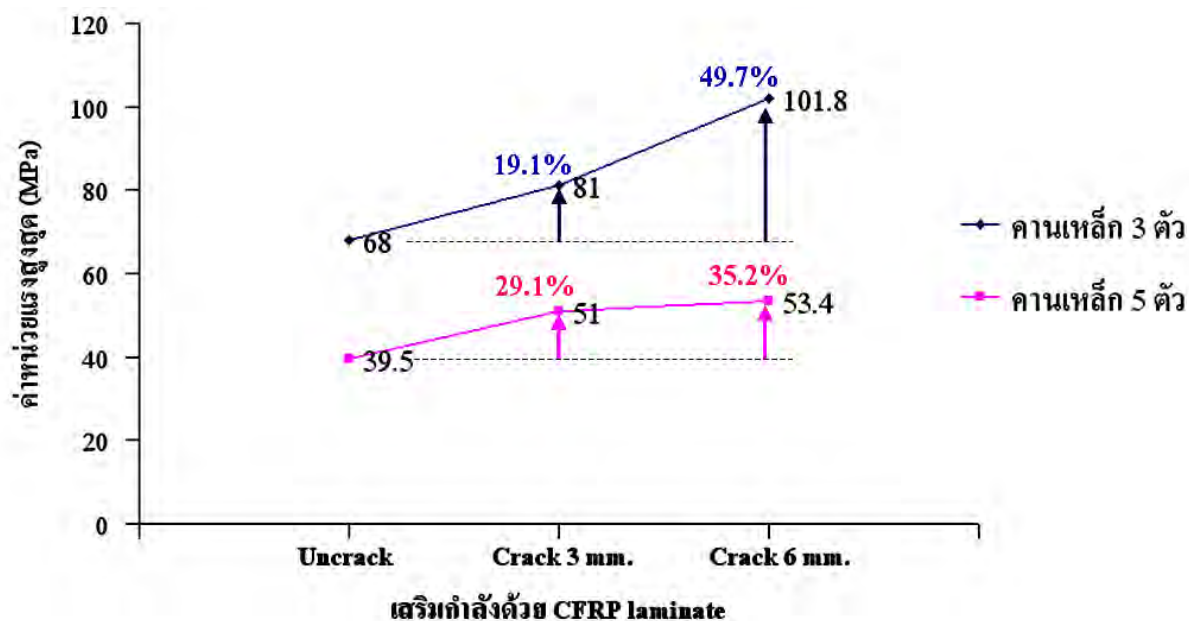
จากหัวข้อที่ 5.5.1 ถึง 5.5.2 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

ตารางที่ 5.5 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร

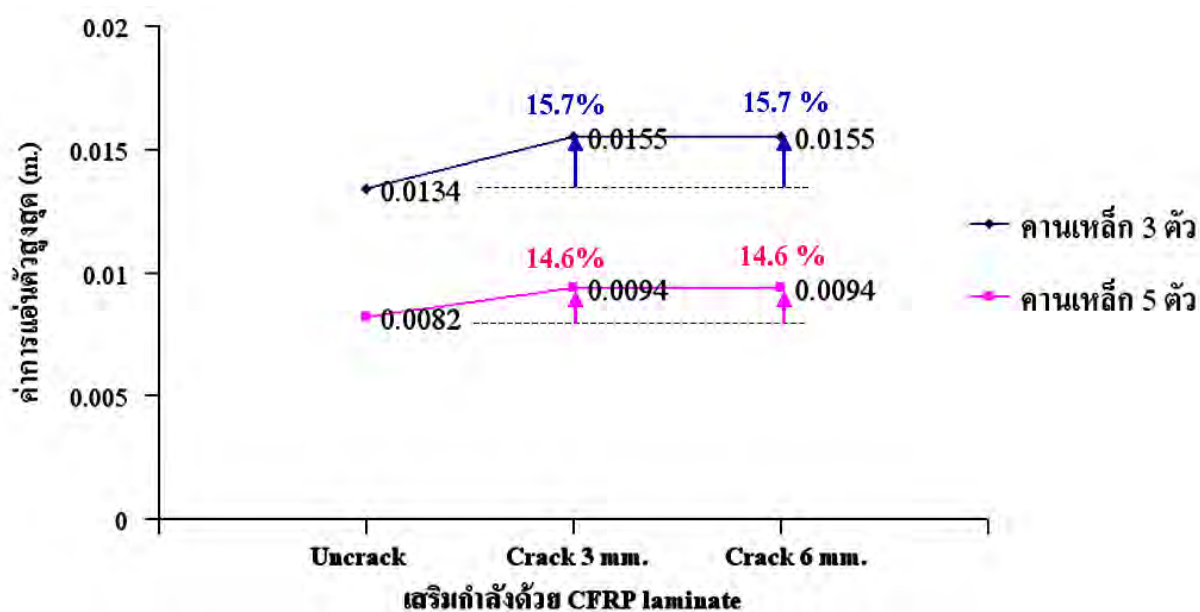
รูปแบบของสะพาน		กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate		กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	
		Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)	Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
รอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร	3 Girders	81.0	-0.0155	57.8	-0.0122
	5 Girders	51.0	-0.0094	38.3	-0.0087
รอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร	3 Girders	101.8	-0.0155	63.2	-0.0122
	5 Girders	53.4	-0.0094	41.9	-0.0087

จากตารางที่ 5.5 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate ในกรณีที่มีรอยร้าว 6 มิลลิเมตร ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่มีรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 20 สำหรับสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว และร้อยละ 5 สำหรับสะพานเหล็ก 5 ตัว ส่วนการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ในกรณีที่มีรอยร้าว 6 มิลลิเมตร ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่มีรอยร้าว 3 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 10 สำหรับสะพานที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว สำหรับค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร นั้นมีค่าแตกต่างกันไม่มาก

ภาพที่ 5.29 และ 5.30 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตมีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์เพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่ขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร แต่ความเสียหายเริ่มต้น จะไม่มีผลต่อค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตมาก แต่จะส่งผลต่อจำนวนรอบของรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานมากกว่า

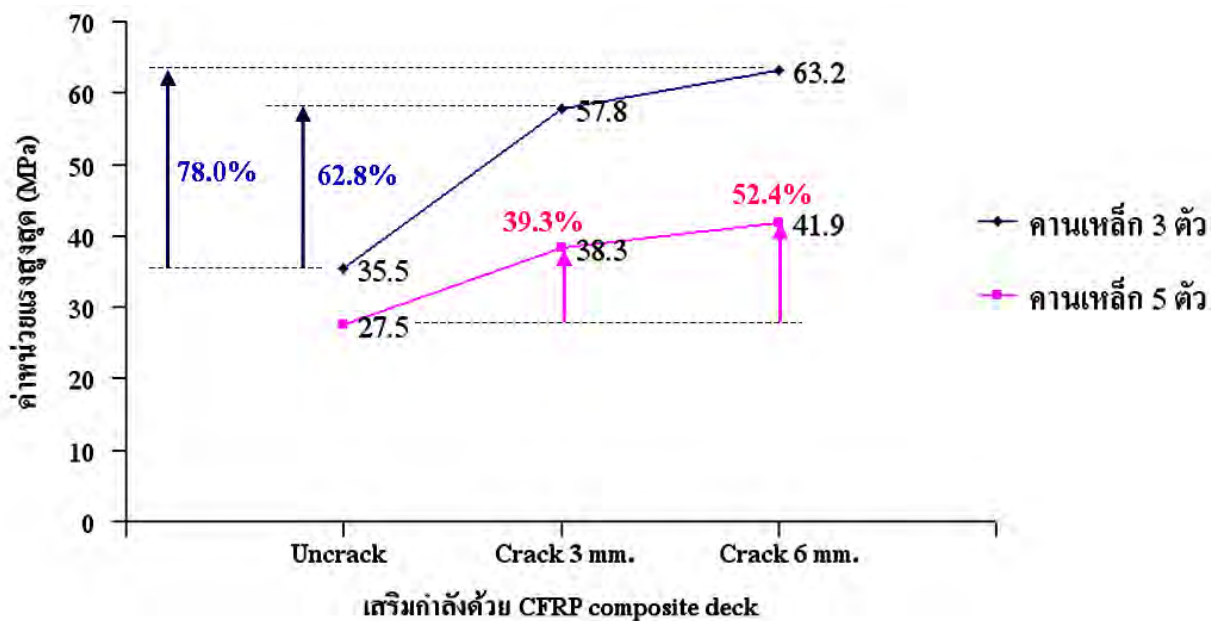


ภาพที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate

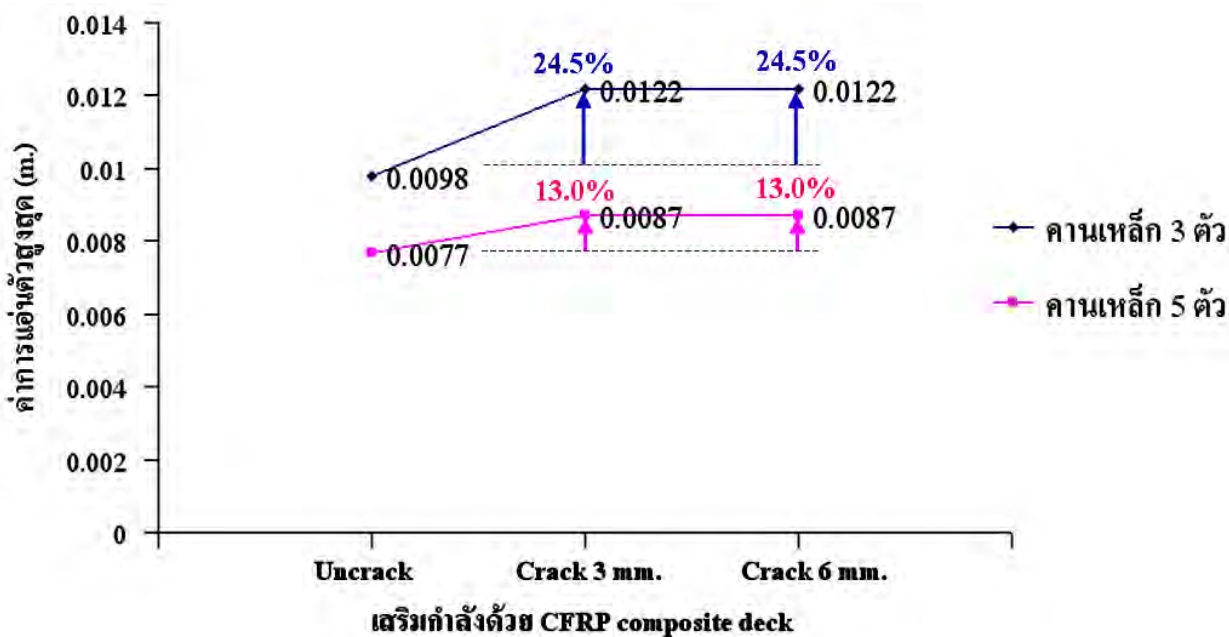


ภาพที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate

ภาพที่ 5.31 และ 5.32 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตมีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์เพิ่มขึ้นมากกว่า กรณีที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับกรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck



ภาพที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

5.6 ผลการวิเคราะห์ความล้าของสะพานคอมโพสิต

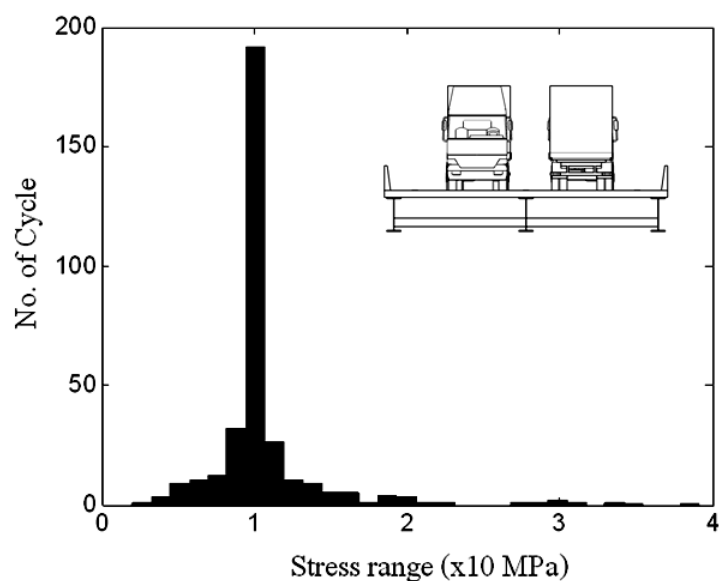
ในการวิเคราะห์ความล้าของสะพานคอมโพสิต จะพิจารณาจากค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งก็คือค่าหน่วยแรง โดยจะใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาค่าช่วงของหน่วยแรง (Stress range) และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycle per truck passage) จากกราฟค่าหน่วยแรงกับเวลา โดยค่าที่ได้จากวิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) จะนำไปหาอายุความล้า (Fatigue life) และจำนวนรอบที่รถบรรทุกทุกวิ่งผ่าน (Number of cycle) ของสะพานคอมโพสิต โดยใช้มาตรฐาน AASHTO

5.6.1 ช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Stress range and Number of stress range cycles per truck passage) การหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง จะใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหา ซึ่งจะอยู่ในรูปของกราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Stress range histogram) โดยจะใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางไฟไนท์อีลิเมนต์ และการพิจารณาความล้าของสะพานคอมโพสิต จะพิจารณาน้ำหนักของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน) เท่านั้น

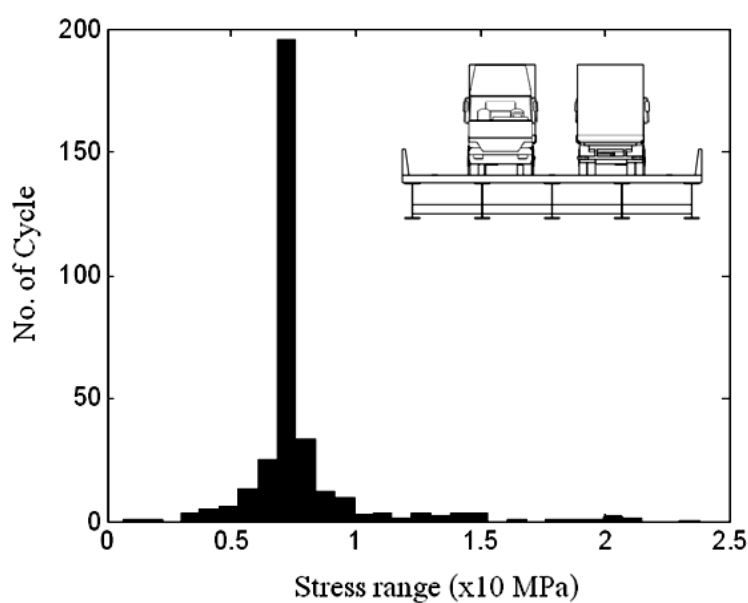
จากผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ทั้งกรณีที่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง ในหัวข้อที่ผ่านมา จะสามารถหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ได้ดังนี้

- สะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงกับเวลา ซึ่งเมื่อใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง นั้นจะแสดงในภาพที่ 5.33 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ซึ่งกรณีสะพานที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 38.5 และ 23.4 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 0.5 ทั้งสองรูปแบบ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



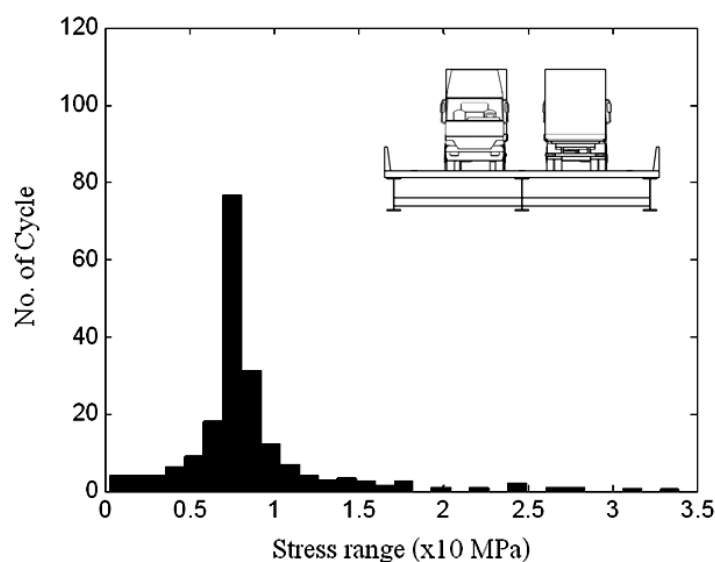
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.33 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

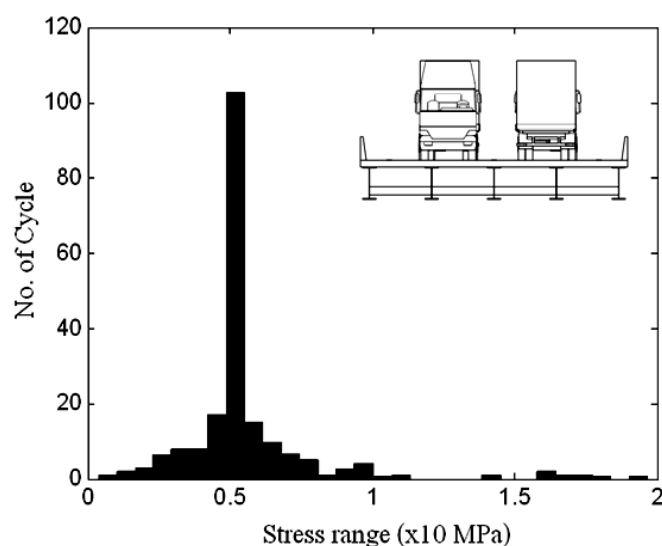
- สะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP

จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และ CFRP composite deck จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงกับเวลา แต่จะมีค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ที่น้อยกว่าจากกรณีสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งเมื่อใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาช่วงของหน่วย

แรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง นั้นจะแสดงในภาพที่ 5.34 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 33.4 และ 19.3 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 0.5 ทั้งสองรูปแบบ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

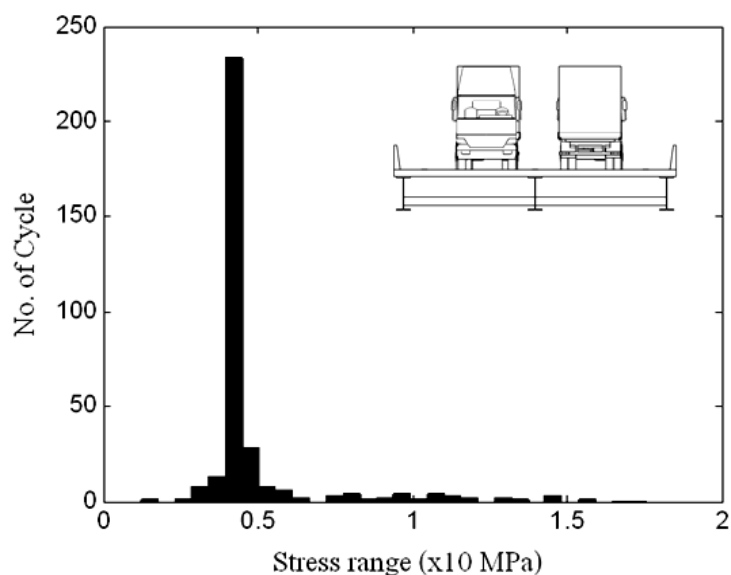


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

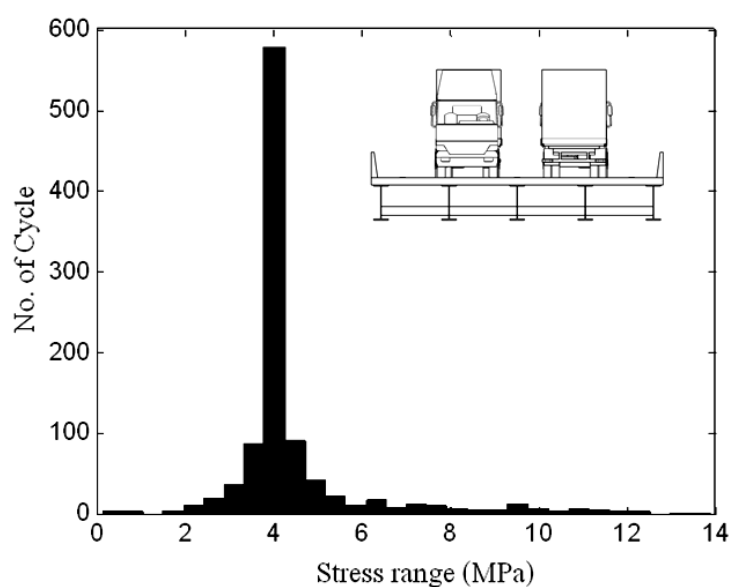
ภาพที่ 5.34 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

ภาพที่ 5.35 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5

ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 17.3 และ 13.6 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 0.5 ทั้งสองรูปแบบ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



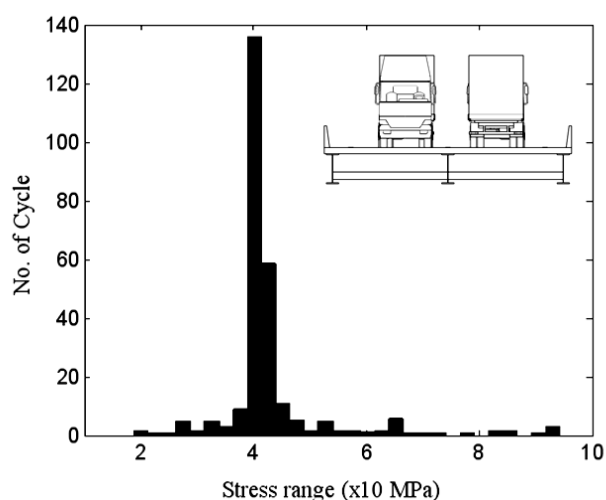
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.35 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

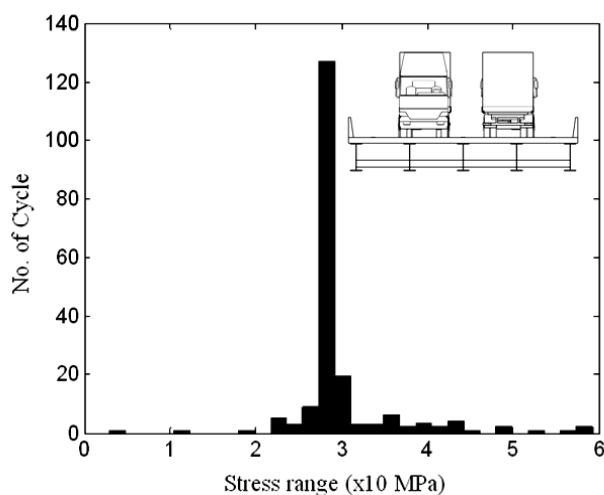
- สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น ขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรง

กับเวลา ซึ่งเมื่อใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง นั้นจะแสดงในภาพที่ 5.36 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 93.0 และ 58.5 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 3 และ 2 ตามลำดับ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

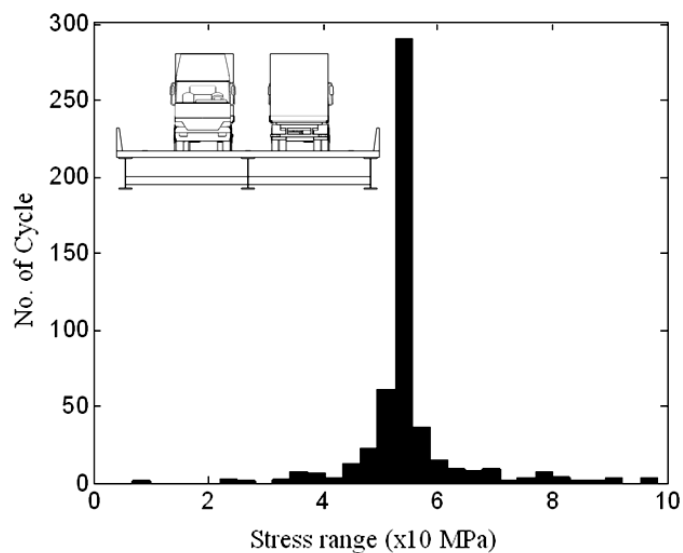


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

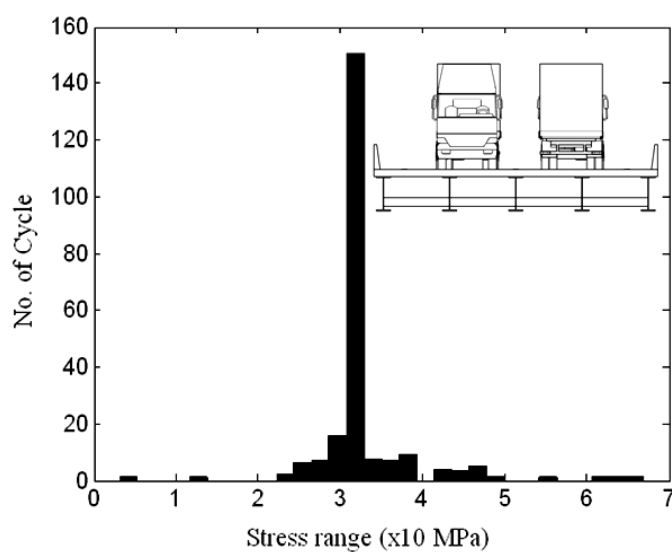
ภาพที่ 5.36 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

ภาพที่ 5.37 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP โดยที่สะพานคอมโพสิต

ที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 97.0 และ 65.0 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 3 และ 2 ตามลำดับ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



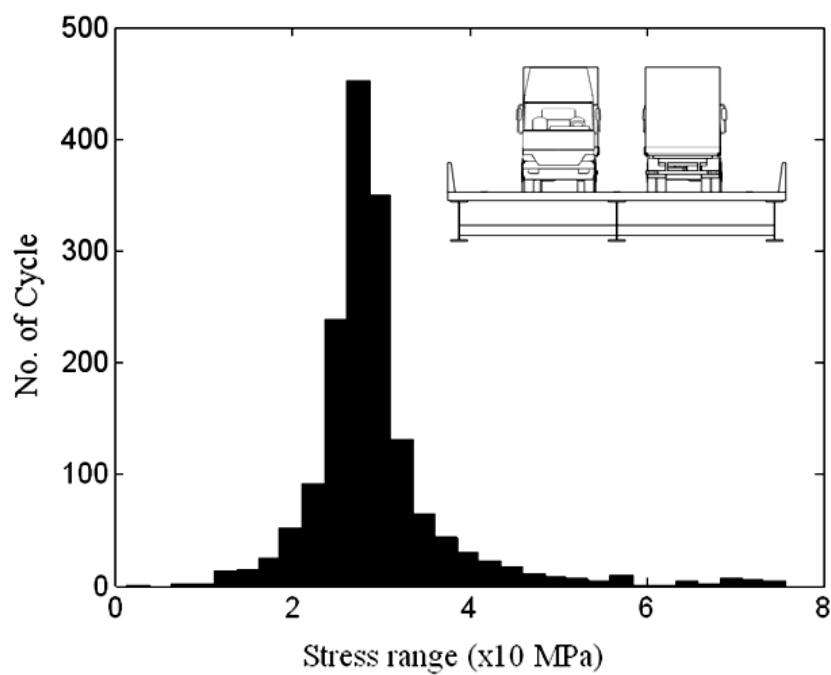
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.37 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

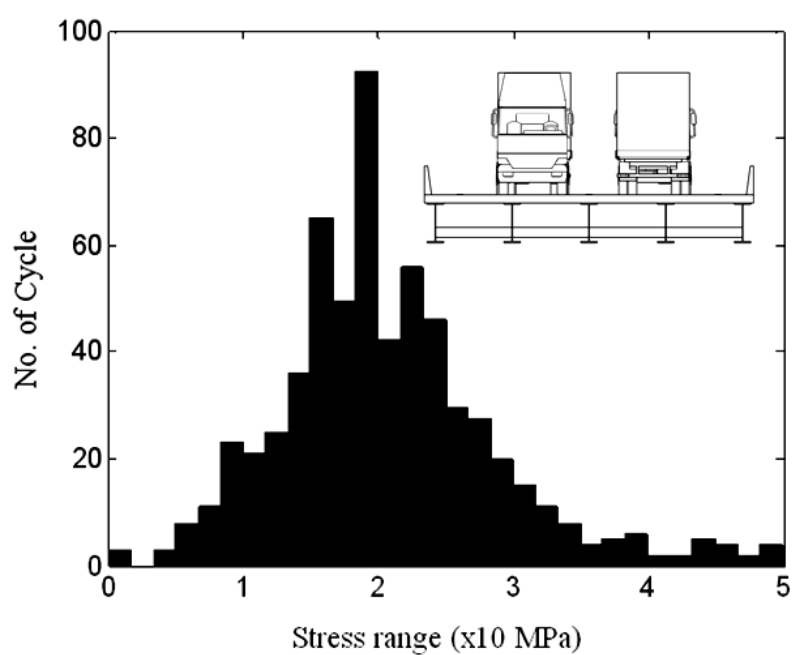
- สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้นขนาดของรอยร้าว 3 มิลลิเมตร และเสริมกำลังด้วย CFRP

จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น ขนาด 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงกับเวลา ซึ่งเมื่อใช้

วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง นั้นจะแสดงในภาพที่ 5.38 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรงได้เท่ากับ 74.5 และ 49.0 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 4 และ 3 ตามลำดับ



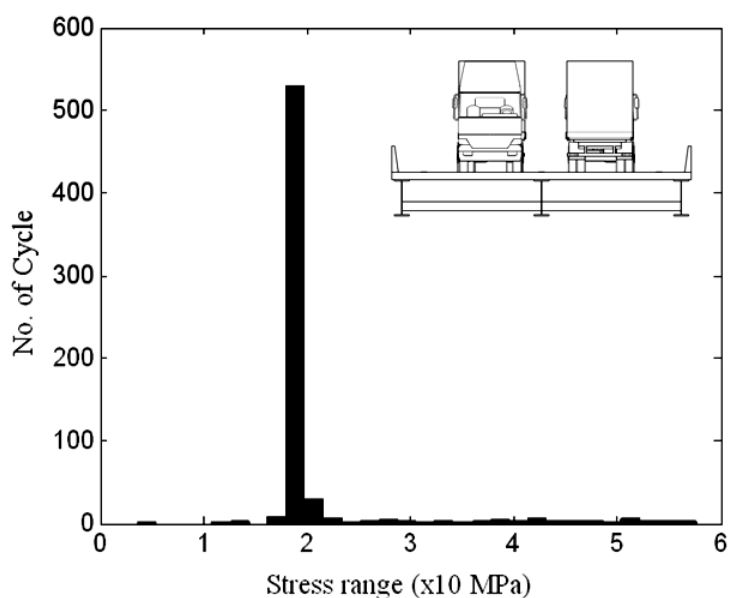
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



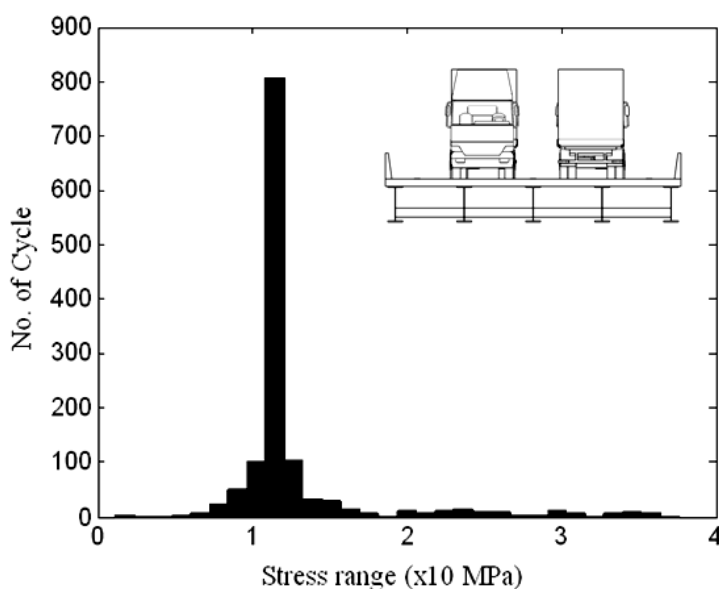
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.38 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

ในภาพที่ 5.39 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 55.7 และ 37.0 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 2 ทั้งสองแบบ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

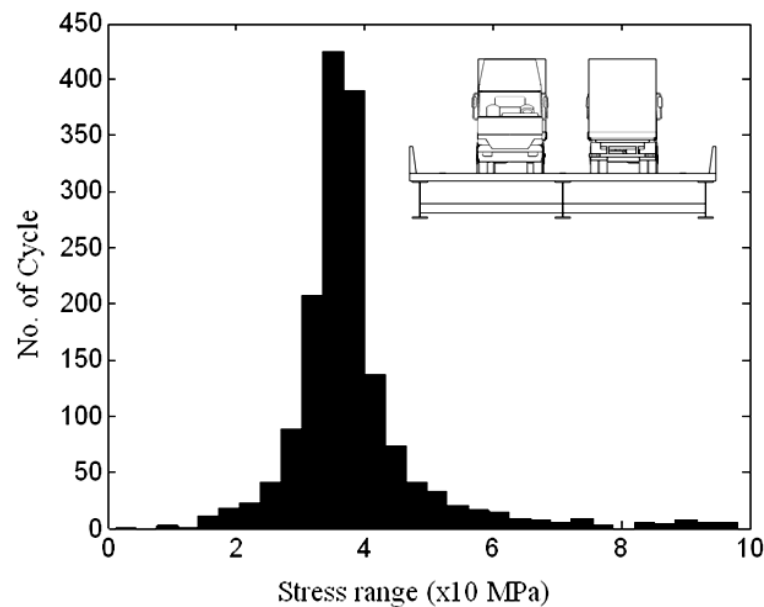


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

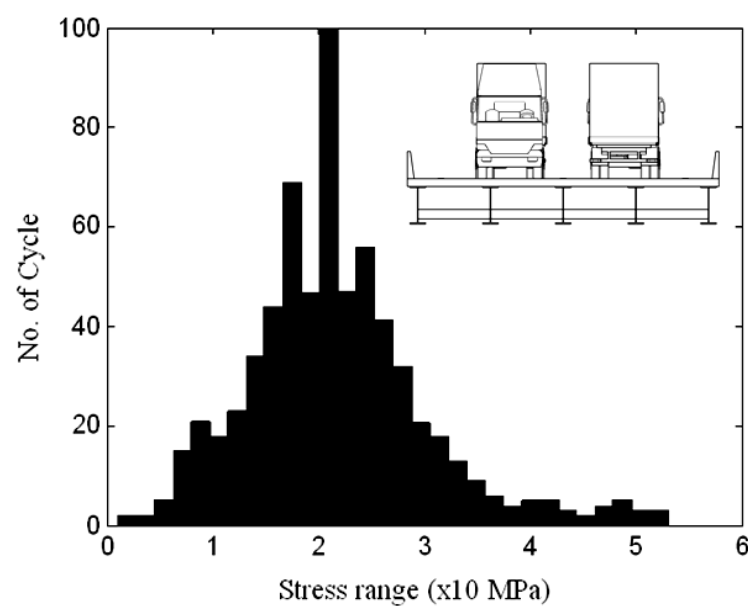
ภาพที่ 5.39 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

- สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้นขนาดของรอยร้าว 6 มิลลิเมตร
และเสริมกำลังด้วย CFRP

จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น ขนาด 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงกับเวลา ซึ่งเมื่อใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง นั้นจะแสดงในภาพที่ 5.40 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรงได้เท่ากับ 96.5 และ 51.5 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 4 และ 3 ตามลำดับ



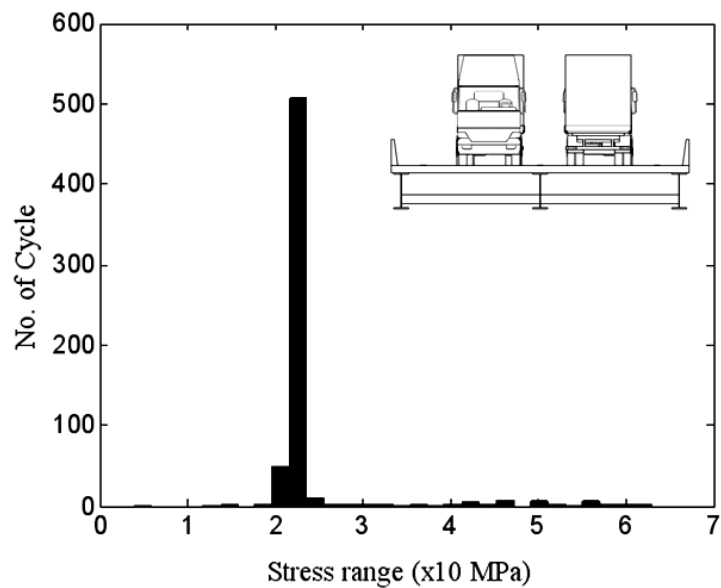
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



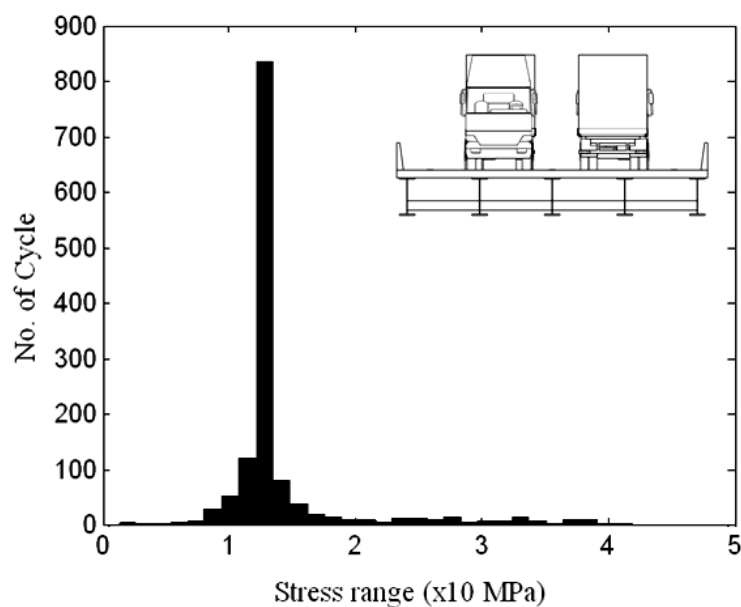
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.40 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

ในภาพที่ 5.41 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck โดยที่สะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว จะอ่านค่าช่วงของหน่วยแรง ได้เท่ากับ 62.0 และ 41.2 MPa ตามลำดับ และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง เท่ากับ 2 ทั้งสองแบบ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.41 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

จากข้อมูลช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง จากทุกกรณีที่ได้จากวิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง

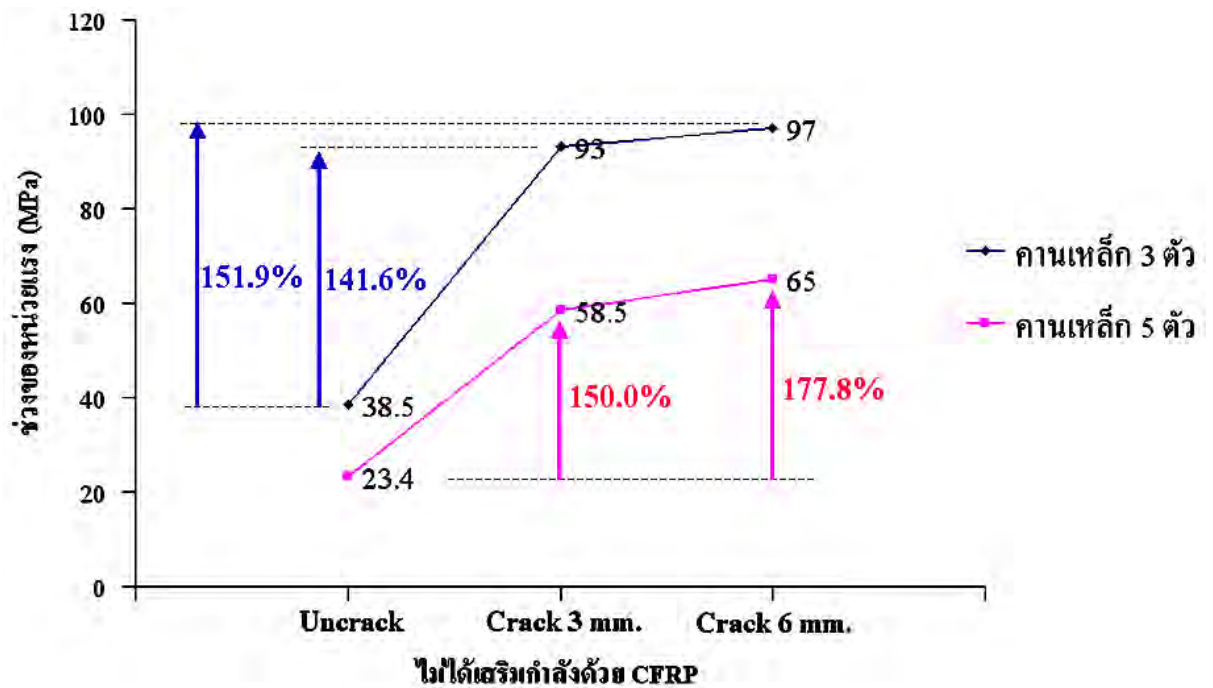
รูปแบบสะพาน	จำนวนช่องจราจร	จำนวนคานเหล็ก	ช่วงของหน่วยแรง (MPa)	จำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (n)
ไม่เสริมกำลัง Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	38.5	0.5
		5	23.4	0.5
ไม่เสริมกำลัง Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	93.0	3
		5	58.5	2
ไม่เสริมกำลัง Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	97.0	3
		5	65.0	2
CFRP laminate Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	33.4	0.5
		5	19.3	0.5
CFRP laminate Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	74.5	4
		5	49.0	3
CFRP laminate Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	96.5	4
		5	51.5	3
CFRPcomposite deck (Uncrack)	2 (สวนทางกัน)	3	17.3	0.5
		5	13.6	0.5
CFRPcomposite deck (Crack 3 mm.)	2 (สวนทางกัน)	3	55.7	2
		5	37.0	2
CFRPcomposite deck (Crack 6 mm.)	2 (สวนทางกัน)	3	62.0	2
		5	41.2	2

ตารางที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงค่าช่วงของหน่วยแรง (Stress range) เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย จะให้ค่าช่วงของหน่วยแรง มีค่าลดลงมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะช่วยลดค่าช่วงของหน่วยแรงได้มาก แต่เมื่อสะพานมีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นกับสะพานก็เป็นสาเหตุที่จะเพิ่มค่าช่วงของหน่วยแรงเพิ่มขึ้นได้มากถึงร้อยละ 60

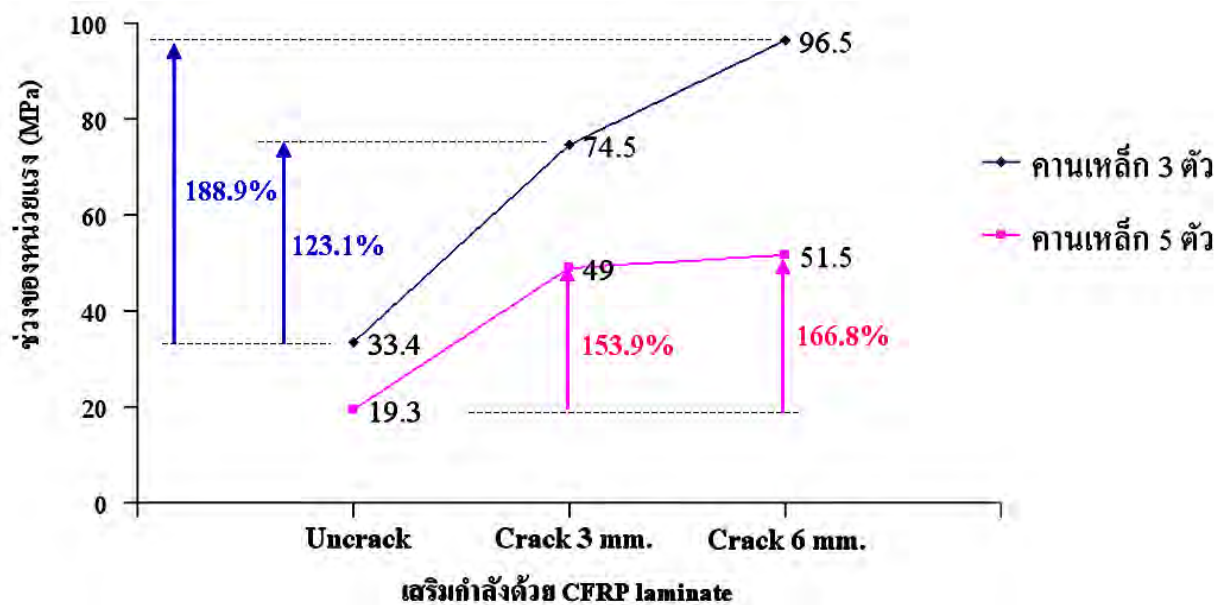
ตารางที่ 5.7 ค่าคลาดเคลื่อนของช่วงของหน่วยแรง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

รูปแบบรอยร้าว	ชนิดของสะพาน		ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate		CFRP composite deck	
			ช่วงของหน่วยแรง (MPa)	ช่วงของหน่วยแรง (MPa)	ลดลง (%)	ช่วงของหน่วยแรง (MPa)	ลดลง (%)
Uncrack	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	38.5	33.4	13.2	17.3	55.1
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	23.4	19.3	17.5	13.6	41.9
Crack 3 mm.	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	93.0	74.5	19.9	55.7	40.1
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	58.5	49.0	16.2	37.0	36.8
Crack 6 mm.	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	97.0	96.5	0.5	62.0	36.1
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	65.0	51.5	20.8	41.2	36.6

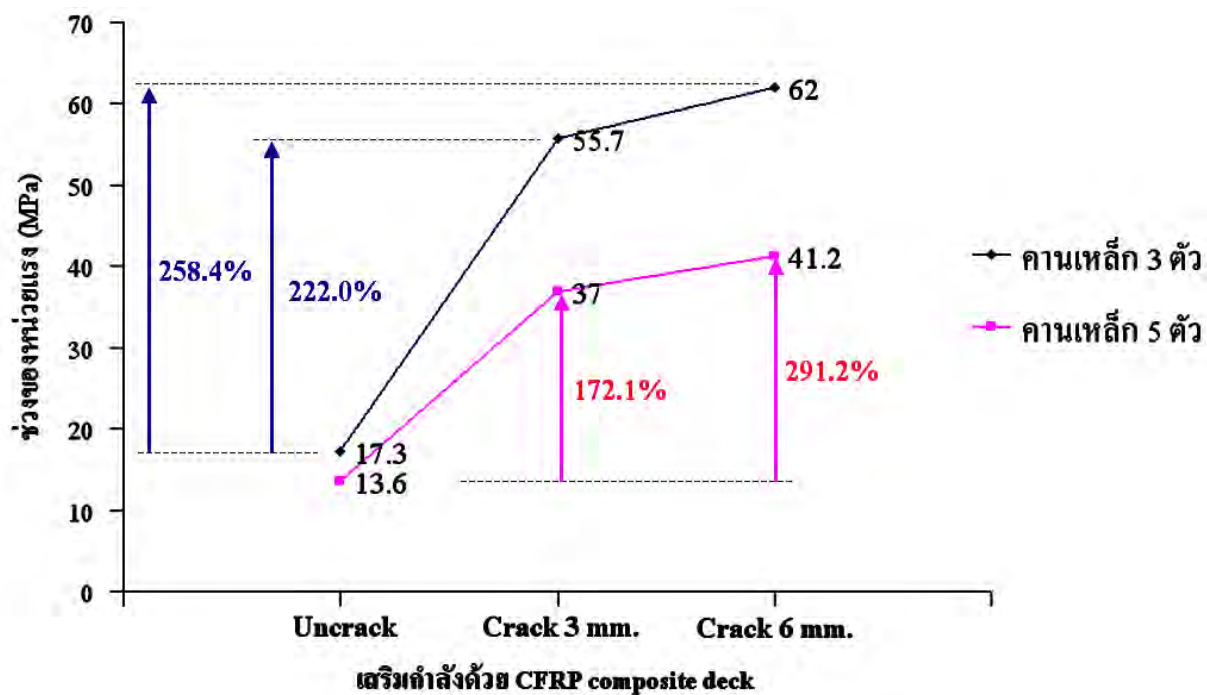
ภาพที่ 5.42 ถึง 5.44 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตมีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร จะให้ช่วงของหน่วยแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า สะพานที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร และสะพานที่ไม่มีรอยร้าวตามลำดับ



ภาพที่ 5.42 กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง



ภาพที่ 5.43 กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.44 กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

5.6.2 ผลของอายุความล้าของสะพานคอมโพสิต (Fatigue life of composite bridge) การหาอายุความล้าของสะพานคอมโพสิต หรืออายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิตนั้น สามารถหาได้จากมาตรฐาน AASHTO โดยพิจารณาจากค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ นั้นจะมีค่าของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ค่าช่วงของหน่วยแรง (stress range หรือ Nominal Fatigue Resistance, $(\Delta F)_n$), และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage, n) ซึ่งในการคำนวณจากมาตรฐาน AASHTO นั้นจะกำหนดค่าทั้งหมดนี้มาให้ในมาตรฐาน โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามประเภทของสะพานคอมโพสิตที่พิจารณา แต่ถ้าเป็นการวิเคราะห์อย่างละเอียดจะได้ค่าช่วงของหน่วยแรง และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์

ในการหาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิตตามมาตรฐาน AASHTO โดยไม่ได้พิจารณาแบบละเอียดโดยใช้แบบจำลองของสะพาน จะสามารถคำนวณหาอายุการใช้งานของสะพานได้เท่ากับ 75 ปี ทั้งสะพานที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว แต่ถ้าพิจารณาแบบจำลองอย่างละเอียดโดยใช้แบบจำลอง ก็จะทำให้ทราบอายุการใช้งานที่แท้จริงของสะพาน

จากมาตรฐานของ AASHTO ตัวสะพานคอมโพสิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นประเภท C และค่าคงที่ A และค่า Constant-amplitude fatigue threshold, $(\Delta F)_{TH}$ จะแสดงในตารางที่ 5.8 ส่วนค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage ; n) จะมีค่าตามประเภทของจตุรกรับของสะพานคอมโพสิต ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 5.9 ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ใช้หาอายุการใช้งานของสะพานตามมาตรฐาน AASHTO

ตารางที่ 5.8 ค่าคงที่ A และ ค่า Constant-amplitude fatigue threshold $(\Delta F)_{TH}$

Detail	Constant ; A ($\times 10^{11}$ MPa ³)	Fatigue threshold ; $(\Delta F)_{TH}$ (MPa)
C	14.4	69.0

ตารางที่ 5.9 ค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage , n)

Longitudinal members	n
Simple span girder	1.0

จากการวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ จะสามารถหาอายุการใช้งานของสะพานได้ตามตารางที่ 5.10 โดยข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงในสมการ คือ ค่าช่วงของหน่วยแรง (Stress range หรือ Nominal Fatigue Resistance, $(\Delta F)_n$) และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage, n) ซึ่งจะพิจารณาจำนวนรอบที่

วิ่งผ่านสะพานในแต่ละวันเท่ากับ 3,000 คันต่อวัน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

ตารางที่ 5.10 อายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เมื่อพิจารณาจากตัวแปรที่ได้จากแบบจำลอง

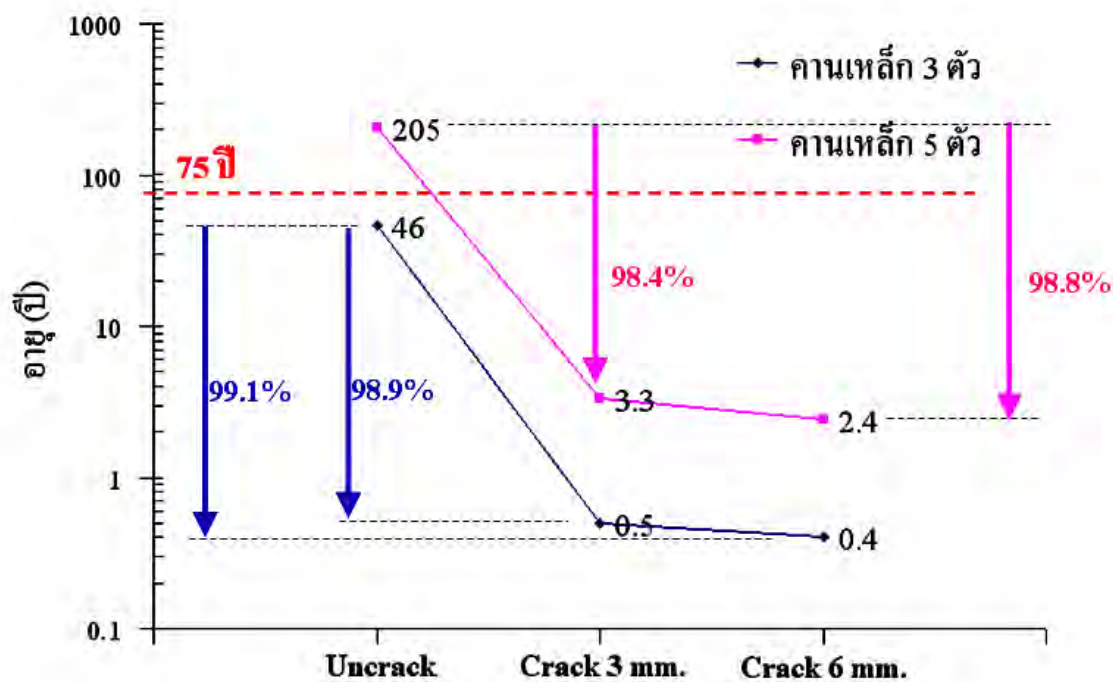
รูปแบบสะพาน	จำนวนช่องจราจร	จำนวนคานเหล็ก	จำนวนรถบรรทุก (คัน/วัน)	อายุ (ปี)
ไม่เสริมกำลัง Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	46
		5	3,000	205
ไม่เสริมกำลัง Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	0.5
		5	3,000	3.3
ไม่เสริมกำลัง Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	0.4
		5	3,000	2.4
CFRP laminate Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	71
		5	3,000	366
CFRP laminate Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	0.8
		5	3,000	3.7
CFRP laminate Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	0.4
		5	3,000	3.2
CFRP composite deck (Uncrack)	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	508
		5	3,000	1,046
CFRP composite deck (Crack 3 mm.)	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	3.8
		5	3,000	13.0
CFRP composite deck (Crack 6 mm.)	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	2.7
		5	3,000	9.4

ตารางที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงอายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย จะให้อายุความล้า มีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะช่วยลดอายุความล้าได้มาก แต่เมื่อสะพานมีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นกับสะพานก็เป็นสาเหตุที่จะลดอายุความล้าลงขึ้นได้มากถึงร้อยละ 660 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอายุความล้าลดลงอย่างมาก เมื่อเกิดรอยร้าว หรือความเสียหายเริ่มต้น ดังนั้นเมื่อความเสียหายเริ่มต้นจึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่ออายุความล้ามาก

ตารางที่ 5.11 ค่าคลาดเคลื่อนของอายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

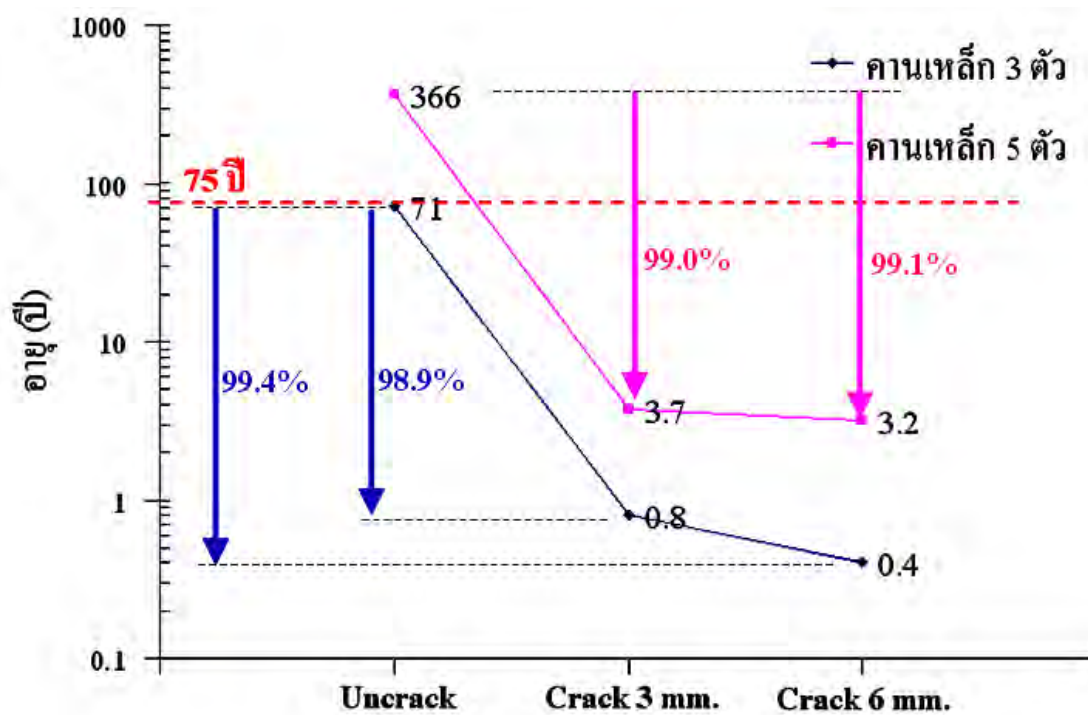
รูปแบบรอยร้าว	ชนิดของสะพาน		ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate		CFRP composite deck	
			Fatigue Life (Yrs)	Fatigue Life (Yrs)	เพิ่มขึ้น (%)	Fatigue Life (Yrs)	เพิ่มขึ้น (%)
Uncrack	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	46	71	54.3	508	1,004.3
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	205	366	78.5	1,046	410.2
Crack 3 mm.	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	0.5	0.8	60.0	3.8	660.0
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	3.3	3.7	12.1	13	293.9
Crack 6 mm.	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	0.4	0.4	0.0	2.7	575.0
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	2.4	3.2	33.3	9.4	291.7

ภาพที่ 5.45 ถึง 5.47 เป็นกราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้น ขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าวจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า กรณีที่สะพานคอมโพสิตมีรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร แต่จากกราฟจะเห็นได้ชัดว่าสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร นั้นจะมีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าวเกิดขึ้นโดยที่ขนาดของรอยร้าวไม่ต่างกันมาก จะไม่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของสะพานมาก แต่ถ้าเมื่อสะพานเริ่มมีรอยร้าว หรือความเสียหายเกิดขึ้น อายุการใช้งานของสะพานก็จะลดลงจากเดิมอย่างมาก



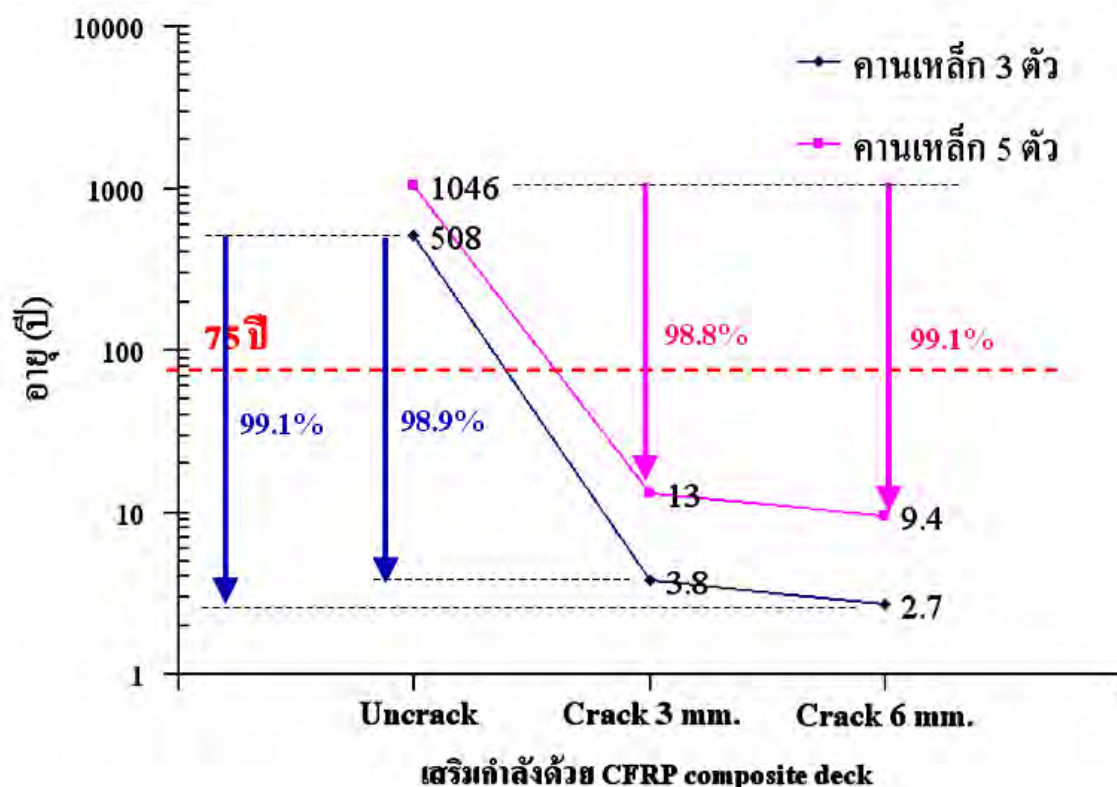
ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

ภาพที่ 5.45 กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง



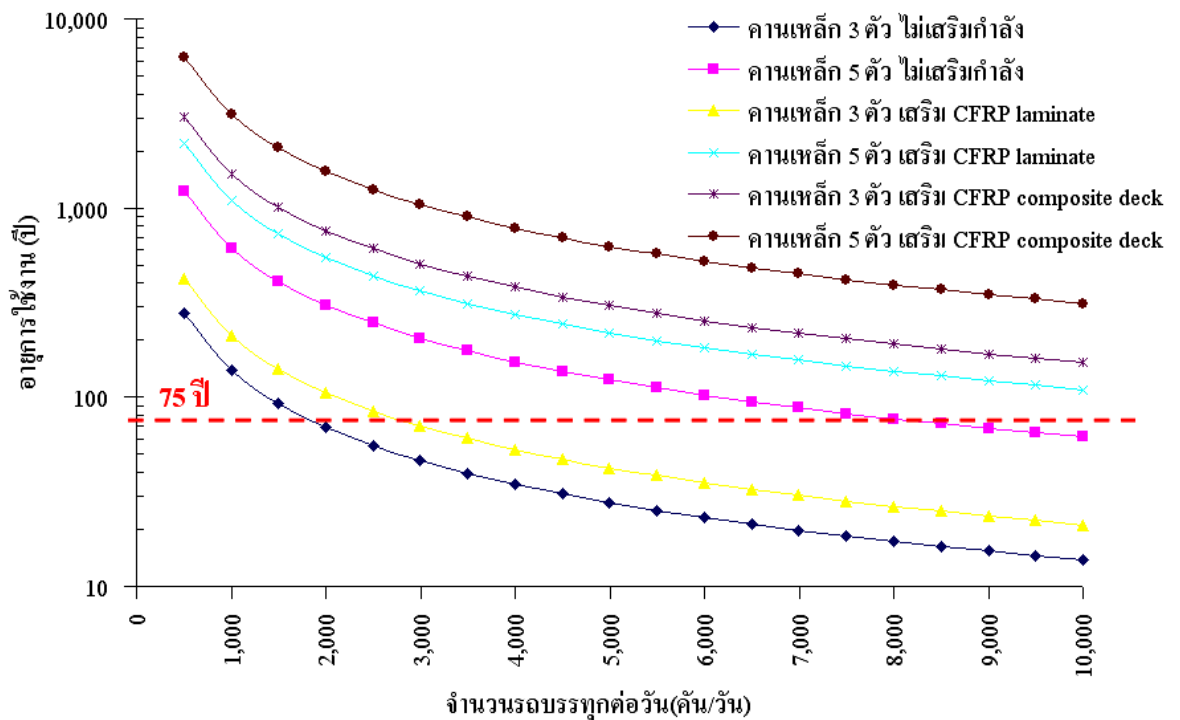
เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

ภาพที่ 5.46 กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate

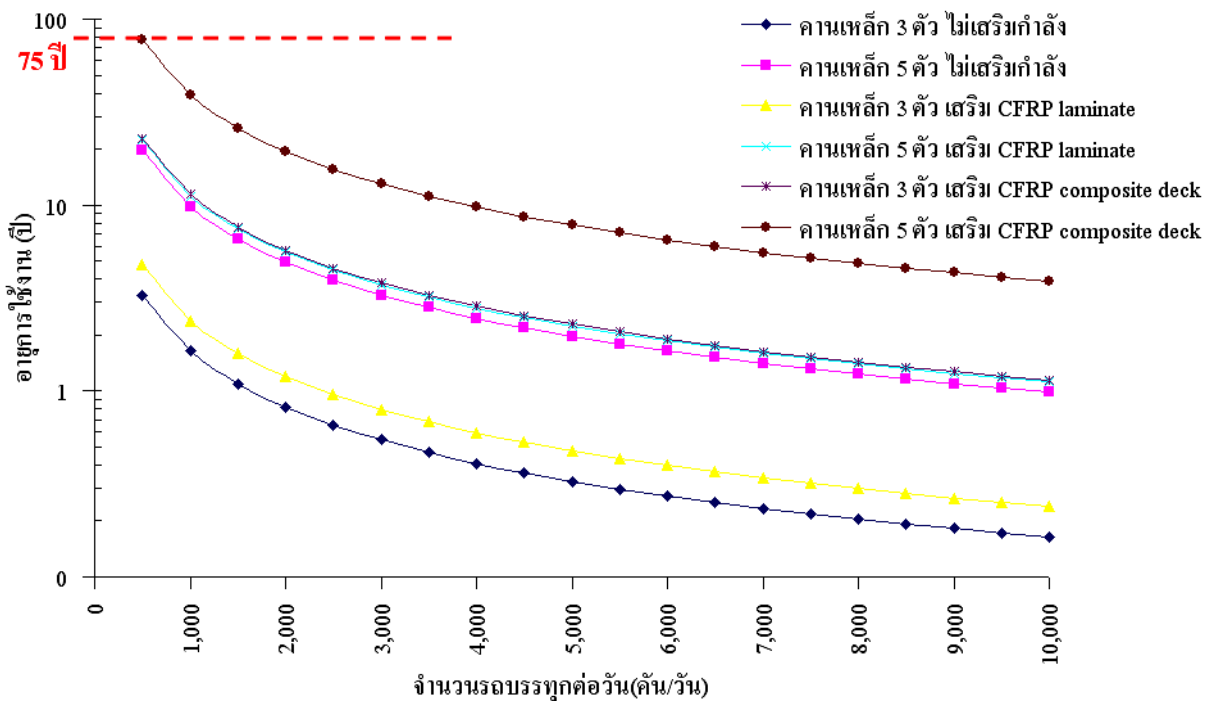


ภาพที่ 5.47 กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

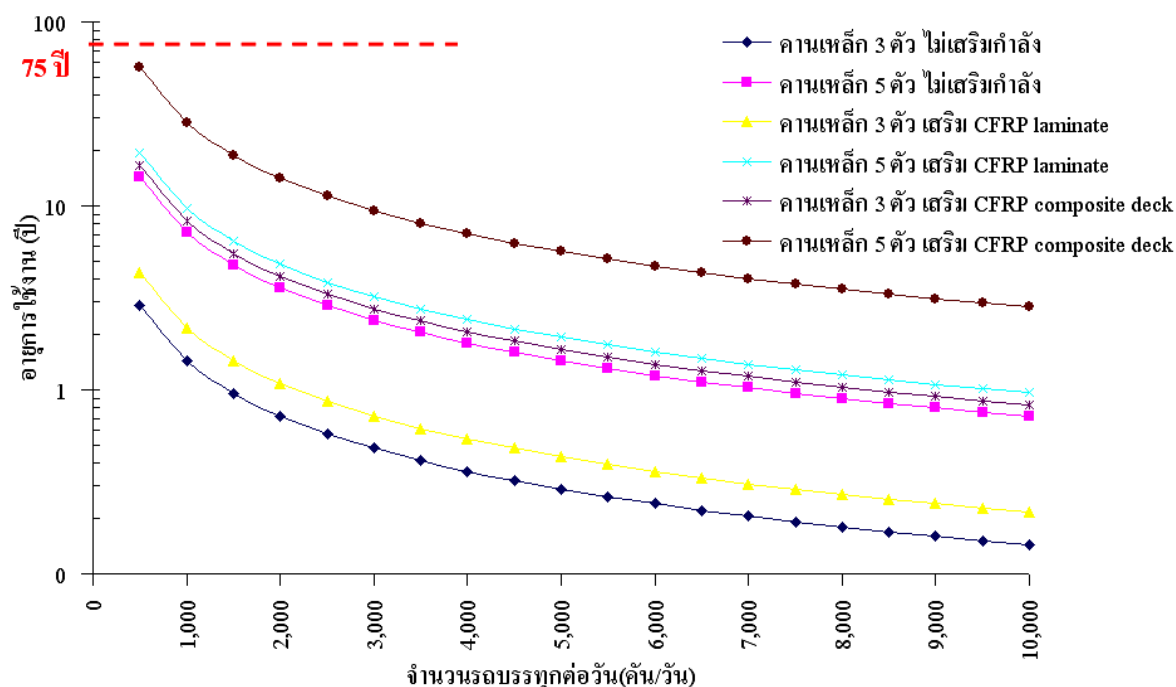
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ มาพิจารณาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต โดยที่กำหนดให้จำนวนของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานมีค่าเปลี่ยนแปลง เริ่มต้นจาก 500 ถึง 10,000 คันต่อวัน แล้วพิจารณาหาอายุของสะพานเหล็กโดยใช้สมการ จากมาตรฐาน AASHTO จะได้กราฟการเปรียบเทียบ ดังแสดงในภาพที่ 5.48 ถึง 5.50 ซึ่งแต่ละกรณีจะพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าว และสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าวเริ่มต้นขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5.48 กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีไม่มีรอยร้าวเริ่มต้น



ภาพที่ 5.49 กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีมีรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5.50 กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีมีรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร

5.6.3 ผลของจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน (Number of cycle) ในการหาค่าจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานคอมโพสิตนั้นสามารถหาได้จาก สมการที่ 2.26 โดยจะแทนอายุการใช้งานที่หาได้จากตารางที่ 5.10 ในสมการแทนค่า 75 ปี ที่ระบุในสมการ และแทนค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage ; n) ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ และจำนวนรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานในแต่ละวัน 3,000 คันต่อวัน ในสมการเช่นกัน ซึ่งผลที่ได้จะแสดงค่าจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน โดยที่จำนวนรอบนี้จะเป็นการบอกให้ทราบว่าสะพานคอมโพสิตสามารถที่จะรับน้ำหนักของรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ได้กี่รอบ ถึงจะเกิดการเสียหายเนื่องจากความล้า โดยผลของจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน แสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 จำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน (Number of cycle)

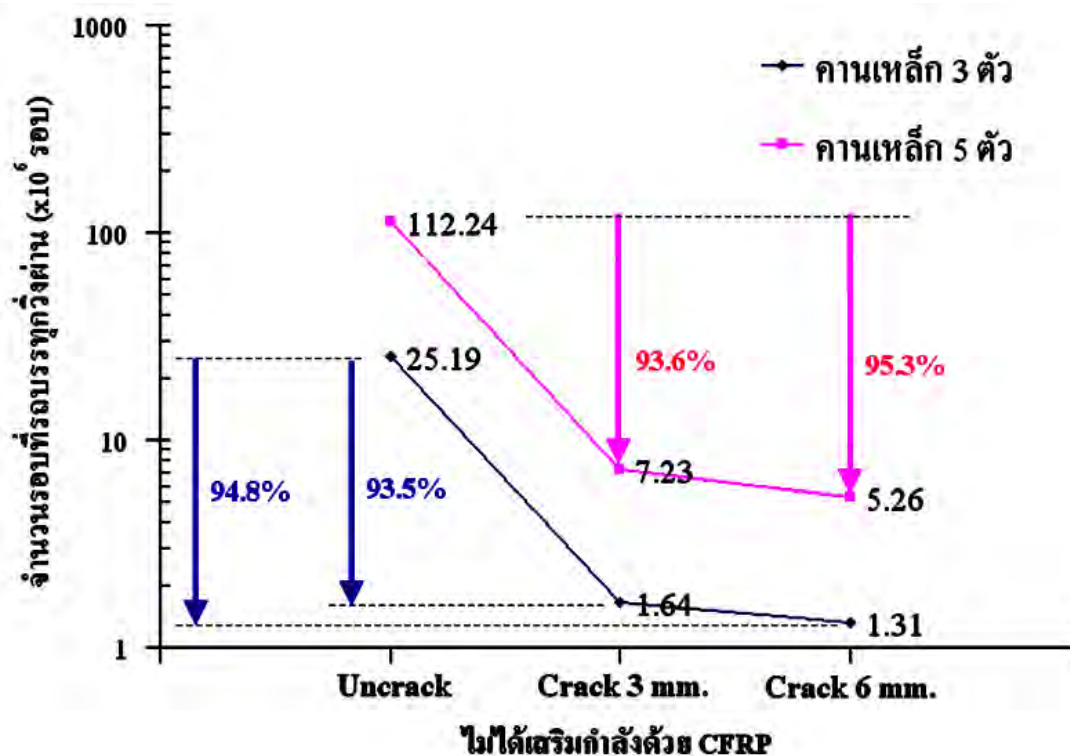
รูปแบบสะพาน	จำนวนช่องจราจร	จำนวนคาบเหล็ก	อายุ (ปี)	จำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (n)	N ($\times 10^6$ รอบ)
ไม่เสริมกำลัง Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	46	0.5	25.19
		5	205	0.5	112.24
ไม่เสริมกำลัง Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	0.5	3	1.64
		5	3.3	2	7.23
ไม่เสริมกำลัง Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	0.4	3	1.31
		5	2.4	2	5.26
CFRP laminate Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	71	0.5	38.87
		5	366	0.5	200.39
CFRP laminate Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	0.8	4	3.50
		5	3.7	3	12.15
CFRP laminate Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	0.4	4	1.75
		5	3.2	3	10.51
CFRP composite deck Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	508	0.5	278.13
		5	1,046	0.5	572.69
CFRP composite deck Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3.8	2	8.32
		5	13.0	2	28.47
CFRP composite deck Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	2.7	2	5.91
		5	9.4	2	20.59

และในตารางที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงค่าคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย จะให้ค่าจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานคอมโพสิต มีค่าเพิ่มมากขึ้น

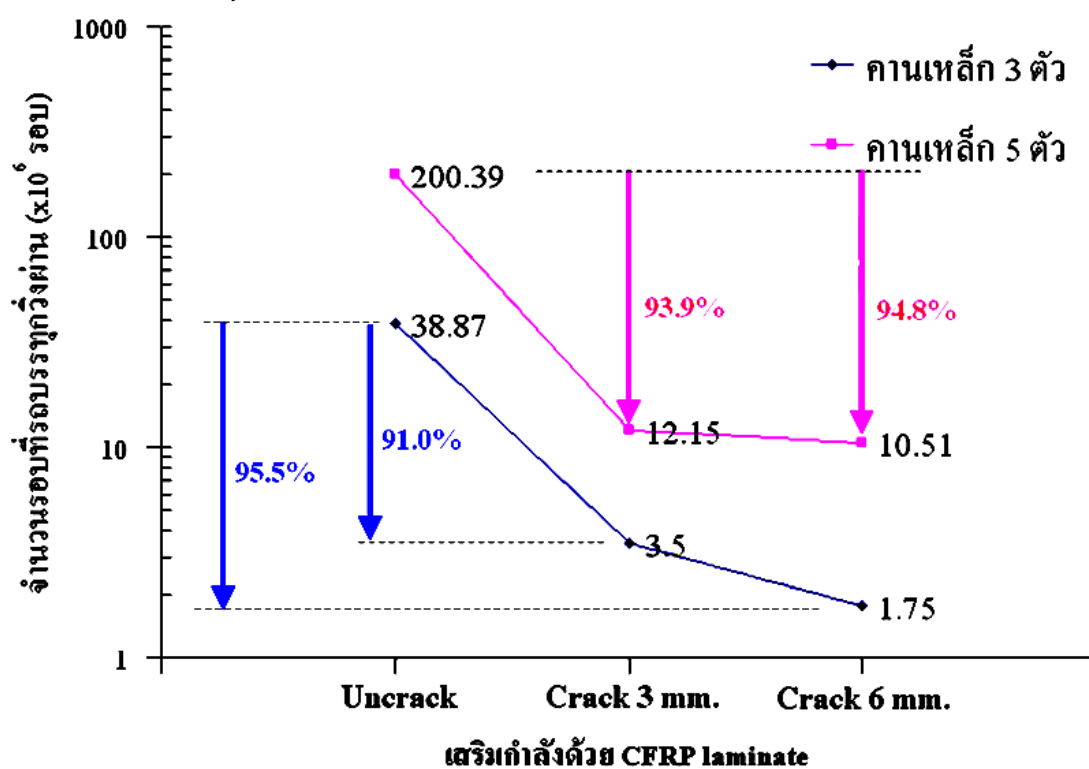
ตารางที่ 5.13 ค่าคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน เปรียบเทียบ
ระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

รูปแบบ รอยร้าว	ชนิดของสะพาน		ไม่เสริม กำลัง	CFRP laminate		CFRP composite deck	
			N ($\times 10^6$ รอบ)	N ($\times 10^6$ รอบ)	เพิ่มขึ้น (%)	N ($\times 10^6$ รอบ)	เพิ่มขึ้น (%)
Uncrack	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	25.19	38.87	54.3	278.13	1,004.1
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	112.24	200.39	78.5	572.69	410.2
Crack 3 mm.	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	1.64	3.5	113.4	8.32	407.3
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	7.23	12.15	68.0	28.47	293.8
Crack 6 mm.	3 Girders	2 lanes (สวนทาง)	1.31	1.75	33.6	5.91	351.1
	5 Girders	2 lanes (สวนทาง)	5.26	10.51	99.8	20.59	291.4

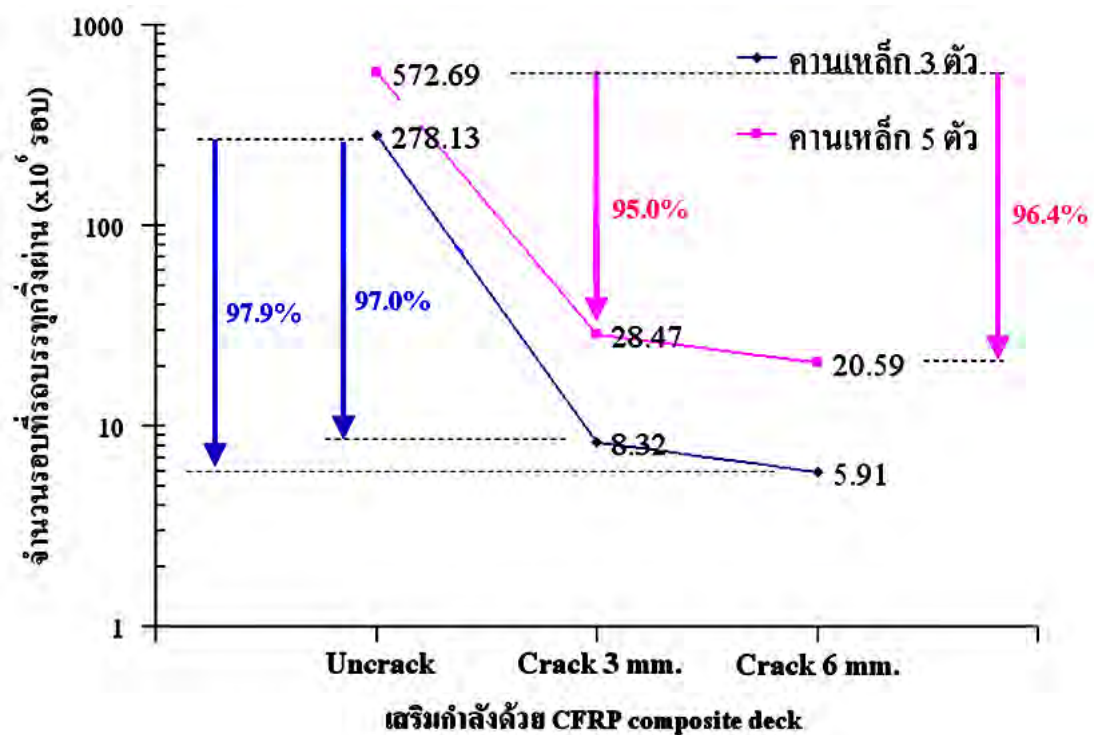
ภาพที่ 5.51 ถึง 5.53 เป็นกราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน
กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และ
เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าวจะมีจำนวน
รอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน ที่มากกว่า กรณีที่สะพานคอมโพสิตมีรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5.51 กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รณบรรลุถึงผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง



ภาพที่ 5.52 กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รณบรรลุถึงผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.53 กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รบกวนรุกราน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

บทที่ 6

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ 1) การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP และ 2) การศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งทั้ง 2 ส่วนได้ใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ ABAQUS 6.5-1 ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาโดยแยกแต่ละกรณีได้ดังนี้

6.1.1 การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

การศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์จากบทความที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากบทความที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของการกระจายของหน่วยแรงในชั้นกาว และการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยในเบื้องต้นได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องระหว่างแบบจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองแบบ 2 มิติ หลังจากนั้นได้ใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติ ในการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ซึ่งค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ช่วงของหน่วยแรงกระทำ (Stress range) ความหนาแน่น และความหนาของแผ่น CFRP ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

- **การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง 2 มิติ กับ 3 มิติ**

การสอบเทียบแบบจำลองแบบ 2 มิติ กับ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขของจตุรกรับเดียวกัน ภายใต้แรงดึงแบบสถิตในระยะเวลา 0.1 วินาที แล้วทำการอ่านค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดในชิ้นส่วนของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง 2 มิติ สามารถจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วน

เหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ใกล้เคียงพฤติกรรมจริง ทำให้ช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณได้เป็นอย่างมาก

▪ **พฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ พบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดัดงอของชิ้นส่วนจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่า การหลุดล่อนของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนี้นั่นเอง นอกจากนี้ลักษณะการลดลงของหน่วยแรงที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเร็วกว่า Analytical model เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ใน Analytical model ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) แต่ในแบบจำลองได้จำลองพฤติกรรมของ interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้น element จะมีค่าความเสียหายสะสมใน element ทำให้ค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดัดงอ ลดลงอย่างรวดเร็ว

ในส่วนของการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ นั้นปริญญานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์วิธีการประมาณอายุการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตมาใช้ในการประมาณอายุการใช้งานของชิ้นส่วนคอมโพสิต โดยสมการที่ใช้ในการประมาณอายุการใช้งานคือ

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{0.004(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{0.39}} \quad (6.1)$$

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

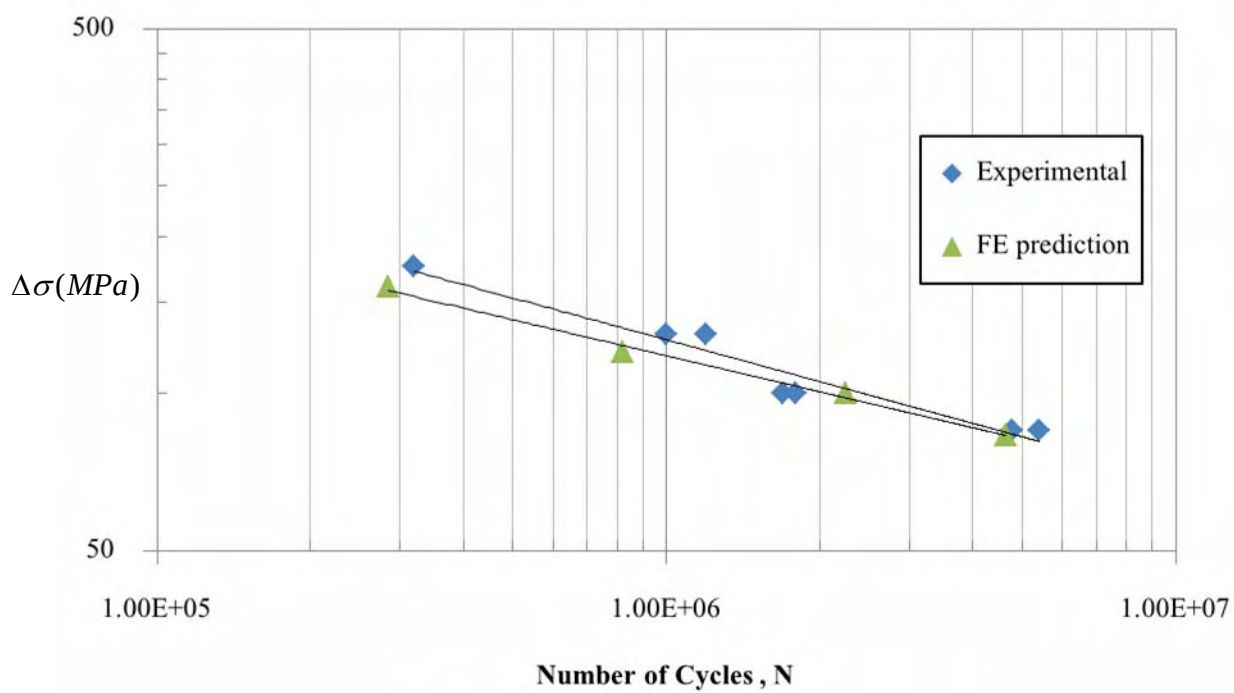
$S_{\max}$ = ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)

$$R = \text{stress ratio} = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} (\%)$$

ซึ่งจากการใช้สมการที่ 6.1 ในการประเมินพฤติกรรมความล้าของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นพบว่าสามารถประมาณค่าอายุการใช้งานได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.1 และภาพที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย 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	822355	17.76
160	320,000	285,277	10.87



ภาพที่ 6.1 เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experiment กับ FE prediction

▪ **การศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล่าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

จากการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาว และอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ซึ่งในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ความหนาของชั้นกาว และความหนาของแผ่น CFRP

- **ผลของความหนาของชั้นกาวต่อพฤติกรรมความล่าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความหนาของกาว (ความหนาของแผ่น CFRP คงที่) ก็จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของชั้นกาว ในส่วนของอายุการใช้งานพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะช่วยลดค่า หน่วยแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นในชั้นกาว อันจะส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

- **ผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล่าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้ค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า หน่วยแรงเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง อย่างไรก็ตามการเพิ่มเฉพาะความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชั้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปให้แผ่น CFRP นั้นเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ จุดนี้เองทำให้ชั้นกาวกลายเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ในส่วนของอายุการใช้งานพบว่า การเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ลดลง อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยแรงเฉือน

6.1.2 การศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP

งานวิจัยส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP ต่อพฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตทั้งโครงสร้าง ทั้งชนิดที่มีความเสียหายเริ่มต้นและชนิดที่ไม่มีความเสียหายเริ่มต้น ต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์โปรแกรม ABAQUS ในการศึกษา โดยรูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัวไอ (I-Shape) ที่ทำหน้าที่รับแรงดิ่ง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต ทั้งนี้การตอบสนองทางพลศาสตร์จะพิจารณาที่ค่าหน่วยแรงและค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ส่วนการตอบสนองของความล้าจะพิจารณาที่จำนวนรอบสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ นอกจากนี้ก็จะศึกษาถึงผลของความเสียหายเริ่มต้นในรูปแบบของรอยร้าวเริ่มต้น 2 ขนาดคือ ความลึก 3 และ 6 มิลลิเมตร ที่ปีกล่างของคานรูปตัวไอ ที่มีผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานคอมโพสิตทั้งชนิดที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และที่เสริมกำลังด้วย CFRP หนึ่งตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของสะพานได้แก่ ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัวไอ ก็ได้พิจารณาในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

❖ พฤติกรรมของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง

ผลการศึกษาการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว สามารถสรุปได้ ดังนี้

- กรณีรถวิ่ง 2 ช่องจราจร ทั้งวิ่งในทิศทางเดียวกัน และวิ่งสวนทางกัน จะให้ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ สูงสุด มากกว่า กรณีรถวิ่ง 1 ช่องจราจร ซึ่งค่าหน่วยแรง และค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12 และร้อยละ 4 ของสะพานคอมโพสิตที่มีคานเหล็ก 3 และ 5 ตัว ตามลำดับ เพราะน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ ของสะพานคอมโพสิต
- การเพิ่มขึ้นของจำนวนคานเหล็ก จากสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว เป็นสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว จะส่งผลโดยตรงต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ โดยที่ค่าหน่วยแรง และค่าการแอ่นตัวของสะพานจะลดลง เนื่องจากสะพานจะมีค่าสติฟเนสเพิ่มขึ้นทำให้สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดีขึ้น

❖ พฤติกรรมของของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย

ในกรณีผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยรูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังโดยใช้ CFRP ชนิดแผ่น (CFRP Laminate) ติดที่บริเวณปีกของคานรูปตัว I ที่ทำ

หน้ารับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต โดยผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ทำการศึกษ สามารถสรุปได้ ดังนี้

- ในการเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิตโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย จะช่วยลดค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ทั้งค่าการแอ่นตัว และค่าหน่วยแรง ได้มากกว่าสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังถึงประมาณร้อยละ 35
- เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่างการเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิตโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยทั้ง 2 วิธี คือ เสริมกำลังด้วย CFRP laminate กับ เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งการเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck จะมีประสิทธิภาพในการช่วยลดการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ได้ดีกว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP laminate แต่การเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ก็มีข้อเสียอยู่มาก เนื่องจากในการติดตั้ง CFRP composite deck นั้นจะต้องนำแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมออกเสียก่อน งานทำงานจึงยุ่งยาก ทั้งจะต้องปิดช่องทางจราจร และถ้าผู้ติดตั้งไม่มีความสามารถพอก็อาจจะเกิดอันตรายได้ แต่สำหรับการเสริมกำลังโดยใช้ CFRP laminate ในการติดตั้งจะใช้เวลาติดตั้งน้อยกว่า ไม่กีดขวางการจราจร แต่ก็จำเป็นต้องใช้ผู้ติดตั้งที่มีความชำนาญมากเช่นกัน

❖ พฤติกรรมของของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น

ในกรณีผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น เกิดขึ้น จะส่งผลต่อการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานเป็นอย่างมาก โดยผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ทำการศึกษ สามารถสรุปได้ ดังนี้

- หลังจากที่เกิดความเสียหายของสะพานคอมโพสิตมีรอยร้าวเกิดขึ้น อายุการใช้งานของสะพานหรืออายุความล้า จะลดลงถึง 15 เท่า จากสะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้น เนื่องจากสะพานที่มีความเสียหายเกิดขึ้นจะส่งผลต่อค่าหน่วยแรงที่เกิดในคานเหล็กเพิ่มมากขึ้น และอายุการใช้งานก็ลดลงด้วยเช่นกัน เพราะค่าหน่วยแรงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่ออายุการใช้งานของสะพาน

❖ ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย

สะพานคอมโพสิตในประเทศไทยปัจจุบันมีอยู่หลายแห่ง ทั้งที่ใช้เพื่อข้ามแม่น้ำ หรือข้ามทางแยกไฟแดง ดังนั้นในการที่จะเสริมกำลังของสะพานคอมโพสิต ให้เกิดประสิทธิภาพ และประโยชน์อย่างเต็มที่ ควรที่จะต้องพิจารณาถึงรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

- ส่วนใหญ่แล้วการปรับปรุงสภาพของสะพานโดยการเสริมกำลังให้แก่สะพานจะเป็นตัวเลือกที่นิยมกันเนื่องจากว่ามีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการก่อสร้างใหม่คือ ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า สามารถดำเนินการภายในระยะเวลาอัน

สั้น และที่สำคัญคือไม่กระทบหรือกระทบการจราจรบนสะพานเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงกับกรณีอื่น ๆ เช่น การเสริมแผ่นเหล็กที่ปีกคานรับแรงดึง การเสริมกำลังด้วย CFRP นั้นจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า

- วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)) ที่ใช้ในการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้าง ข้อดีของวัสดุชนิดนี้คือ มีน้ำหนักเบา สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี
- ข้อเสียของ CFRP ก็คือราคาวัสดุที่ค่อนข้างสูงและต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง ดังนั้นสืบเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงในการติดตั้ง ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงผลของการเสริมกำลังด้วย CFRP เป็นอย่างดี
- ในกรณีที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้นที่คานเหล็ก ก่อนที่จะทำการปรับปรุงกำลังของสะพาน จะต้องทำการเชื่อมตอรอยร้าวให้เรียบร้อยก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย CFRP laminate ให้ใช้งานได้อย่างเต็มกำลัง
- ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของสะพาน เช่น ลักษณะการวิ่งของรถ จำนวนคานเหล็กรูปตัว I และรูปแบบการเสริมกำลัง ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของสะพานให้ดี เพื่อให้การปรับปรุงความแข็งแรงของสะพานมีประสิทธิภาพมากที่สุด
- วิธีการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สำหรับศึกษาพฤติกรรมของชิ้นส่วนบางชิ้นของโครงสร้างหรือโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก) หรือที่หน่วยงาน (สำหรับศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพาน) และการจำลองด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม ซึ่งการศึกษาพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพานที่หน่วยงานจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม รวมทั้งไม่สามารถแปรผันตัวแปรที่จะมีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานได้ง่ายเหมือนกับการจำลองด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์โปรแกรม

เอกสารอ้างอิง

- กองวิชาวิศวกรรมสรพวฐ. (2551). ความล้า (Fatigue). กองวิชาวิศวกรรมสรพวฐ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า: นครนายก
- ชาคริตพ์ ไม้พันธุ์, สุชาติ ลิมกตัญญู และกิตติศักดิ์ ชันติวิชัย. (2551). การประเมินการตอบสนองทางพลศาสตร์และความล้าของสะพานเหล็กชนิด STEEL GIRDER. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13: ชลบุรี
- เดช พุทธเจริญทอง. (2542). การวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์. บริษัทพิมพ์ดี จำกัด. กรุงเทพฯ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2542). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2545). การทดสอบวัสดุ. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา
- AASHTO (2003). AASHTO LRFD bridge design specifications (Second Edition). The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D. C. USA.
- Aixi Zhou. (2002). STIFFNESS AND STRENGTH OF FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE BRIDGE DECK SYSTEMS. Thesis. Blacksburg. Virginia. USA.
- Alampalli S. and Lund R. (2006). Estimating fatigue life of bridge components using measured strains. Journal of Bridge Engineering @ASCE. 11. 725-736.
- Aridulu S. (2004). Fatigue life calculation by rainflow cycle counting method. Thesis. Middle East Technical University.
- Barker R. M. and Puckett J. E. (1997). Design of Highway bridges based on AASHTO LRFD Bridge. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- 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.
- Biggs J. M. (1964). Introduction to structural dynamics. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Brent M. P. and Terry J. W. (2003). Strengthening of Steel Girder Bridges Using FRP. Center for Transportation Research and Education. South Loop Dr.. Suite.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- 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.
- 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. CIRIA. London.
- Caprino G. (2000), Predicting Fatigue Life of Composite Laminates Subjected to Tension-Tension Fatigue, J. Composite Materials, Vol. 34, pp1335-1355.
- 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.
- Dawson M. (2005). EVALUATION OF STEEL BRIDGE GIRDERS DAMAGED BY OVER-HEIGHT VEHICLE COLLISION. Bucknell University. Lewisburg. Pennsylvania.
- Dorton R. A. and Reel R. (1997). Methods for increasing live load capacity of existing highway bridges. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Hilbert, Karlsson and Sorenson. (2002). Abaqus User's Manual Version 6.5. Rhode Island: The Hilbert. Karlsson & Sorenson Inc.
- Hughes Brothers (2003). Aslan 400 CFRP laminates. Hughes Brothers, Inc. Nebraska.
- Klaiber F. W., Dunker K. F., Wipf T. J. and Sanders W.W. (1987). Methods of strengthening existing highway bridges. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Klein L.E. (2006). Finite Element Analysis of a Composite Bridge Deck. Bachelor of Civil Engineering University of Southern Queensland.
- Kuntyawichai K. and Limkatanyu S. (2006). State of the art in quality assurance issue of structures with particular emphasis on strength degradation. Songklanakarin J. Sci. Technol. 28(6). 1289-1304.
- Mayo R., Nanni A., Watkins S. and Barker M. (2000). Strengthening of Bridge G-270 with Externally Bonded CFRP Sheets. Missouri: Department of Transportation.

- MTEC (2008). Polymers Technology. National Metal and Materials Technology Center. Thailand.
- Sika (2003). Sika CarboDur CFRP laminates. Sika(Thailand) Limited. Thailand.
- Strongwell (1998). EXTREN Design Manual. Strongwell Corp. Bristol. Virginia. USA.
- Tavakkolizadeh M. and Saadatmanesh H. (2003). Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch. Journal of Structural Engineering @ASCE. 186-196.
- Tsiatas G., McEwen E., Shukla A. and Palmquist S. (2002). Fatigue strength of deteriorated and previously stressed steel highway bridges. Thesis. University of Rhode Island.
- Wu J. J.,Whittake A. R. and Cartmall M. P. (2000). The use of finite element technique for calculating the dynamics response of structure to moving load. Computer & Structure.

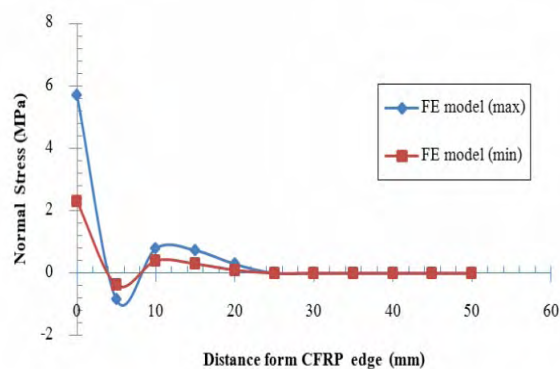
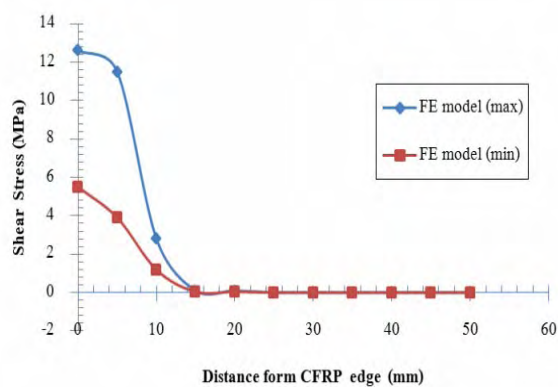
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

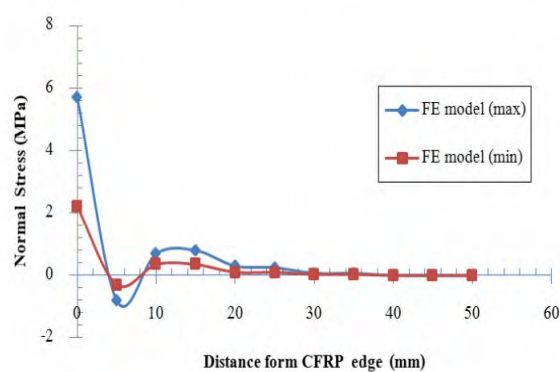
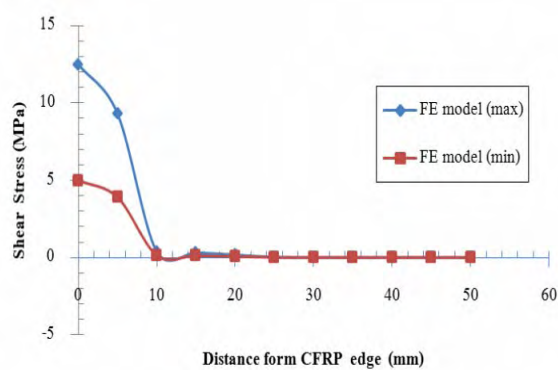
ผลการศึกษาเพิ่มเติมของ

การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

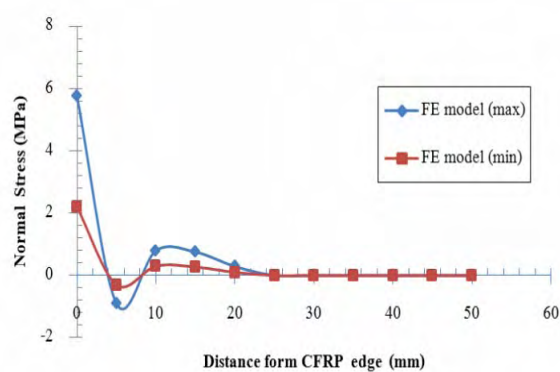
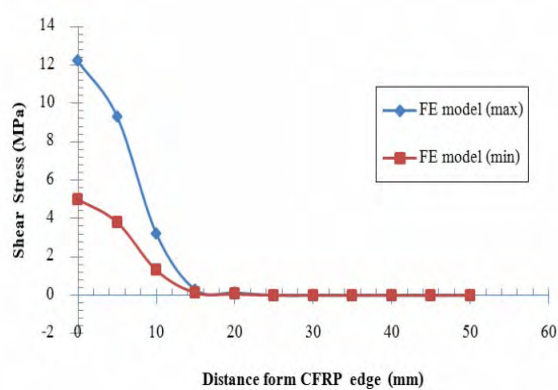
(เปรียบเทียบค่า **Shear Stress** และ **Normal Stress** กรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาบ)



โมเดล CT1.4/GT1.0

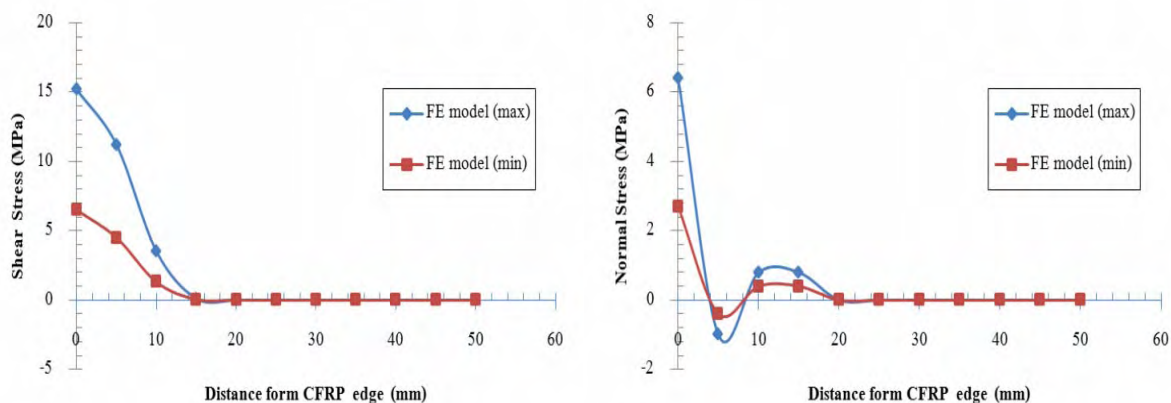


โมเดล CT1.4/GT1.1

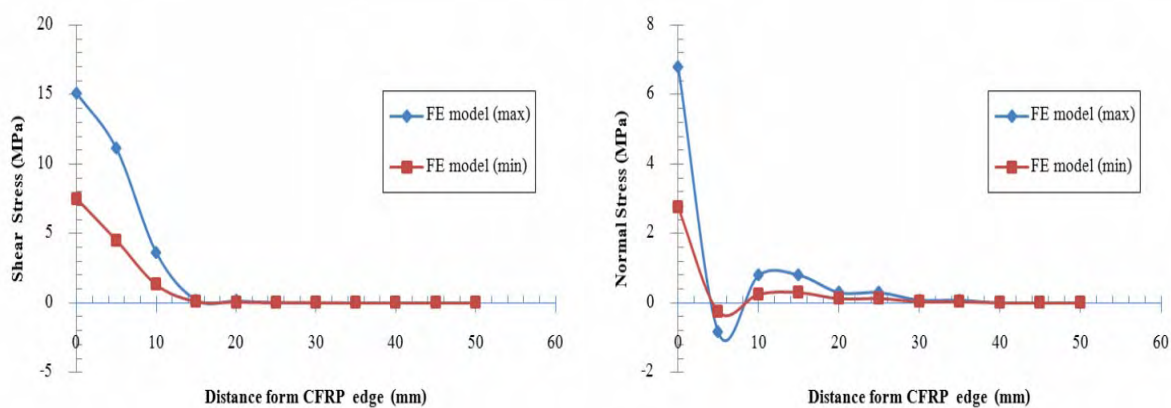


โมเดล CT1.4/GT1.2

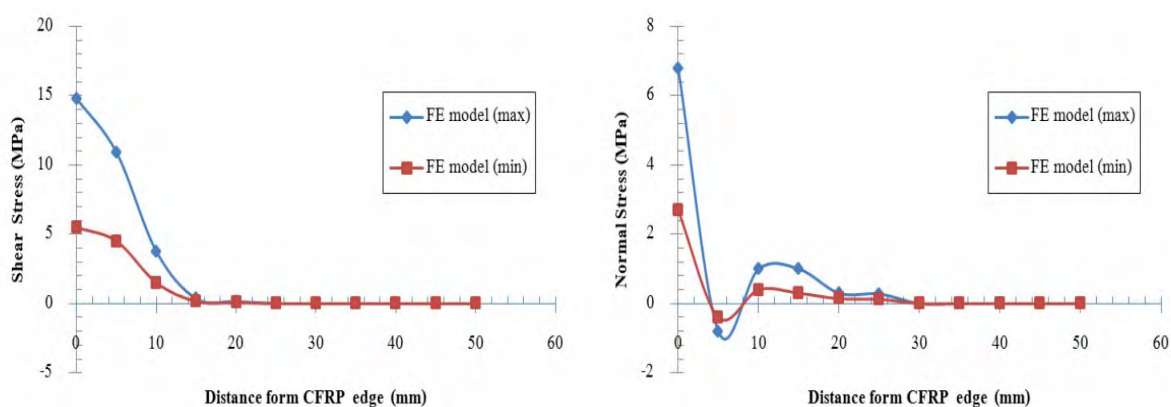
ภาพที่ ก.1 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83\text{MPa}$)



โมเดล CT1.4/GT1.0

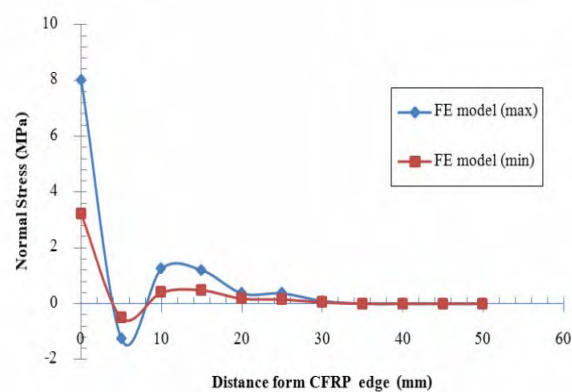
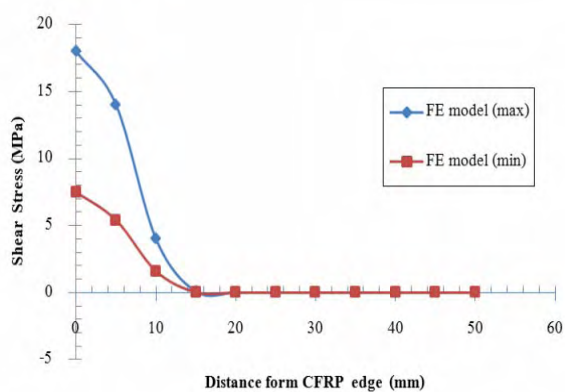


โมเดล CT1.4/GT1.1

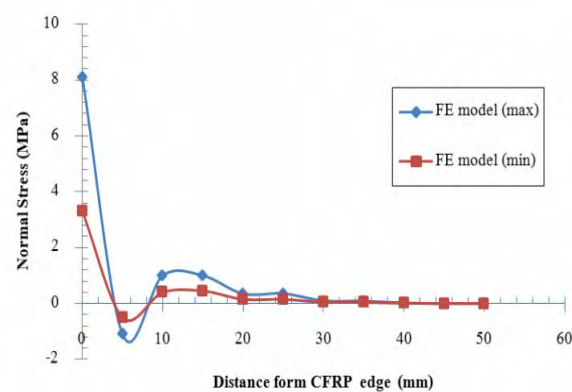
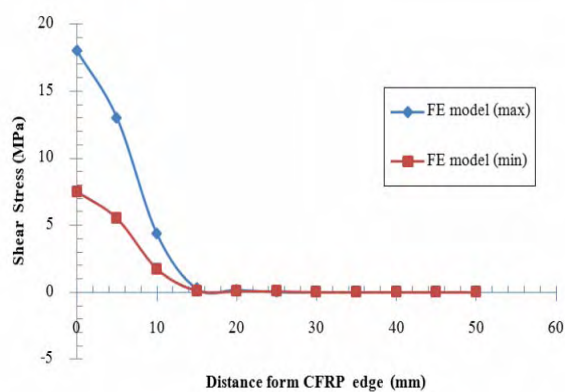


โมเดล CT1.4/GT1.2

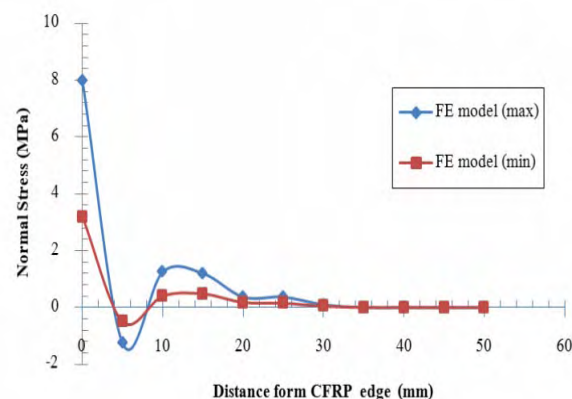
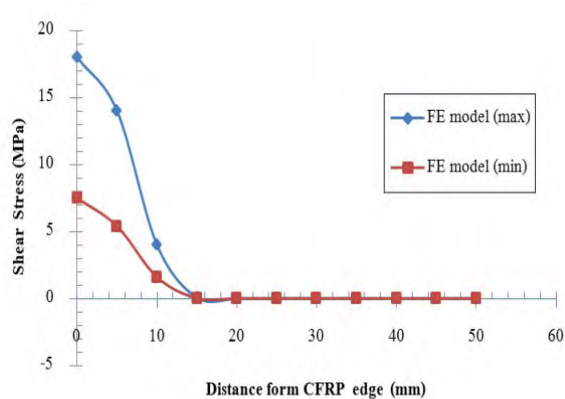
ภาพที่ ก.2 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 100\text{MPa}$)



โมเดล CT1.4/GT1.0

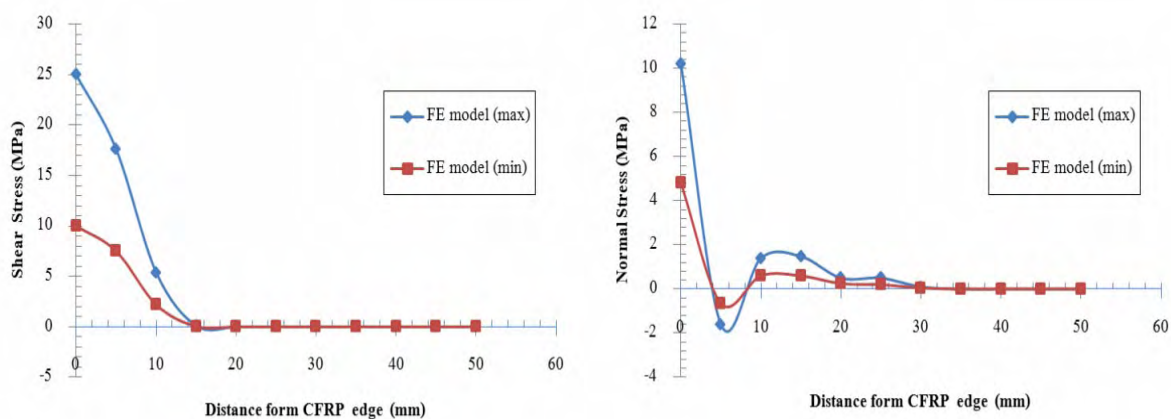


โมเดล CT1.4/GT1.1

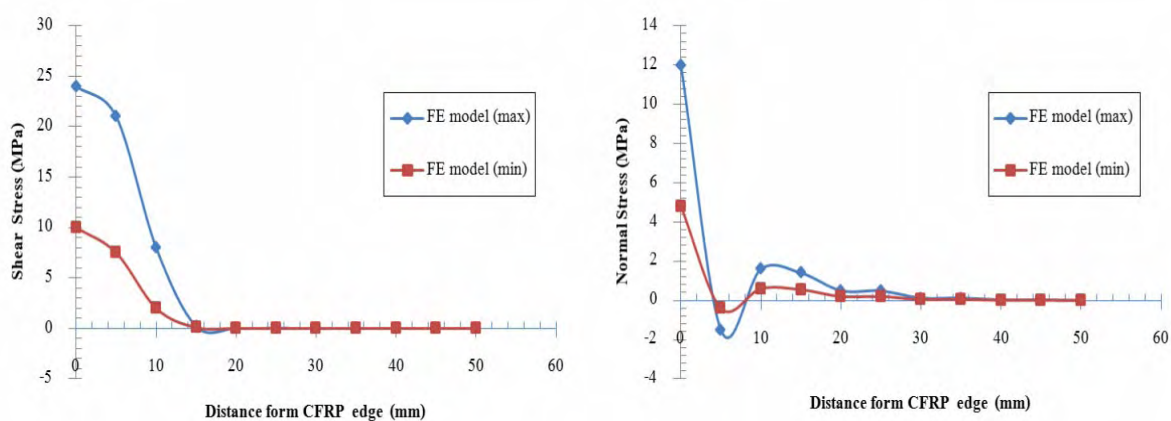


โมเดล CT1.4/GT1.2

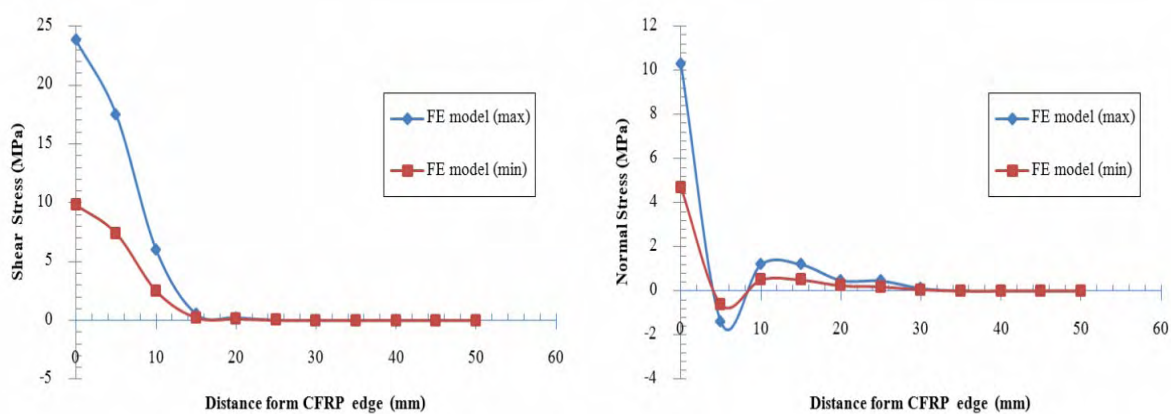
ภาพที่ ก.3 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 120\text{MPa}$)



โมเดล CT1.4/GT1.0

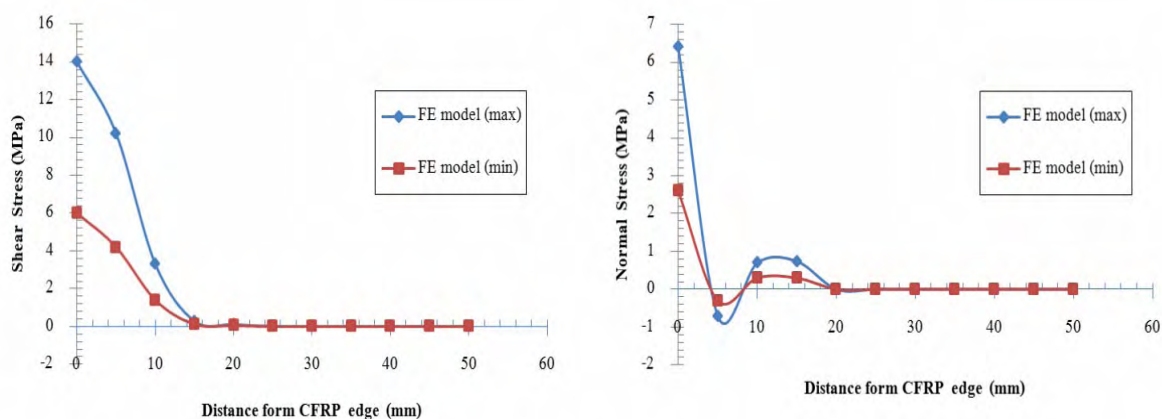


โมเดล CT1.4/GT1.1

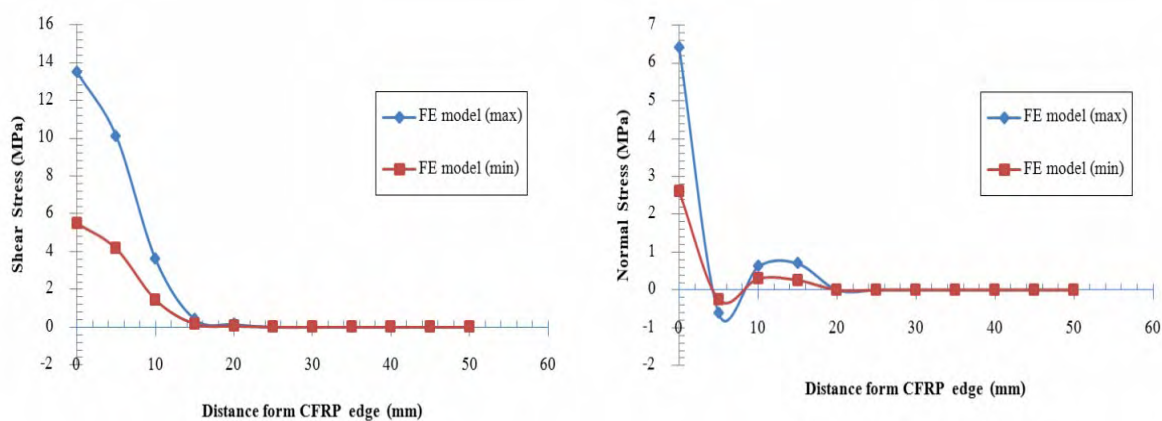


โมเดล CT1.4/GT1.2

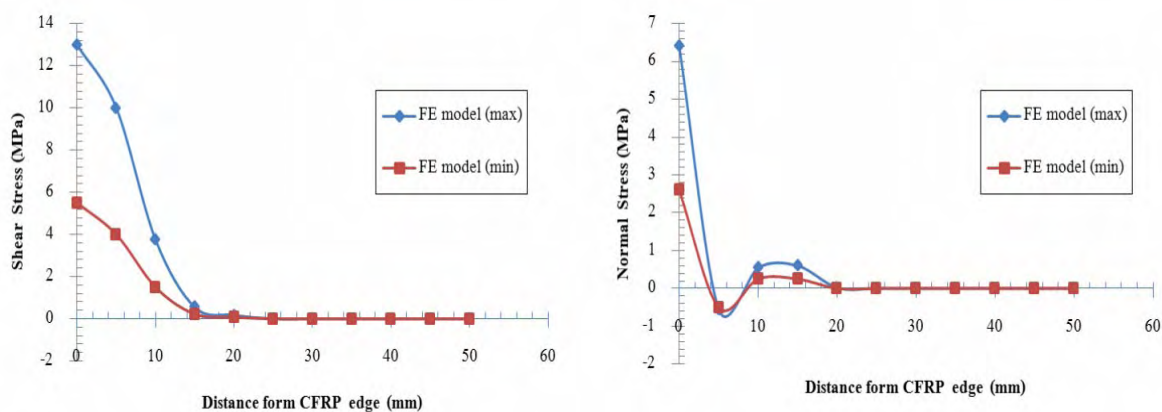
ภาพที่ ก.4 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 160\text{MPa}$)



โมเดล CT1.6/GT1.0

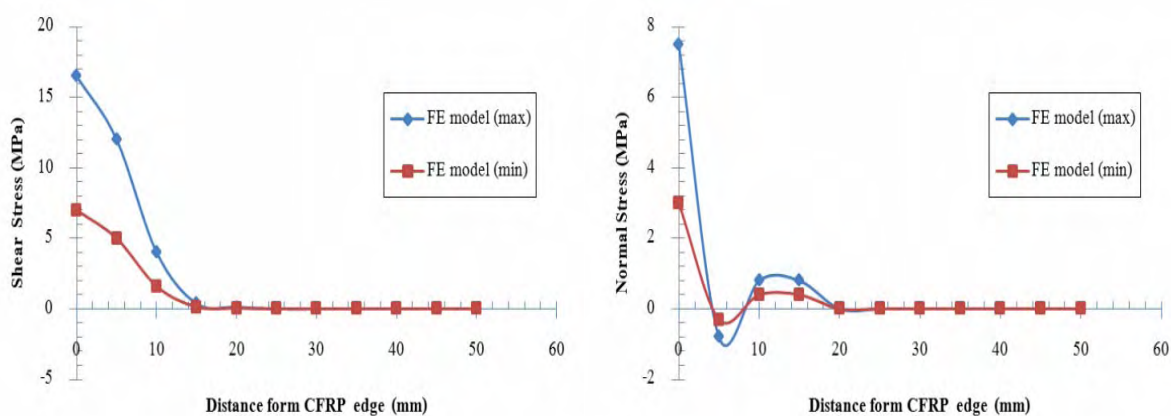


โมเดล CT1.6/GT1.1

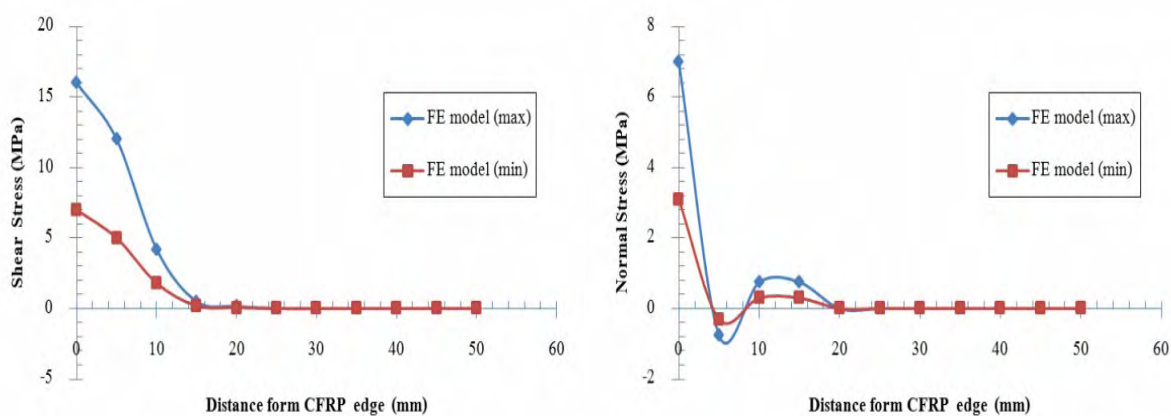


โมเดล CT1.6/GT1.2

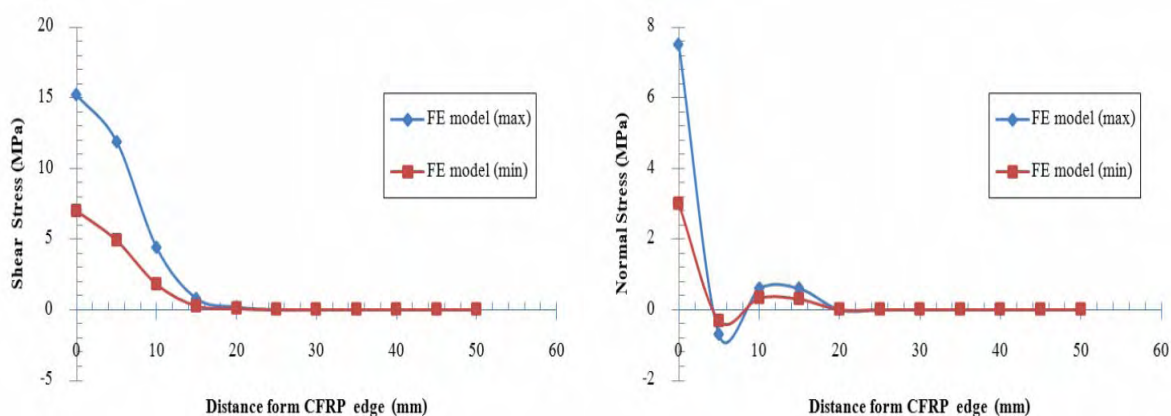
ภาพที่ ก.5 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83\text{MPa}$)



โมเดล CT1.6/GT1.0

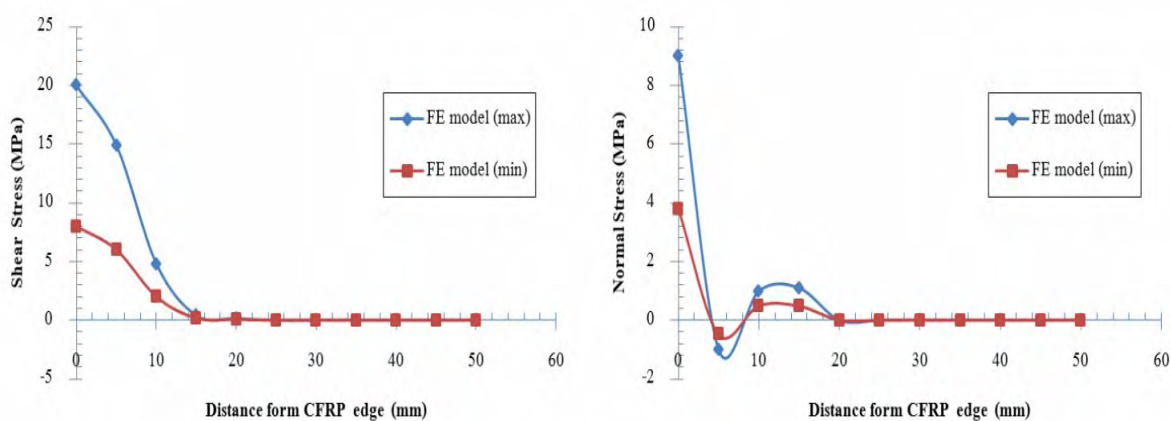


โมเดล CT1.6/GT1.1

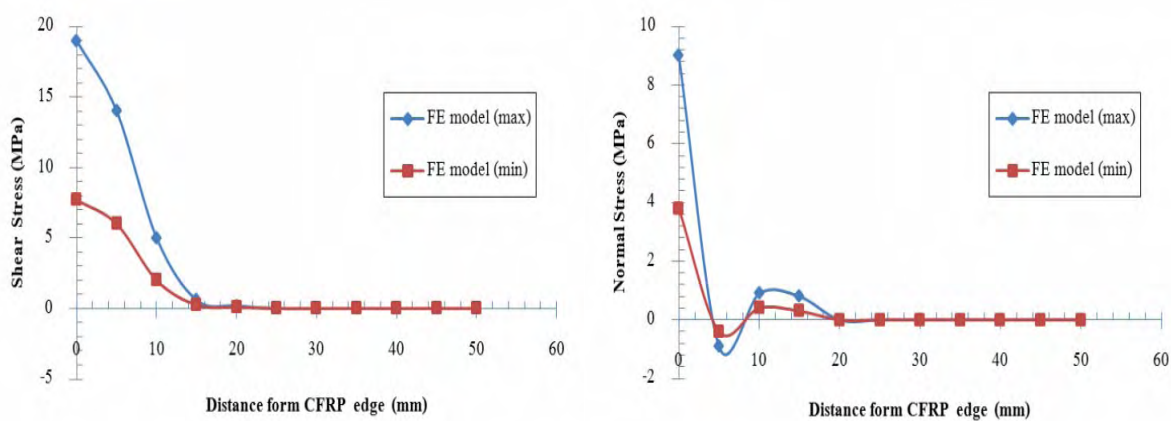


โมเดล CT1.6/GT1.2

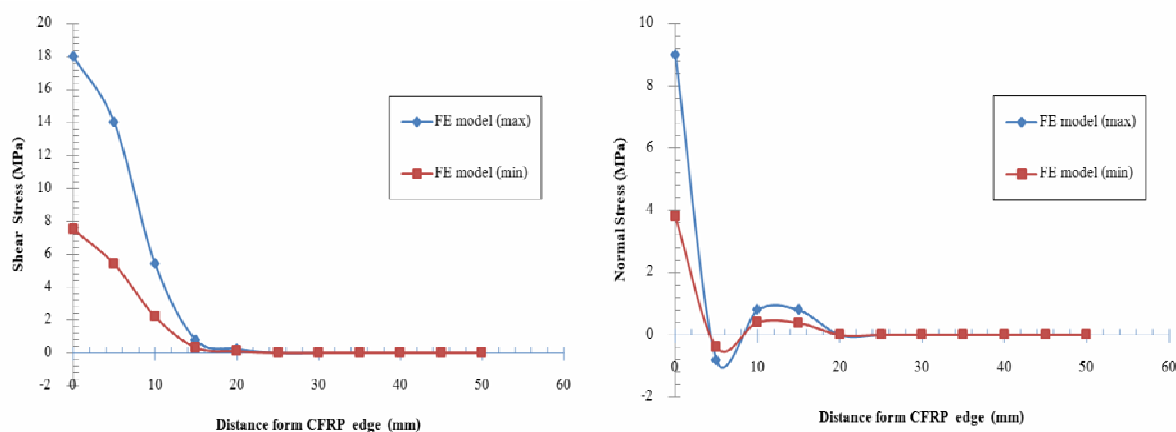
ภาพที่ ก.6 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 100\text{MPa}$)



โมเดล CT1.6/GT1.0

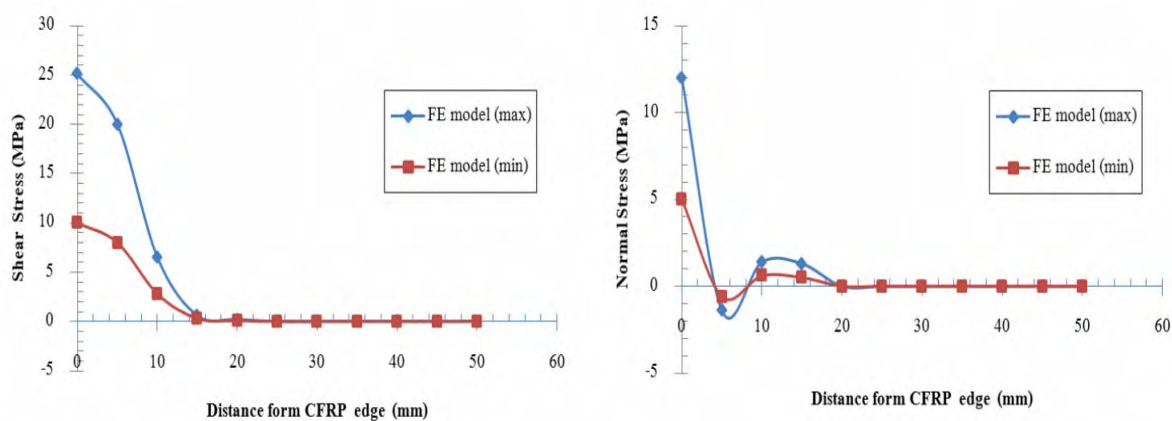


โมเดล CT1.6/GT1.1

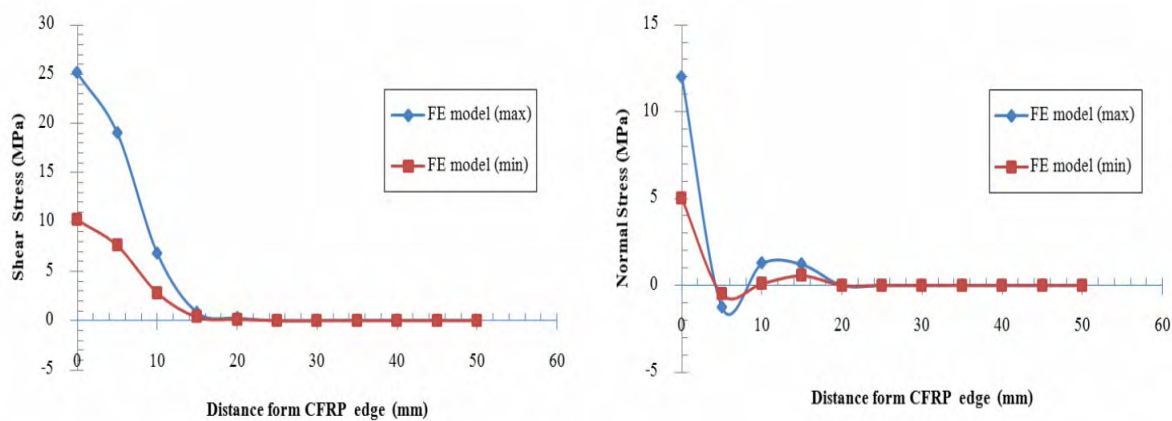


โมเดล CT1.6/GT1.2

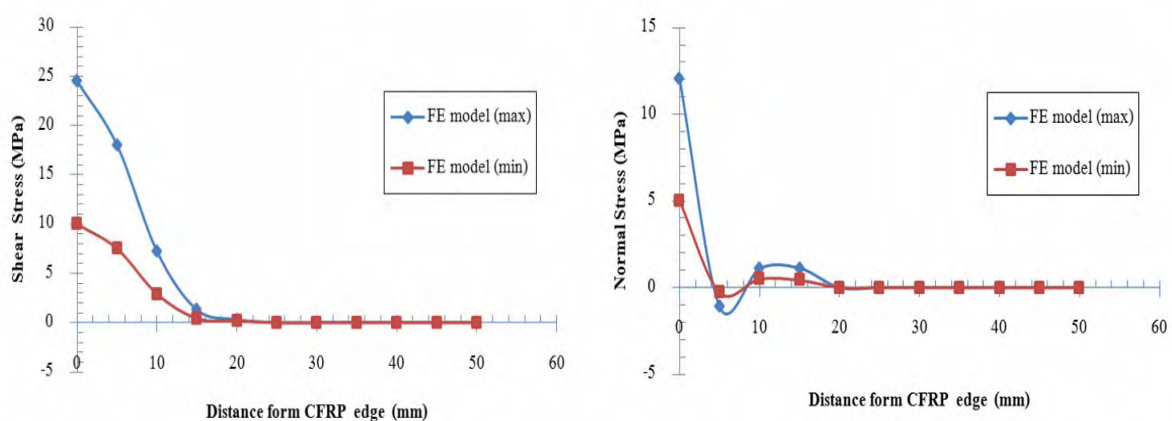
ภาพที่ ก.7 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่มีความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 120\text{MPa}$)



โมเดล CT1.6/GT1.0



โมเดล CT1.6/GT1.1



โมเดล CT1.6/GT1.2

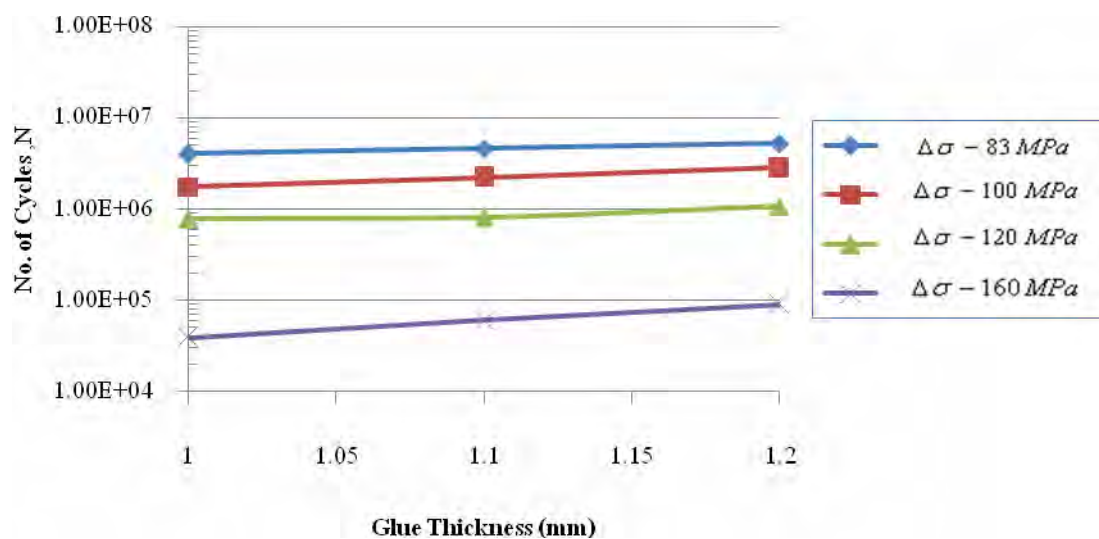
ภาพที่ ก.8 เปรียบเทียบค่า Shear Stress และ Normal Stress ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 160\text{MPa}$)

ภาคผนวก ข

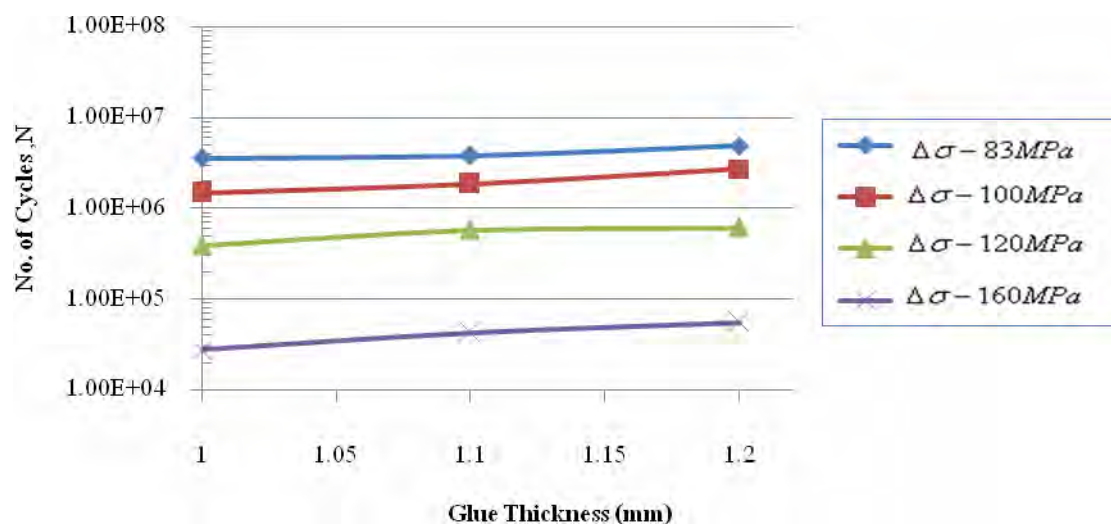
ผลการศึกษาเพิ่มเติมของ

การศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

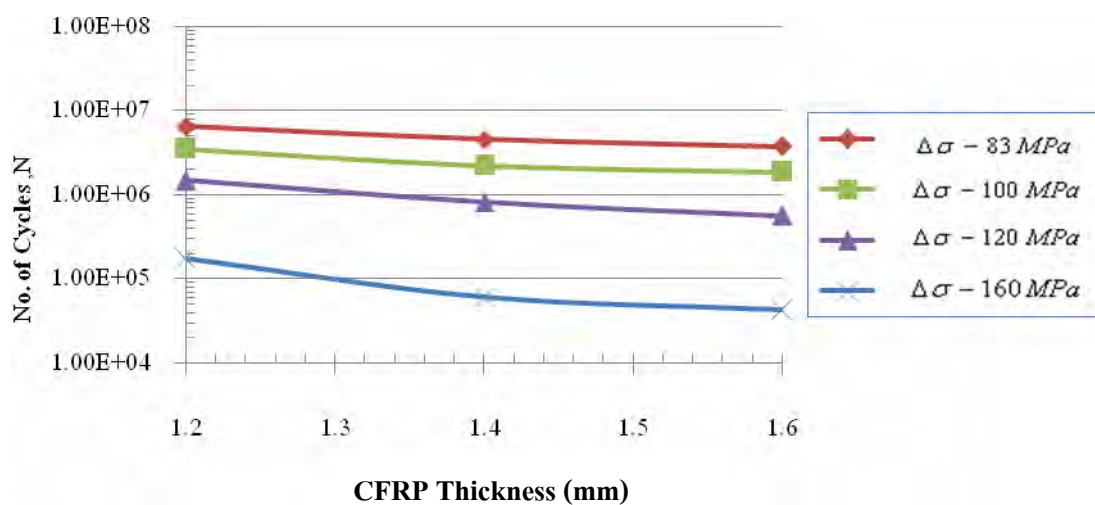
(ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาบต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง)



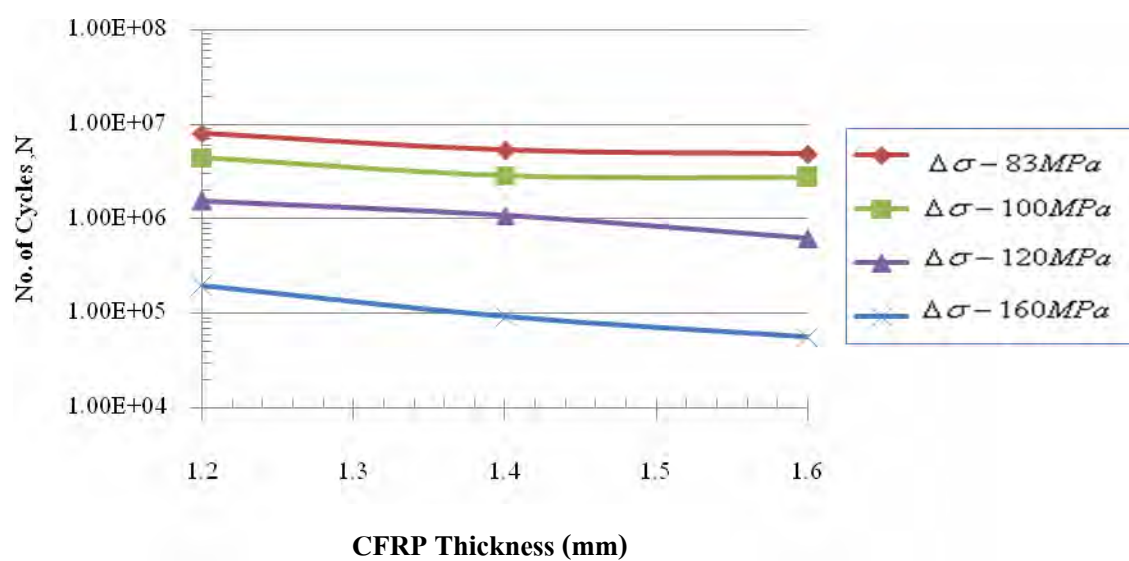
ภาพที่ ข.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.4 mm)



ภาพที่ ข.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.6 mm)



ภาพที่ ข.3 ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากระดาษที่ = 1.1 mm)



ภาพที่ ข.4 ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากระดาษที่ = 1.2 mm)

ภาคผนวก ค

**การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก วางบนคานเหล็ก
ตามมาตรฐาน AASHTO**

ค.1 การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก

ในส่วนนี้จะแสดงวิธีการออกแบบโครงสร้างสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็กขึ้นรูปแบบบริดจอนหน้าตัดตัวไอปีกกว้างเป็นที่เป็สะพานแบบช่วงเดียว พิจารณาออกแบบเป็นสะพานที่เป็นหน้าตัดเชิงประกอบระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตและคานเหล็ก และมีข้อกำหนดในการออกแบบตามที่ระบุด้านล่าง

กรณีที่คานเหล็กขึ้นรูปแบบบริดจอน คานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอปีกกว้างขนาดใหญ่ที่สุด ที่มีการผลิต คือ I 900 (286 กิโลกรัมต่อเมตร) ไม่เพียงพอในการรับโมเมนต์ดัด อาจพิจารณาใช้คานเหล็กที่ต้องออกแบบเป็นพิเศษแทน

ค.1.1 คุณสมบัติที่ใช้ในการออกแบบ

ชนิดของสะพาน	: สะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็กขึ้นรูปแบบบริดจอน (RC Deck Slab on steel Rolled Beam with Cover platy) สะพานช่วงเดียว (Simple Span) แบบหน้าตัดเชิงประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกอย่างเดียว (Live Load Composite Only)
ความยาวสะพาน	: 18.00 เมตร จากจุดรองรับถึงจุดรองรับ
ความกว้างสะพาน	: 9.93 เมตร
คอนกรีต	: $f'_c = 280$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (28-day Cylinder strength) $E_c = 15210\sqrt{f'_c} = 15210\sqrt{280} = 254,510$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
เหล็กเสริม	: SR24, $f_y = 2,400$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (RB6 และ RB9 เท่านั้น) SD40, $f_y = 4,000$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (DB12 หรือใหญ่กว่า)
เหล็กรูปพรรณ	: A36 Steel ตามมาตรฐาน AISC, $f_y = 2,500$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร $E_s = 2,040,000$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค.1.2 วิธีการออกแบบ

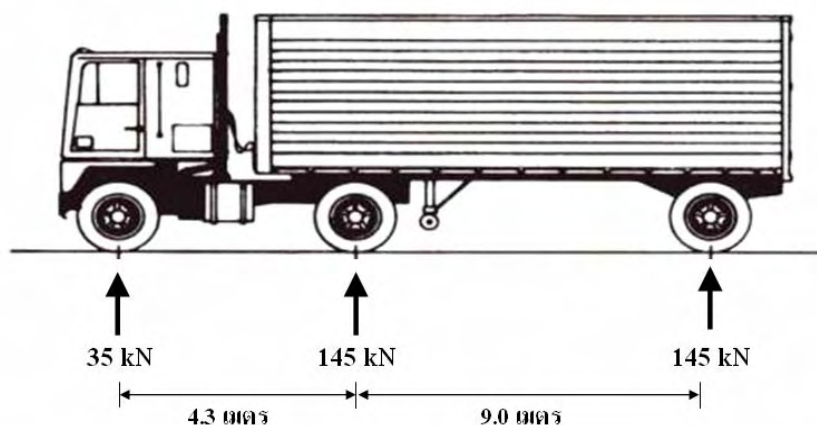
แผ่นพื้น : วิธีกำลัง หรือวิธีตัวคูณน้ำหนัก (Strength Method or Load Factor Design Method) ที่กำหนดโดย AASHTO.

คานเหล็ก : วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Allowable Stress Design) ที่กำหนดโดย AASHTO.

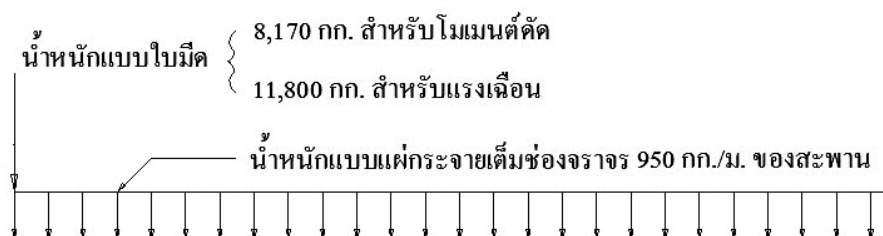
ก.1.3 น้ำหนักบรรทุกในการออกแบบ

น้ำหนักบรรทุกแบบ HS20 Loading ที่กำหนดโดย AASHTO

น้ำหนักแบบรถบรรทุก	น้ำหนักล้อหน้า	1.75	ตัน
	น้ำหนักล้อกลาง	7.25	ตัน
	น้ำหนักล้อหลัง	7.25	ตัน
น้ำหนักแผ่เทียบเท่า	น้ำหนักแบบโปมีด	11.80	ตัน (สำหรับแรงเฉือน)
		8.17	ตัน (สำหรับค่าโมเมนต์ดัด)
น้ำหนักกระจายสม่ำเสมอ	0.95	ตันต่อเมตร	
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต	2.4	ตันต่อลูกบาศก์เมตร	



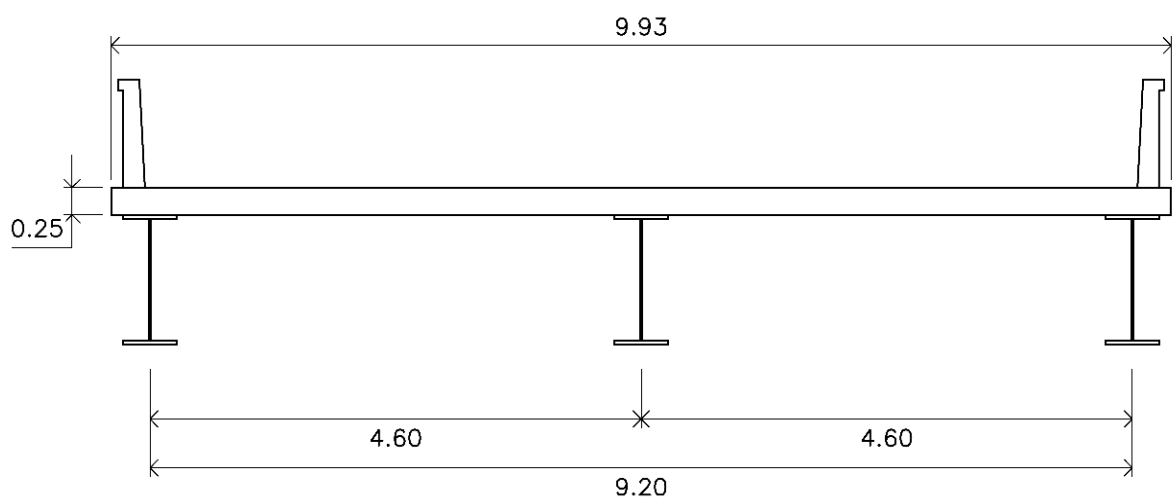
ภาพที่ ค.1 น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ประเภท HS20



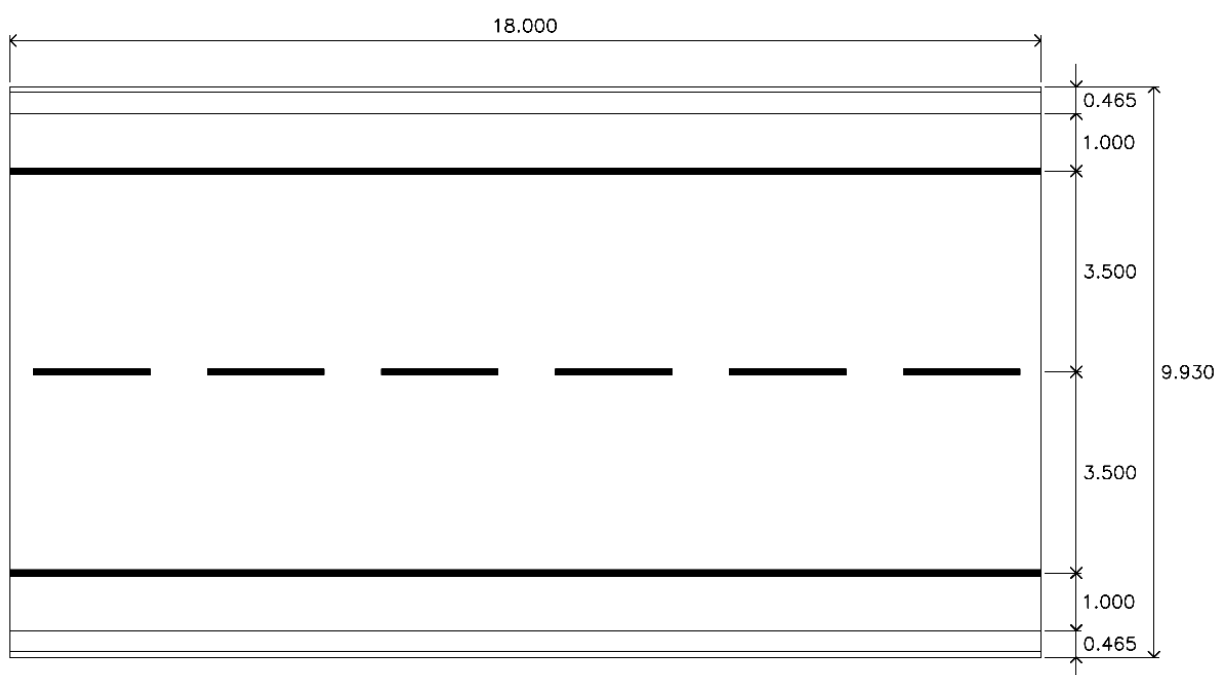
ภาพที่ ค.2 น้ำหนักแผ่เทียบเท่า (Lane Loading) สำหรับรถบรรทุกแบบ HS20 (AASHTO)

ค.1.4 ขนาดของโครงสร้างสะพาน

รูปแบบของสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว นั้นจะมีรูปร่าง และการจัดวางตำแหน่ง ดังภาพที่ ก.3



(ก) หน้าตัดสะพาน



(ข) ระยะการแบ่งเลน

ภาพที่ ค.3 การกำหนดรูปแบบโครงสร้าง (หน่วยเป็น เมตร)

ค.2 การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีต

ค.2.1 ความยาวช่วงพื้นที่ใช้ออกแบบ (S)

สำหรับแผ่นพื้นวางบนคานเหล็ก ให้ระยะ S เป็นระยะห่างระหว่างคานเหล็ก
พิจารณาจากภาพที่ ค.3 (ก) จะได้ $S = 4.6 - 0.50 = 4.10$ เมตร

ค.2.2 ความหนาต่ำสุดของแผ่นพื้น

จากแบบจำลองของสะพานที่ได้สร้างขึ้นมา กำหนดให้แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กมีความหนาอยู่ที่ 0.25 เมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลอง กับมาตรฐาน AASHTO ซึ่งกำหนดให้ค่าการแอ่นตัวของสะพานต้องไม่เกิน $1/800$ ของความยาวช่วงสะพาน ถ้าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ก็สามารถใช้ความหนาที่กำหนดได้

โดยค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองของสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว คือ 0.015 เมตร ส่วนค่าการแอ่นตัวที่กำหนดจาก AASHTO คือ $(1/800)(18.0) = 0.0225$ เมตร > 0.015 เมตร ดังนั้น สามารถใช้ความหนาของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 0.25 เมตร ได้

ค.2.3 โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

AASHTO กำหนดไว้สำหรับหน้าตัดที่ต้านโมเมนต์ดัด ซึ่งต้องมีเหล็กเสริมรับแรงดึงจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดสำหรับเหล็กรับแรงดึงที่เพียงพอที่จะต้านโมเมนต์ดัดได้ไม่น้อยกว่า 1.2 เท่าของโมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดการแตกร้าว (Cracking Moment) ของหน้าตัดนั้น หรือจะต้องไม่น้อยกว่า $4/3$ เท่าของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดัดที่คำนวณได้

$$\phi M_n \geq 1.2 M_{cr}, \phi M_n \geq M_u, \frac{4}{3} A_s (\text{tension}) \quad (1)$$

โดยที่

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$f_r = 2.0 \sqrt{f_c'} = \text{Moment of rupture of concrete}$$

$$I_g = \text{Moment of inertia of gross section}$$

$$y_t = d - kd \quad \text{จากแกนสะเทิน ถึงผิวของคอนกรีต ที่เกิดหน่วยแรงดึงของหน้าตัดแตกร้าว}$$

ตามข้อกำหนด AASHTO ได้กำหนดการคำนวณค่าโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักรถยนต์ ประเภท HS20 เท่ากับ

$$M_{LL} = \left[\frac{(s + 0.61)}{9.74} \right] \quad \text{ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)} \quad (2)$$

โดยที่ S คือ ความยาวช่วงของพื้น (เมตร)

ค.2.4 อัตราส่วนแรงกระแทก (Impact Factor, I)

$$I = 15.24 / (L + 33) \quad , \quad I \leq 0.3 \quad (3)$$

โดยที่ L คือ ความยาวช่วงสะพาน (เมตร)

ค.2.5 วิธีกำลังหรือวิธีตัวค้ำน้ำหนัก

$$M_U = 1.3 [M_{DL} + 1.67 M_{LL} (1 + I)] \quad (4)$$

ค.2.6 ข้อมูลสำหรับการออกแบบ (Design Parameters)

$$\text{Modular ratio, } (n) \quad n = \frac{E_s}{E_c} \quad (5)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์ความลึก หรือตัวคูณแบบโมเมนต์, } (k) \quad k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n \cdot f_c}} \quad (6)$$

$$\text{โมเมนต์ต้านของคอนกรีต } M_R = \left(\frac{f_c + 0}{2} \right) b \cdot k \cdot d \cdot j \cdot d = \frac{f_c}{2} \cdot k \cdot j \cdot b \cdot d^2 \quad (7)$$

โดยที่ $J = 1 - \frac{k}{3}$

ค.2.7 ข้อกำหนดในการออกแบบ

หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต (f'_c)

ว.ส.ท. เมื่อรับแรงดัด ($f_c = 0.45 f'_c$)

AASHTO เมื่อรับแรงดัด ($f_c = 0.40 f'_c$)

หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม (รับแรงดึง)

เหล็กเส้นกลมที่มีกำลังคราก (f_y) ตั้งแต่ 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

f_s = ไม่เกิน 1,200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค.2.8 เหล็กเสริมกระจายแรง (Distribution Reinforcement)

AASHTO เหล็กเสริมกระจายแรง มีปริมาณเหล็กเป็นร้อยละของเหล็กเสริมหลักที่คำนวณได้จากโมเมนต์คิบบวกดังนี้

กรณีเหล็กเสริมมีแนวขนานกับทิศทางจราจร (สะพานหน้าตัดแผ่นพื้นตัน)

$$\text{ร้อยละสำหรับเหล็กเสริมกระจายแรง} = \frac{55}{\sqrt{s}} \quad \text{แต่ไม่เกินร้อยละ 50} \quad (8)$$

กรณีที่แนวเหล็กเสริมหลักตั้งฉากกับทิศทางจราจร (สะพานแผ่นพื้นวางบนคาน)

$$\text{ร้อยละสำหรับเหล็กเสริมกระจายแรง} = \frac{121}{\sqrt{s}} \quad \text{แต่ไม่เกินร้อยละ 67} \quad (9)$$

โดยที่ S เป็นความยาวช่วงพื้นที่ออกแบบ (เมตร)

ค.2.9 เหล็กเสริมต้านทานการยึดหด ($A_{s_{temp}}$)

จะต้องไม่น้อยกว่า 2.65 ตารางเซนติเมตรต่อเมตร และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต้องไม่เกินสามเท่าของความหนากำแพงหรือแผ่นพื้นและต้องไม่เกิน 45.72 เซนติเมตร วางที่ผิวบนของแผ่นพื้นในทิศทางขนานหรือตั้งฉากกับแนวสะพาน

ค.2.10 การหาโมเมนต์ที่ใช้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงดิ่งหลัก

เมื่อพิจารณาแผ่นพื้นที่ต่อเนื่องระหว่างคานภายใน เมื่อพิจารณาต่อความกว้างหนึ่งเมตร น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว ประกอบด้วยน้ำหนักของแผ่นพื้น

น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวของแผ่นพื้น, $W_{DL} = 0.25 \times 2.4 \times 1 = 0.60$ ตันต่อเมตร

$$\text{จะได้ } M_{DL} = \frac{W_{DL} L^2}{12} = \frac{0.60 \times 4.1^2}{12} = 0.54 \text{ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)}$$

$$V_{DL} = \frac{W_{DL} L}{2} = \frac{0.60 \times 4.1}{2} = 0.9 \text{ ตัน (ต่อความกว้าง 1 เมตร)}$$

$$M_{LL} = \left[\frac{(s + 0.61)}{9.74} \right]$$

$$= \left[\frac{(4.1 + 0.61)}{9.74} \right] = 0.37 \text{ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าสัดส่วนแรงกระทบ, } I &= 15.24/(s+38) \\ &= 15.24/(4.1+38) \\ &= 0.362 > 0.3 \end{aligned} \quad \text{ดังนั้น ใช้ } 0.3$$

$$M_U = 1.3[M_{DL} + 1.67M_{LL}(1+I)]$$

$$\begin{aligned} M_U &= 1.3[0.54 + (1.67 \times 0.37 \times 1.3)] \\ &= 1.75 \text{ ตัน-เมตร} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.1 โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

หน้าตัด	M_{DL} (ตัน-เมตร)	M_{LL} (ตัน-เมตร)	M_U (ตัน-เมตร)
ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	0.54	0.37	1.75

พิจารณาใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากแผ่นพื้นที่ต่อเนื่องคานตัวในในการออกแบบ

$$M_U = 1.3[0.54 + (1.67 \times 0.37 \times 1.3)] = 1.75 \text{ ตัน-เมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)}$$

ค.2.11 เหล็กเสริมรับแรงดิ่งหลักที่ต้องการ

$$d = 0.25 - 0.025 = 0.225 \text{ เมตร}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.04 \times 10^6}{15218 \sqrt{280}} = 8.015 \text{ ใช้ } 8.0$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n \cdot f_c}} = \frac{1}{1 + \left[\frac{1,200}{8.0 \times (0.4 \times 280)} \right]} = 0.43$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.43}{3} = 0.86$$

$$A_s = \frac{M_U}{f_s j d} = \frac{1,750 \times 100}{(1,200 \times 0.86 \times 22.5)} = 6.92 \text{ ตารางเซนติเมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)}$$

ดังนั้น ใช้เหล็กเสริม RB9@100 มิลลิเมตร ($A_s = 7.04$ ตารางเซนติเมตร ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ค.2.12 เหล็กเสริมกระจายแรง

$$\text{ร้อยละ } A_{s, \text{dist}} = \frac{121}{\sqrt{s}} = \frac{121}{\sqrt{4.1}} = \text{ร้อยละ } 59.76 < \text{ร้อยละ } 67$$

ดังนั้น ใช้ ร้อยละ $A_{s, \text{dist}} = \text{ร้อยละ } 59.76$ ของเหล็กเสริมหลักจะได้

$$A_{s, \text{dist}} = 0.5976 \times 6.92 = 4.14 \text{ ตารางเซนติเมตร (ต่อความกว้าง 1 เมตร)}$$

ดังนั้น ใช้เหล็กเสริมกระจายแรง RB9 @100 มิลลิเมตร

((A_s) = 7.04 ตารางเซนติเมตร ต่อความกว้าง 1 เมตร)

ผ่าน

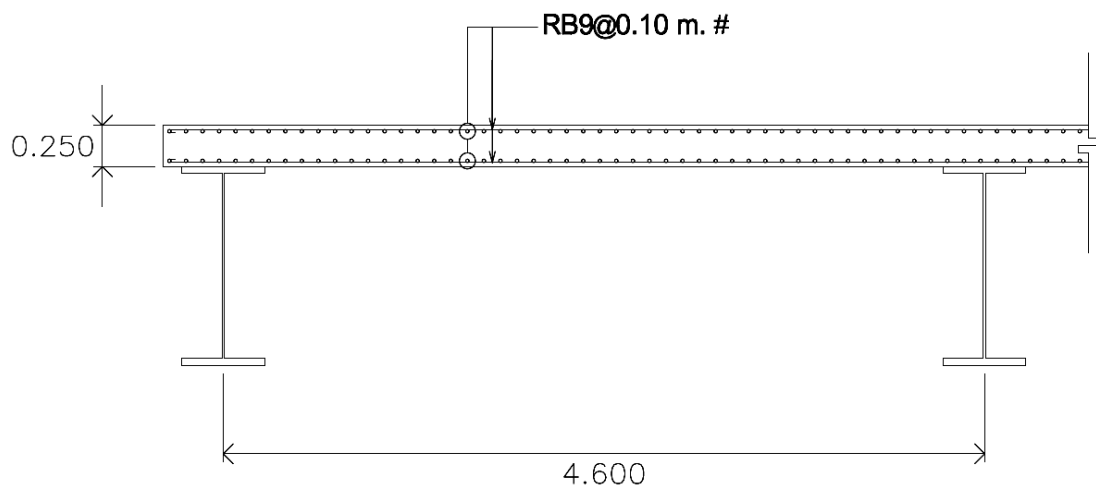
ค.2.13 เหล็กเสริมต้านทานการยึดหด

$$(A_{s_{\text{temp}}}) = 2.65 \text{ ตร.ซม. ต่อความกว้าง 1 เมตร}$$

ดังนั้น ใช้เหล็กเสริมต้านทานการยึดหด RB9@100 มิลลิเมตร

$$((A_{s_{\text{temp}}}) = 4.04 \text{ ตารางเซนติเมตร})$$

ผ่าน



ภาพที่ ค.4 รายละเอียดเหล็กเสริมในพื้นที่คองกรีต

ค.3 ออกแบบคานเหล็ก

เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบคานแต่ละตัวจะเป็นลักษณะเดียวกัน จึงจะใช้คานตัวใน ในการออกแบบ

ค.3.1 น้ำหนักบรรทุก, โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน

ในขั้นตอนก่อสร้างไม่มีการตั้งนั่งร้านค้ำยันคานเหล็กในระหว่างการเทคอนกรีตแผ่นพื้น สะพานที่ออกแบบจึงเป็นสะพานหน้าตัดเชิงประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรอย่างเดียว (Live Load composite only)

ดังนั้นคานเหล็กจะรองรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวของคานเหล็ก แผ่นพื้นคอนกรีต กว้าง 4.1 เมตร และส่วนประกอบอื่น ๆ ซึ่งรวมกันเป็นน้ำหนักบรรทุกตายตัว, DL จะได้

น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำกับคานเหล็ก

แผ่นพื้น : 0.75×2.4	=	1.80	ตันต่อเมตร
คานเหล็กและส่วนประกอบอื่น ๆ โดยประมาณ	=	0.50	ตันต่อเมตร
รวม DL ต่อคานหนึ่งตัว	=	2.30	ตันต่อเมตร

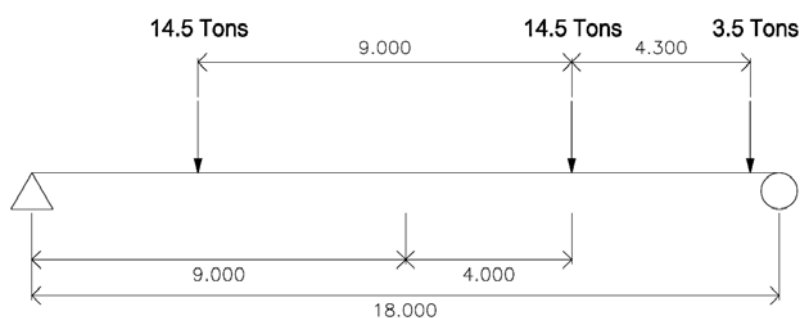
โมเมนต์ดัดสูงสุดที่กึ่งกลางความยาวช่วง

$$M_{DL} = \frac{2.30 \times (18.0)^2}{8} = 93.15 \text{ ตัน-เมตร}$$

แรงเฉือนสูงสุดเกิดที่จุดรองรับ

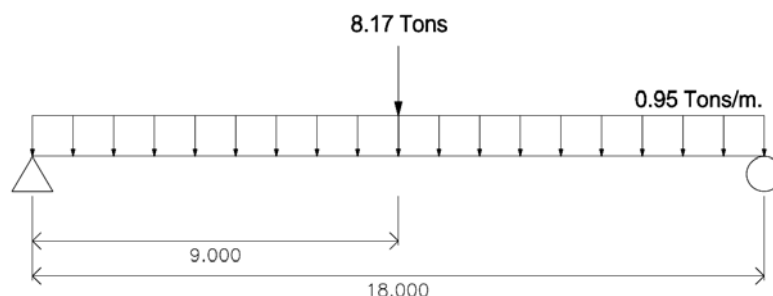
$$V_{DL} = \frac{2.30 \times 18.0}{2} = 20.7 \text{ ตัน}$$

พิจารณาหาโมเมนต์ภายใน โดยการจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบรถบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่เทียบเท่าของน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20 เพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดในคานสะพาน ตามลำดับ



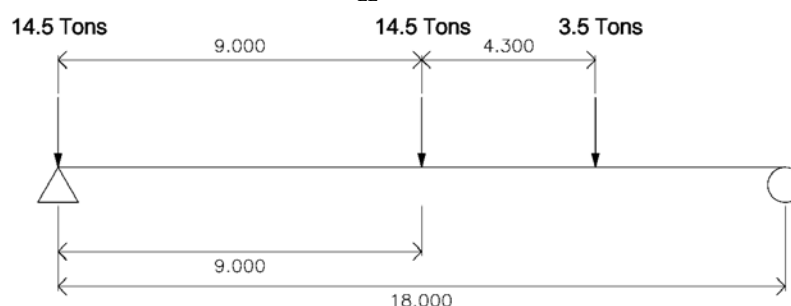
(ก) การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบรถยนต์ทุกเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

(โมเมนต์ดัด $M_{LL} = 99.82$ ตัน-เมตร)



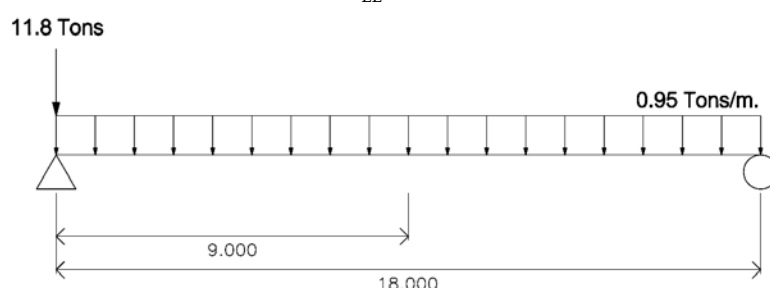
(ข) การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่เทียบเท่าเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

(โมเมนต์ดัด $M_{LL} = 75.24$ ตัน-เมตร)



(ค) การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบรถบรรทุกเพื่อให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด

(แรงเฉือน $V_{LL} = 22.66$ ตัน)



(ง) การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่เทียบเท่าเพื่อให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด

(แรงเฉือน $V_{LL} = 20.35$ ตัน)

ภาพที่ ค.5 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกทุกเพื่อให้เกิดแรงภายในสูงสุด

จากภาพที่ ก.5 (ก) และ(ข) ตามลำดับ

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบรถบรรทุก ; $M_{LL,TL} = 99.82$ ตัน-เมตร

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักแบบแผ่เทียบเท่า ; $M_{LL,TL} = 75.240$ ตัน-เมตร

ดังนั้น โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20 = 99.82 ตัน-เมตร

และ โมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ HS20 ที่กระทำต่อคานหนึ่งตัว คือ

$$M_{LL} = 99.82 \quad \text{ตัน-เมตร ต่อ คาน}$$

จากภาพที่ ก.5 (ค) และ(ง) ตามลำดับ

แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบรถบรรทุก ; $V_{LL,TL} = 22.66$ ตัน

แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบแผ่เทียบเท่า ; $V_{LL,LL} = 20.350$ ตัน

ดังนั้น แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบ H20 = 22.66 ตัน

และ น้ำหนักแรงเฉือนสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ HS20 ที่กระทำต่อคานหนึ่งตัว คือ

$$V_{LL} = 22.66 \text{ ตัน ต่อ คาน}$$

อัตราส่วนแรงกระทำจะเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักบรรทุกจรถดงนี้

$$I = 15.24 / (L+38)$$

$$= 15.24 / (18.0 + 38)$$

$$= 0.272 \text{ ซึ่งน้อยกว่า } 0.300 \text{ ใช้ } I = 0.272$$

ดังนั้น $M_{LL+I} = (1+I)M_{LL} = (1+0.272)(99.82) = 126.97$ ตัน-เมตร ต่อ คาน

$$V_{LL+I} = (1+I)V_{LL} = (1+0.272)(22.66) = 28.83 \text{ ตัน ต่อ คาน}$$

ตารางที่ ค.2 แรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียว

	Dead Load	Live Load+I
โมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางช่วง (ตัน-เมตร)	93.15	126.97
แรงเฉือนที่จู่ตรงรับ (ตัน)	27.70	28.83

ค.3.2 คำนวณหน้าตัดที่ต้องการของปีกคานบน และปีกคานล่างของคานหลัก

แผ่นพื้นคอนกรีตหนา 25.0 cm. และความหนาประสิทธิภาพของแผ่นพื้นคอนกรีตสำหรับหน้าตัดเชิงประกอบคือ 25.0 cm. ดังนั้น ความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของปีกคานบนของคานรูปตัวที่จะเป็นค่าที่น้อยที่สุดจากค่าต่อไปนี้

$$\text{ความยาวช่วง}/4, \quad L/4 = 18.0 / 4 = 4.5 \text{ เมตร (450 เซนติเมตร)}$$

$$\text{ระยะระหว่างคาน} = 410 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{และ } 12 \text{ เท่าของความหนาแผ่นพื้น} = 12 \times 25.0 = 300 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้น ความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นคอนกรีตสำหรับหน้าตัดเชิงประกอบ คือ 410 เซนติเมตร

พิจารณาใช้คานหน้าตัดตัวไอปีกกว้างที่มีความลึก 120 เซนติเมตร และใช้ค่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ $f_a = 1,400$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดของปีกล่างของคานหลักที่ต้องการ ($A_{bf,r}$) สามารถประมาณได้จาก

$$A_{bf,r} = \left(\frac{1.0 \times 10^5}{f_a} \right) \left(\frac{M_{DL}}{D_{cg}} + \frac{M_{LL+I}}{D_{cg} + t} \right) \quad (10)$$

เมื่อ D_{cg} = ระยะระหว่างปีกคาน, $D_{cg} = 120$ เซนติเมตร
 t = ความหนาของพื้นคอนกรีต, $t = 25$ เซนติเมตร
 ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการปีกคานของคานเหล็ก ($A_{bf,r}$) มีค่าเท่ากับ

$$A_{bf,r} = \left[\frac{1.0 \times 10^5}{1,400} \right] \left[\frac{93.15}{120} + \frac{126.97}{120 + 25} \right]$$

$$= 118.0 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของปีกคานบนของคานเหล็ก, ($A_{tf,r}$) กับพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของปีกคานด้านล่างของคานเหล็ก, ($A_{bf,r}$) อาจประมาณได้จากความยาวช่วงคาน L ได้ดังนี้

$$R = \frac{A_{tf,r}}{A_{bf,r}} = \frac{15.0}{(57.0 - L)} \quad (11)$$

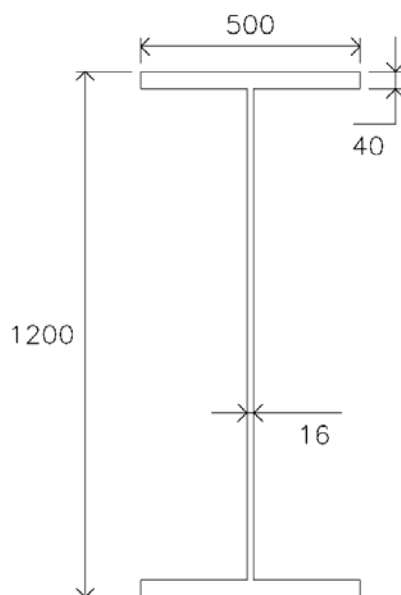
$$\text{ดังนั้น} \quad R = \frac{15.0}{(57.0 - 18.0)} = 0.3846$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของปีกบนของคานเหล็ก, $A_{tf,r}$ มีค่าเท่ากับ

$$A_{tf,r} = R(A_{bf,r}) = 0.3846 \times 118.0 = 45.38 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

ดังนั้น หน้าตัดคานเหล็กที่ต้องกาจะต้องมีความลึกไม่น้อยกว่า 1200 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัดของ ปีกบนไม่น้อยกว่า 45.38 ตารางเซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดของปีกล่างไม่น้อยกว่า 118.0 ตารางเซนติเมตร

พิจารณาใช้คานเหล็กขึ้นรูปแบบปริตร้อนหน้าตัดได้ปีกกว้าง (Wide Flange) ประเภท 1200WB455 มีความกว้างทั้งหมด 500 มิลลิเมตร ปีกคานหนา 40 มิลลิเมตร จะมีพื้นที่หน้าตัดของ ปีกคาน = $4.0 \times 5.00 = 200.00$ ตารางเซนติเมตร > 118.0 และ 45.38 ตารางเซนติเมตร ผ่าน



ภาพที่ ค.6 รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)

ค.3.3 การคำนวณคุณสมบัติของคานเหล็ก

(1) การคำนวณคุณสมบัติของคานเหล็กที่หน้าตัดที่กึ่งกลางคาน

วัสดุคุณสมบัติ

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, E_C	: 255,000	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม, E_S	: 2,040,000	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
$n = \frac{E_S}{E_C}$	: 8.0	

คานเหล็ก (1200WB455)

ความหนาปีก, t_1	: 4	เซนติเมตร
ความหนาเอว, t_2	: 1.6	เซนติเมตร
ความกว้างของหน้าตัด, b	: 50	เซนติเมตร
ความลึกของหน้าตัด, h	: 120	เซนติเมตร
จำนวนของคานเหล็ก	: 1	ชิ้น
y_{CL}	: 60	เซนติเมตร
พื้นที่หน้าตัด	: 579.2	ตารางเซนติเมตร
I_{WF}	: 1,533,457	(เซนติเมตร) ⁴

ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดเชิงประกอบไปยัง

ขอบบนของคานเหล็ก	= y_{st}	: 60	เซนติเมตร
ขอบล่างของคานเหล็ก	= y_{sb}	: 60	เซนติเมตร

โมดูลัสของหน้าตัด (S)

$$\text{ขอบบนของคานเหล็ก } (S_{st}) = I_{WF} / y_{st} : 25,600 \quad (\text{เซนติเมตร})^3$$

$$\text{ขอบล่างของคานเหล็ก } (S_{sb}) = I_{WF} / y_{sb} : 25,600 \quad (\text{เซนติเมตร})^3$$

ในกรณีที่คานสะพานจะรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงเวลาสั้น ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกจรและแรง

$$\text{กระแทก } (n = \frac{E_s}{E_c})$$

(2) การคำนวณคุณสมบัติเชิงประกอบของกึ่งกลางช่วงสำหรับ น้ำหนักบรรทุกจรรวมแรงกระแทก ($n = 8.0$)

วัสดุคุณสมบัติ

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, } E_C : 255,000 \quad \text{กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม, } E_s : 2,040,000 \quad \text{กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$n = \frac{E_s}{E_C} : 8.0$$

แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete deck)

$$\text{ความกว้างของช่วงแผ่นพื้น, } B : 410 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{ความหนาของแผ่นพื้น, } H : 25 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$y_{CL} : 12.5 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} : 10,250 \quad \text{ตารางเซนติเมตร}$$

$$I_{DECK} : 533,854 \quad (\text{เซนติเมตร})^4$$

คานเหล็ก (1200WB455)

$$\text{ความหนาปีก, } t_1 : 4 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{ความหนาเอว, } t_2 : 1.6 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{ความกว้างของหน้าตัด, } b : 50 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{ความลึกของหน้าตัด, } h : 120 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{จำนวนของคานเหล็ก} : 1 \quad \text{ชิ้น}$$

$$y_{CL} : 60 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัด} : 579.2 \quad \text{ตารางเซนติเมตร}$$

$$I_{WF} : 1,533,457 \quad (\text{เซนติเมตร})^4$$

หน้าตัดคอมโพสิต

$$y \text{ (Centroid of composite section)} : 33 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$I_{DECK} : 4.86 \times 10^6 \quad (\text{เซนติเมตร})^4$$

$$I_{WF} : 3.10 \times 10^6 \quad (\text{เซนติเมตร})^4$$

$$I_{comp.} : 7.95 \times 10^6 \quad (\text{เซนติเมตร})^4$$

ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดเชิงประกอบไปยัง

$$\text{ขอบบนของคานเหล็ก} = y_{st} : 8 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{ขอบล่างของคานเหล็ก} = y_{sb} : 112 \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\text{ขอบบนของแผ่นคอนกรีต} = y_c : 33 \quad \text{เซนติเมตร}$$

โมเมนต์ของหน้าตัด (S)

$$\text{ขอบบนของคานเหล็ก } (S_{st}) = I_{comp.} / y_{st} : 99.38 \times 10^4 \quad (\text{เซนติเมตร})^3$$

$$\text{ขอบล่างของคานเหล็ก } (S_{sb}) = I_{comp.} / y_{sb} : 7.10 \times 10^4 \quad (\text{เซนติเมตร})^3$$

$$\text{ขอบล่างของแผ่นคอนกรีต } (S_c) = I_{comp.} / y_c : 24.10 \times 10^4 \quad (\text{เซนติเมตร})^3$$

ค.3.4 ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัด

เนื่องจากไม่มีการค้ำยันคานเหล็กในระหว่างการเทคอนกรีตของแผ่นพื้นคอนกรีตคานสะพานที่ออกแบบจะเป็นคานหนึ่งตัวเชิงประกอบสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรอย่างเดียว (Live Load Composite only) หน้าตัดคานเหล็กจะรองรับน้ำหนักบรรทุกตายตัว (DL) ในขณะที่หน้าตัดคานเชิงประกอบจะรองรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม (SDL) และน้ำหนักบรรทุกจะรวมแรงกระทำ (LL+I)

การคำนวณน้ำหนักบรรทุกตายตัว (DL) ใช้โมเมนต์ของหน้าตัดของคานเหล็กในการคำนวณหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม (SDL) ใช้โมเมนต์หน้าตัดเชิงประกอบ ($3n=24$) หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจะรวมกระทำ (LL+I) ใช้โมเมนต์หน้าตัดเชิงประกอบ ($n=8$)

ตารางที่ 3.5 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคาน แสดงว่าหน่วยแรงรวมที่ขอบบนของคานเหล็กและขอบล่างของเหล็กมีค่าน้อยกว่าและใกล้เคียงกับหน่วยแรงที่ยอมให้ ($f_a = 1,400$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ ค.3 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเชิงประกอบบริเวณหน้าตัดที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด

หน่วยแรงในคานเหล็ก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
ขอบบนของคานเหล็ก (แรงอัด)	ขอบล่างของคานเหล็ก (แรงดึง)
DL : $f_b = 93.15 \times 10^3 \times 10^2 / 2.56 \times 10^4 = 363.87$	$f_b = 93.15 \times 10^3 \times 10^2 / 2.56 \times 10^4 = 363.87$
LL+I : $f_b = 126.97 \times 10^3 \times 10^2 / 99.38 \times 10^4 = 12.78$	$f_b = 126.97 \times 10^3 \times 10^2 / 7.10 \times 10^4 = 178.83$
หน่วยแรงรวม = 376.65 < f_a (1,400) <u>ผ่าน</u>	หน่วยแรงรวม = 542.70 < f_a (1,400) <u>ผ่าน</u>

ตารางที่ ค.4 แสดงหน่วยแรงรวมที่ขอบบนของแผ่นพื้นมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ($f_{ca} = 0.4 f_c' = 112$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

หน่วยแรงที่ผิวบนของแผ่นพื้นคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
LL+I : $f_{cb} = 126.97 \times 10^3 \times 10^2 / (24.10 \times 10^4 \times 8.0) = 6.59$ หน่วยแรงรวม = 6.59 < f_{ca} (112) <u>ผ่าน</u>

ค.3.5 ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนสูงสุด

สำหรับคานเหล็กรูปตัวไอปีกกว้าง มีแรงเฉือนสูงสุดที่คำนวณไว้คือ 28.83 ตัน ที่จุดรองรับ เหล็กแผ่นตั้งมีความลึกเท่ากับ 120 เซนติเมตร หน้า 1.60 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กแผ่นตั้งคือ $120 \times 1.60 = 192$ ตารางเซนติเมตร

หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยในเหล็กแผ่นตั้งเท่ากับ

$$f_v = (28.83 \times 1,000) / 192 = 150.16 < 835 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

เหล็กเสริมข้างคานรับแรง (Bearing Stiffeners) ตรงปลายคานไม่จำเป็นสำหรับคานขึ้นรูปแบบปริตร้อน ถ้าหากหน่วยแรงเฉือนของเหล็กแผ่นตั้งไม่เกินร้อยละ 75 ของค่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ (โดยที่หน่วยแรงเฉือนสำหรับเหล็ก A36 มีค่าเท่ากับ 835 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ เท่ากับ

$$150.16 / 835 = 0.180 < 0.75$$

ดังนั้น ไม่ต้องใส่เหล็กเสริมข้างคานรับแรงกด (Bearing Stiffeners) ก็ได้

ภาคผนวก ง
การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้า ตามมาตรฐาน
AASHTO

ตารางที่ ง.1 การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้า ตามมาตรฐาน
AASHTO (AASHTO, 2003) (ต่อ)

ข้อกำหนดทั่วไป	สถานะของสะพาน	Detail Category	ประเภทรูปจากภาพที่ 2.28
Groove-weld splice connections with weld soundness established by NDT and all required grinding in the direction of the applied stresses	Base metal and weld metal at full-penetration groove-welded splices:		
	Of plates of similar cross sections with welds ground flush	B	8, 10
	With 600-mm radius transitions in width with welds ground flush	B	13
	With transitions in width or thickness with welds ground to provide slopes no steeper than 1.0-2.5		11, 12
	Grades 690/690W base metal Other base metal grades With or without transitions having slopes no greater than 1.0-2.5, when weld reinforcement is not removed	B' B C	8, 10, 11, 12
Longitudinally loaded groove-welded attachments	Base metal at details attached by full- or partial-penetration groove welds:		
	When the detail length in the direction of applied stress is	C	6, 15
	Less than 50 mm		
	Between 50 mm and 12 times the detail thickness, but less than 100 mm	D	15
	Greater than either 12 times the detail thickness or 100 mm		
	Detail thickness < 25 mm	E	15
	Detail thickness ≥ 25 mm	E'	15
	With a transition radius with end welds ground smooth, regardless of detail length:		16
	Transition radius ≥ 60 mm	B	
	600 mm > transition radius ≥ 150 mm	C	
	150 mm > transition radius ≥ 50 mm	D	
	Transition radius < 50 mm	E	
	With a transition radius with end welds not ground smooth	E	16

ตารางที่ ง.1 การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้า ตามมาตรฐาน
AASHTO (AASHTO, 2003) (ต่อ)

ข้อกำหนด ทั่วไป	สถานะของสะพาน	Detail Category	ประเภทรูปจาก ภาพที่ 2.28
Longitudinally loaded fillet- welded attachments	Base metal of details attached by fillet welds: - When the detail length in the direction of applied stress is - Less than 50 mm or stud-type shear connectors - Between 50 mm and 12 times the detail thickness, but less than 100 mm - Greater than either 12 times the detail thickness or 100 mm - Detail thickness < 25 mm - Detail thickness $\geq$ 25 mm - With a transition radius with the end welds ground smooth, regardless of detail length: - Transition radius $\geq$ 50 mm - Transition radius < 50 mm - With a transition radius with end welds not ground smooth	C	15, 17, 18, 20
		D	15, 17
			7, 9, 15, 17
		E	
		E'	16
		D	
Transversely loaded fillet- welded attachments	Base metal at details attached by fillet welds: - With a transition radius with end welds ground smooth: - Transition radius $\geq$ 50 mm - Transition radius < 50 mm - With any transition radius with end welds not ground smooth	E	
		E	
		E	16
Mechanically fastened connections	Base metal: - At gross section of high-strength bolted slip-critical connections, expect axially loaded joints in which out-of-plane bending is induced in connected materials - At net section of high-strength bolted nonslip-critical connections - At net section of riveted connections	B	21
		B	
		D	

ภาคผนวก จ

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย และ ศรัณย์ ประมูลพงศ์ (2553), พฤติกรรมความล่าช้าได้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์, วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ., Vol. 3(1), pp. 38-51

พฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลัง ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Fatigue Performance of Tensile Steel Members Strengthened with CFRP Plates

กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย* ศรัณย์ ประมูลพงศ์

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 พบว่าเมื่อการเพิ่มช่วงของความเค้นกระทำจะทำให้ค่าสตีเฟนของชิ้นส่วนนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด 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 ปัญหาการถดถอยของกำลังเนื่องมาจากความล้า นอกจากนี้สะพานในทวีปยุโรปส่วนใหญ่จะมีอายุมากกว่า 100 ปี ซึ่งหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี ค.ศ. 1960-1975 ได้มีการสร้างสะพานขึ้นใหม่เพื่อรองรับต่อสภาพจราจรที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันการซ่อมบำรุงสะพานที่ยังมีสภาพการใช้งานได้ก็ทำได้ยากลำบากไปซึ่งจากการสำรวจพบว่าร้อยละ 50 ของสะพานทั้งหมดต้องการการซ่อมบำรุง [1]

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

วิธีการหนึ่งในการซ่อมโครงสร้างสะพานเหล็กได้แก่การใช้วัสดุคอมโพสิต (ในที่นี้จะกล่าวถึงคาร์บอนไฟเบอร์) ไปติดบริเวณที่มีความเสียหาย โดยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์จะมีความสามารถในการเพิ่มอายุการใช้งาน (fatigue lifetime) ของโครงสร้างได้ [3-5] นอกจากนี้ถ้าทำการอัดแรงเข้าไปในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก่อนที่จะทำการติดเข้าไปในโครงสร้างก็จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการลดขนาดของรอยแตกในเหล็ก เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นส่วนเหล็กที่มีรอยแตก เป็นต้น [6-7] อย่างไรก็ตามถ้าสะพานที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์แล้วถูกเปิดใช้งานไปนานๆ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก็อาจจะเริ่มมีการหลุดออกจากชิ้นส่วนของสะพานโดยเฉพาะในบริเวณที่มีความเข้มข้น

ของความเค้นสูงๆ (stress concentration zone) ซึ่งการหลุดล่อนออกของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก็อาจจะขยายตัวจนกระทั่งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นหลุดออกจากชิ้นส่วนโครงสร้างเลย [8-10] ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนของเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์จึงเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาในเบื้องต้นเพื่อหาวิธีหลีกเลี่ยงปัญหาของการหลุดล่อนดังกล่าว โดยวิธีการศึกษาโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธีคือ การทดลองในห้องปฏิบัติการ และการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการศึกษาลักษณะนั้นมุ่งเน้นไปที่การทดลองซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายสูงทำให้การศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จึงมีจุดเด่นขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่จะทำการศึกษานั้นควรจะต้องมีการสอบเทียบความถูกต้องก่อน

สืบเนื่องมาจากปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้นบทความนี้จึงนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงดึงแล้วทำการประมาณค่าอายุการใช้งาน (fatigue lifetime) ของชิ้นส่วนดังกล่าว ซึ่งความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองจะตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

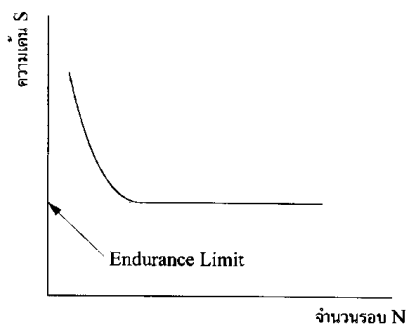
2.1 ความล้า (fatigue)

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่ากำลังประลัย (ultimate strength) มากระทำกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้าขึ้น ความล้าที่เกิดขึ้นในวัสดุนี้เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนของโครงสร้างต่าง ๆ เพราะตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนของสะพาน ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นเข้มข้น (stress concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้จะโต

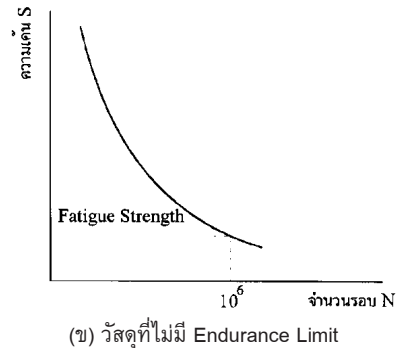
ขึ้นเรื่อย ๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่ากำลังประลัย วัสดุก็จะแตกหักจากกัน [11]

ความเค้นที่กระทำซ้ำไปซ้ำมา (โดยปกติจะใช้ที่ค่า 10^6 - 10^8 รอบ) ความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้น ๆ เรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้วไม่ว่าจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า ขีดจำกัดความทนทานกำลังความล้า (endurance limit) [11]

การทดสอบความล้ามีอยู่หลายวิธี แต่โดยหลักการจะเหมือนกันคือ จะให้แรงกระทำเป็นรอบกับชิ้นทดสอบ โดยให้เกิดความเค้นค่าต่าง ๆ แล้วบันทึกจำนวนรอบที่วัสดุจะทนได้ไว้จากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบที่กระทำ (S-N Curve) ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเกือบทั้งหมด และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด จะมี ขีดจำกัดความทนทานกำลังความล้า ดังรูป 1(ก) ส่วนพวกพอลิเมอร์และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กหลายชนิดจะไม่มี ขีดจำกัดความทนทานกำลังความล้า ดังรูป 1(ข) สำหรับโลหะที่มีขีดจำกัดความทนทานกำลังความล้า ค่าขีดจำกัดความล้าจะมีความสัมพันธ์กับกำลังประลัย กล่าวคือ พวกเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปแล้ว จะมีค่าขีดจำกัดความทนทานกำลังความล้าที่ครึ่งหนึ่งของกำลังประลัย ส่วนโลหะผสมทองแดงจะอยู่ประมาณร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 50 ของกำลังประลัย สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องรับแรงสลับ ก็คงต้องคำนึงถึงเรื่องของความล้าด้วย และพยายามออกแบบให้รับความเค้นต่ำกว่าขีดจำกัดความทนทานกำลังความล้า หรือกำลังความล้า ตามแต่กรณี [11]



(ก) วัสดุที่มี Endurance Limit



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบที่กระทำ [11]

2.2 คุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)

วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ประกอบขึ้นจากเส้นใยที่ถูกจัดอย่างเป็นระเบียบในองค์ประกอบพอลิเมอร์ทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถรับแรงดึงในแนวของเส้นใยได้ดีตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยและมีความสามารถต้านทานต่อความล้าได้อย่างดีเยี่ยม ความหนาแน่นต่ำ เส้นใยเรียงตัวตามแนวยาวของแผ่นเพื่อรับความเค้นที่เกิดขึ้น [12] ดังนั้นแผ่นจึงมีโครงสร้างการเรียงตัวของเส้นใยไปในทิศทางทางเดียว ทำให้มีกำลังรับแรงดึงและแรงเฉือนทิศทางขวางการเรียงตัวของเส้นใยต่ำ พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงตามแนวยาวขึ้นอยู่กับประเภทของเส้นใยและปริมาณความหนาแน่นของเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามวัสดุชนิดนี้จะไม่มีความสามารถในการครากข้อดีของวัสดุชนิดนี้คือมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง และมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง 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 ³)	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 3,000	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) ระบายของแผ่นเหล็กยังคงเป็นระนาบอยู่ นั่นคือข้อสมมติฐานของ Euler-Ber-noulli
- 3) การกระจายความเค้นเฉือนนั้นจะสม่ำเสมอ นั่นคือชั้นกาวบางมาก
- 4) ไม่สนใจการเสียรูปของแผ่น CFRP เนื่องจากแรงเฉือน
- 5) ไม่สนใจการเสียรูปเนื่องจากการโก่งตัวของชั้นกาว 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 โมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนหลัก

A คือ พื้นที่หน้าตัด

t คือ ความหนา

b คือ ความกว้าง

G คือ ค่า shear modulus

จากสมการ (1) ค่าความเค้นตามแนวแกนของแผ่น CFRP, σ_F และ ความเค้นเฉือนของส่วนที่ติดกาว, τ_A หาได้จาก [15]

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

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้นตามแนวแกน

τ คือ ความเค้นเฉือน

ค่าความเค้นตั้งฉากในชั้นกาวจะหาได้จากการหาความแตกต่างของการแ่นตัวในแนวตั้งตลอดหน้าตัดของรอยต่อและในส่วนนี้จะคำนึงถึงผลของการแ่นตัวของชิ้นส่วนด้วย 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

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

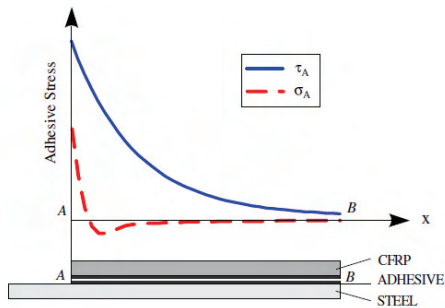
$$\beta^4 = \frac{a_2}{4a_1} \quad (4)$$

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

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

เมื่อ C คือ แรงอัดลัพท์
 β คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยอันดับสอง

ลักษณะการกระจายของความเค้นเฉือนและความเค้นดึงจาก ในชั้นรอยเชื่อมของกาวยึดประสานกับแผ่นเสริม CFRP จะมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นเฉือนและความเค้นดึงจากตามแนว AB [15]

จากรูปที่ 2 ความเค้นเฉือน และความเค้นดึงจากสูงสุดจะเกิดที่ตำแหน่ง $x = 0$ 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 ซึ่งหัวข้อทดสอบคือแรงดึงที่ก่อให้เกิดความล้าแต่ละค่าที่ใช้ในที่นี้จะใช้สำหรับแผ่นประกอบ 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 (กาวย) (MPa)

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

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

R คือ $\frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ (%)

n คือ จำนวนรอบของรอบน้ำหนักบรรทุก

α, β คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกาวย

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

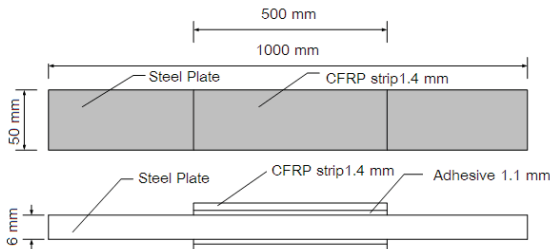
$$N_f = \left[1 + \frac{1}{\alpha(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

ในลำดับต่อมาหาค่า α, β 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

ข้อมูลของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วยแผ่น 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 เนื่องการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ และมีคุณสมบัติแบบไร้เชิงเส้นของกาวมาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นแบบจำลองในการศึกษานี้จะทำการศึกษาแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4

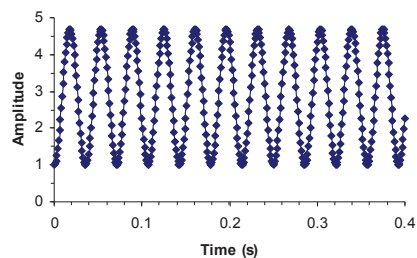
รูปที่ 4 แบบจำลองของชิ้นส่วนหลัก

โดยชนิดของอิลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชนิดของอิลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองของชิ้นส่วนหลัก

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

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

ตารางที่ 4 ความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุดของแต่ละช่วงความเค้นที่ศึกษา

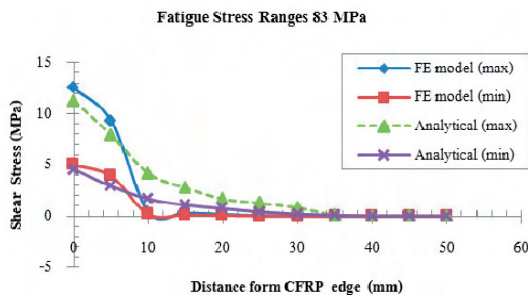
ชิ้นส่วนทดสอบ	แรงในแนวแกน (ต่ำสุด; สูงสุด [kN])	ความเค้นดึง (ต่ำสุด; สูงสุด) [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	อัตราส่วนความเค้นดึง
CE1	(17; 42)	(57; 140)	83	0.4
CE2	(20; 50)	(67; 167)	100	0.4
CE3	(24; 60)	(80; 200)	120	0.4
CE4	(32; 80)	(107; 267)	160	0.4

4. ผลการศึกษา

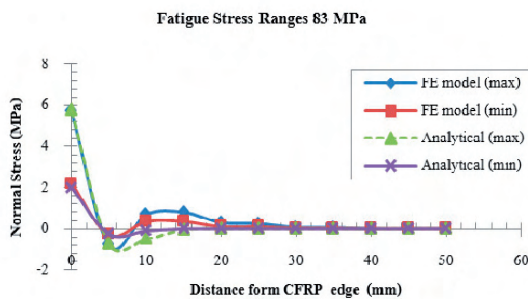
4.1 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.1.1 ลักษณะการกระจายของความเค้นบริเวณชั้นกาว

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

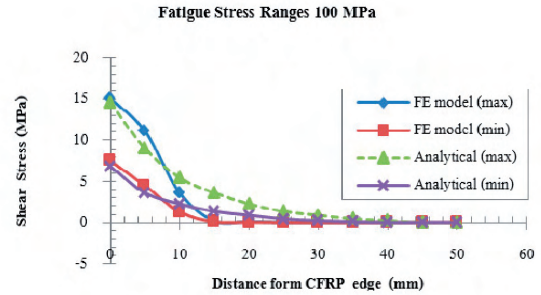


ก) ความเค้นเฉือน

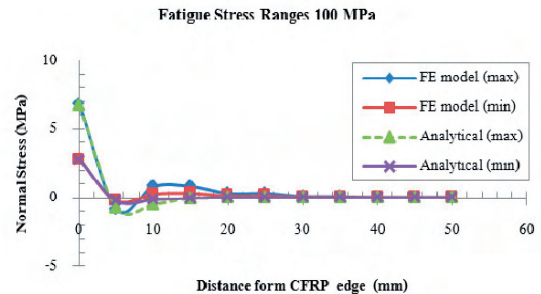


ข) ความเค้นดัดงอ

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

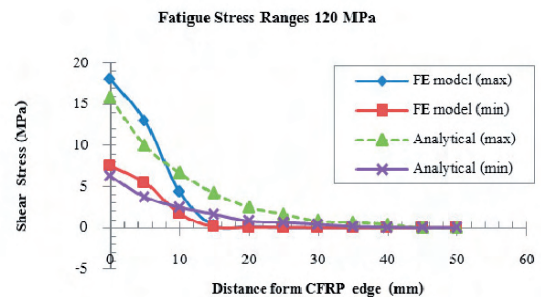


ก) ความเค้นเฉือน

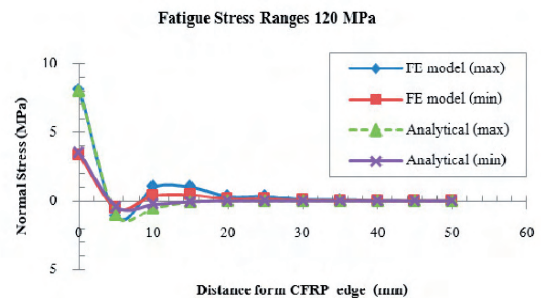


ข) ความเค้นดัดงอ

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

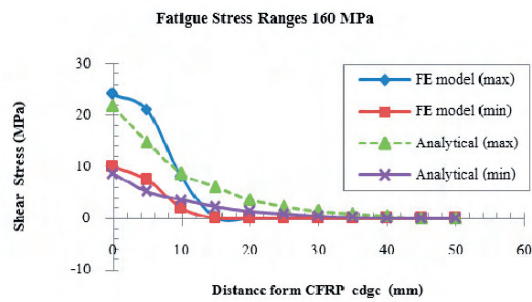


ก) ความเค้นเฉือน

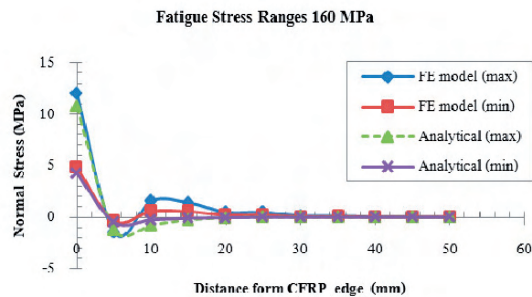


ข) ความเค้นดัดงอ

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



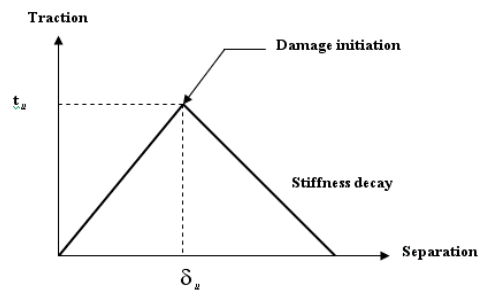
ก) ความเค้นเฉือน



ข) ความเค้นดึง

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

จากรูปที่ 6 ถึง 9 พบว่าค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์กับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งในกรณีของความเค้นเฉือนและความเค้นดึง ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่าความเสียหายของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนั้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามก็จะสังเกตเห็นลักษณะการลดลงของความเค้นที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงเร็วกว่าแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ในแบบจำลองของ Bocciarelli *et al.* ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยืดหยุ่น แต่ในแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ได้จำลองพฤติกรรมของการยึดเกาะระหว่างผิววัสดุ (interface) ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้นอีลิเมนต์จะมีค่าความเสียหายภายในอีลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 Linear element traction separation behavior ของ cohesive element

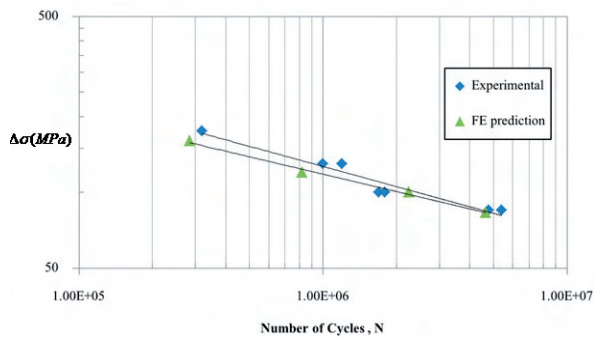
4.1.2 การทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

สืบเนื่องจากการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ไปจนกระทั่งวัสดุนั้นวิบัตินั้นเป็นไปได้ยากมาก 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 ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จำนวน 36 แบบจำลอง โดยการให้สัญลักษณ์ CT1.2/GT1.0 แทนกรณีศึกษาที่ความหนาของแผ่น CFRP 1.2 mm และความหนากาว 1.0 mm เป็นต้น

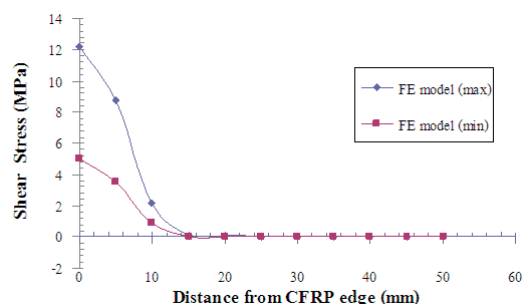
ตารางที่ 6 กรณีศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

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

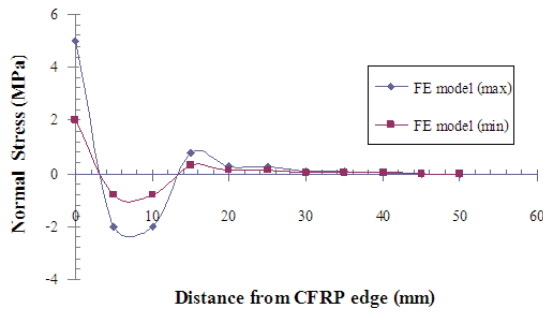
4.2.1 ผลของความหนาของชั้นกาวต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

- การกระจายของความเค้น

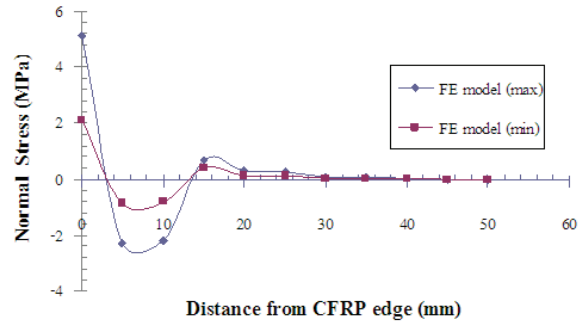
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของความเค้นบริเวณกาวของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่มีความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนากาวเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0 CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2) ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa ดังรูปที่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



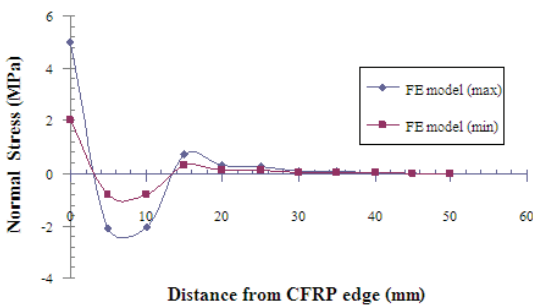
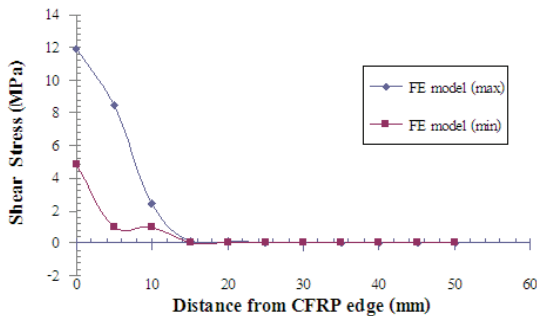
ก) แบบจำลอง CT1.2/GT1.0



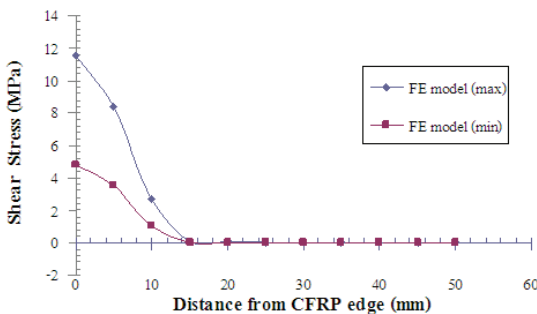
ก) แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 (ต่อ)



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 ส่วนค่าความเค้นดัดงอต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มลดลงตามความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่าความเค้นดัดงอที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่าความเค้นดัดงอนั้นจะไม่ได้ขึ้นกับการเปลี่ยนความหนาของกาว อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือค่าความเค้นเฉือน ดังนั้นการที่ค่าความเค้นเฉือนลดลงจะมีผลดีคือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ยาวนานขึ้น ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

● อายุการใช้งาน

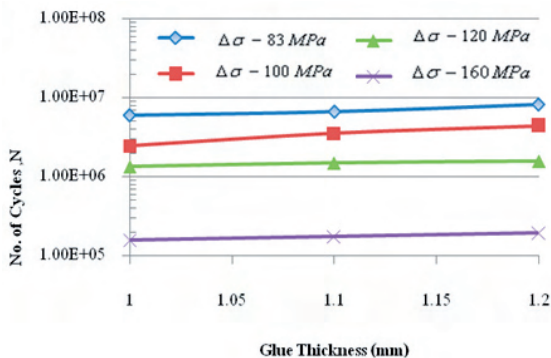
จากค่าความเค้นเฉือนที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้โดยการใช้สมการ (9) ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนาของกาวเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 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 จะพบว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจาก 1.0 mm ไปเป็น 1.2 mm สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ร้อยละ 33 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นกาวลดลงส่งผลให้การวิบัติซึ่งปกติจะเริ่มจากชั้นกาวนั้นเกิดช้าลง อายุการใช้งานจึงเพิ่มขึ้น ในส่วนของกรณีศึกษาอื่นๆสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 13



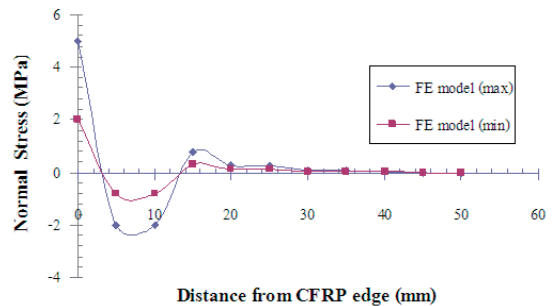
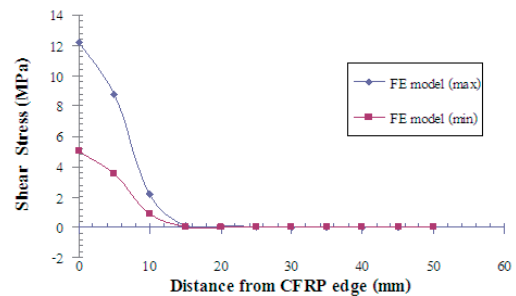
รูปที่ 13 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งาน เมื่อมีการเพิ่มช่วงของความเค้น (ความหนา CFRP คงที่=1.2 mm)

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงของความเค้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้

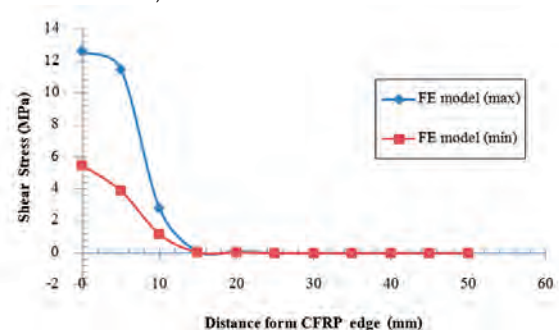
4.2.2 ผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP

● การกระจายของความเค้น

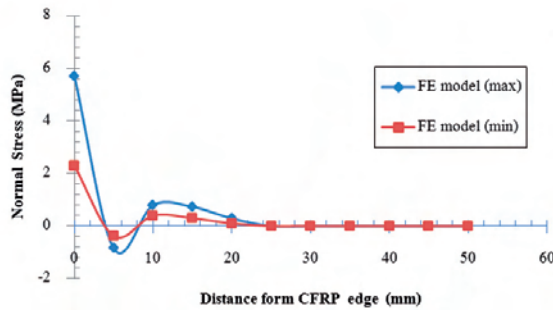
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของความเค้นบริเวณกาวของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของกาวคงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2, 1.4 และ 1.6 mm (แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงความเค้นขนาด 83 MPa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



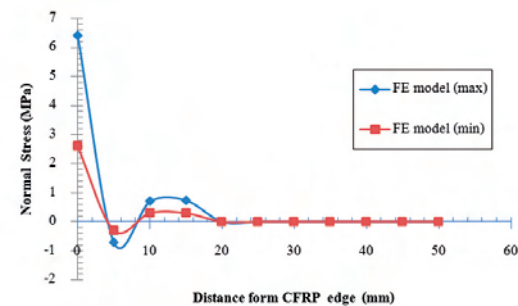
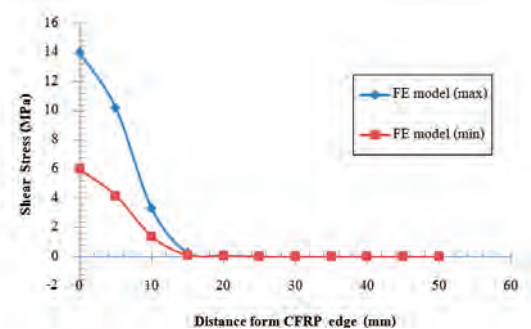
ก) แบบจำลอง CT1.2/GT1.0



ข) แบบจำลอง CT1.4/GT1.0



ข) แบบจำลอง CT1.4/GT1.0 (ต่อ)



ค) แบบจำลอง CT1.6/GT1.0

รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนและความเค้นดึงจาก ในกรณีที่ความหนาของกาวคงที่ 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 ในส่วนของค่าความเค้นดึงจากที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่าความเค้นดึงจากนั้นจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความเค้นเฉือน อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือ ค่าความเค้นเฉือน ดังนั้นการที่ค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลเสียคือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง

• อายุการใช้งาน

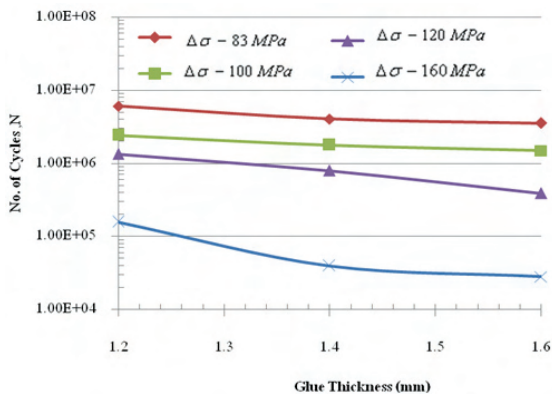
จากค่าความเค้นเฉือนที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้โดยการใช้สมการ (9) ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของกาวคงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2 1.4 และ 1.6 mm (แบบจำลอง CT1.2/GT1.0 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 จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนหลักที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลงสูงสุดร้อยละ 41.51 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP โดยคงความหนาของชั้นกาวไว้นั้น จะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นกาวสูงขึ้นส่งผลให้การวิบัติซึ่งปกติจะเริ่มจากชั้น

กาวนั้นเกิดเร็วขึ้น อายุการใช้งานจึงลดลง ในส่วนของกรณีศึกษาอื่นๆสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของความเค้น (ความหนาของแผ่น = 1.0 mm)

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าลดลงในทุกช่วงของความเค้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียว นั้น จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง

5. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ พบว่าค่าความเค้นเฉือนและความเค้นดัดฉากของชิ้นกาวจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่า การหลุดลอกของแผ่น 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 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชิ้นกาวจะช่วยลดค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นกาว อันจะส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

ในส่วนผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP พบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จะทำให้ค่าความเค้นเฉือน สูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชิ้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปยังแผ่น 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 บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น 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 2nd 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.