สารบัญ

	หน้า
หน้าสรุปโครงการ	**ก**
บทคัดย่อ	**ช**
Abstract	**ซ**
สารบัญตาราง	**ฎ**
สารบัญภาพ	**ฐ**
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของโครงการ	4
1.4 แนวทางการศึกษา	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา	6
2.2 สะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก	7
2.3 ความล้า (Fatigue)	9
2.4 วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)	11
2.5 ความรู้พื้นฐานของพลศาสตร์โครงสร้าง (Fundamental of Structural Dynamics)	18
2.6 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต	20
2.7 วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method)	21
2.8 วิธีการไฟไนท์อิลิเมนท์ (Finite Element Method)	28
2.9 การจำลองการเคลื่อนที่ของแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว	30
2.10 มาตรฐานในงานโครงสร้างสะพานคอมโพสิต	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 คุณสมบัติของสะพานคอมโพสิตที่ทำการศึกษา 39

3.2 น้ำหนักรถบรรทุก และการใส่น้ำหนักรถบรรทุกในโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ 44

3.3 กรณีศึกษาของสะพานคอมโพสิต 46

3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS 47

3.5 ลำดับขั้นตอนการศึกษา 54

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง 57

4.2 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP 57

4.3 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP 65

4.4 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP 72

4.5 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และเสริมกำลังด้วย CFRP 78

4.6 ผลการวิเคราะห์ความล้าของสะพานคอมโพสิต 90

บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย 115

เอกสารอ้างอิง **119**

ภาคผนวก

ก การออกแบบสะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก วางบนคานเหล็ก ตามมาตรฐาน AASHTO **122**

ข การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้า ตามมาตรฐาน AASHTO **138**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของวัสดุเสริมพิเศษ CFRP	17
2.2	จำนวนรอบที่นับจากวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก	28
2.3	ค่าสัดส่วนการกระแทกเพิ่มเติม (Impact Factor, IM)	33
2.4	ค่า Fraction of truck traffic in a single-lane, p	33
2.5	ค่าคงที่ A และ Constant fatigue threshold	36
2.6	ค่า Number of stress range cycles per truck passage	37
3.1	กรณีศึกษาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้	39
3.2	คุณสมบัติของคอนกรีต และเหล็ก	43
3.3	คุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย และกาว	44
3.4	Element type ของแต่ละ Part	49
4.1	ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต จากสมการ และแบบจำลอง	57
4.2	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกลักษณะต่าง ๆ	64
4.3	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)	71
4.4	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร	77
4.5	ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร	87
4.6	ค่าช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง	102
4.7	ค่าคลาดเคลื่อนของช่วงของหน่วยแรง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP	103
4.8	ค่าคงที่ A และ ค่า Constant-amplitude fatigue threshold $(\Delta F)_{TH}$	105
4.9	ค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles per truck passage, n)	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	อายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เมื่อพิจารณาจากตัวแปรที่ได้จากแบบจำลอง	106
4.11	ค่าคลาดเคลื่อนของอายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพานเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP	107
4.12	จำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน (Number of cycle)	112
4.13	ค่าคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP	113
ก.1	โมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	128
ก.2	แรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานสะพานช่วงเดียว	132
ก.3	แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเชิงประกอบบริเวณหน้าตัดที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด	137
ก.4	แสดงหน่วยแรงร่วมที่ขอบบนของแผ่นพื้นมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้	137
ข.1	การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิตสำหรับการพิจารณาความล้า ตามมาตรฐาน AASHTO	139

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	12
2.6	การรับแรงดึง (Tension) ของ CFRP	12
2.7	การรับแรงกดอัด (Compression) ของ CFRP	13
2.8	การรับแรงเฉือน (Shear) ของ CFRP	13
2.9	การรับแรงดัด (Flexure) ของ CFRP	13
2.10	การเสริมความแข็งแรงโดยใช้ วัสดุ CFRP แบบกระดาษ (CFRP laminate)	15
2.11	วัสดุ CFRP แบบแผ่นหนา	16
2.12	วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ	16
2.13	วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ นำมารวมเป็นแผ่นพื้น	17
2.14	กราฟหน่วยแรงและความเครียด (Stress-Strain diagram) ของโพลิเมอร์-เสริมเส้นใย ประเภทต่าง ๆ ภายใต้แรงดึง	17
2.15	แบบจำลองระบบโครงสร้างที่มีระดับความเสรีขั้นเดียว	19
2.16	กราฟรอบค่าความเครียดกับเวลา และค่าหน่วยแรงกับความเครียด	21
2.17	กราฟค่าหน่วยแรงแบบสุ่ม	22
2.18	กราฟค่าหน่วยแรงที่ตกลงจากจุดสูงสุด	22
2.19	กราฟการตกจากจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง	23
2.20	กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุด	23
2.21	กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง	24
2.22	กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง	25
2.23	ขั้นตอนการนับด้วยวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก	27
2.24	รูปร่างการแทนด้วยอิลิเมนท์(Elements)	29
2.25	คานที่มีแรงแบบเคลื่อนที่ P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V	30
2.26	แรงที่เกิดขึ้นใน Element	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.27	รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20	32
2.28	รูปแบบข้อกำหนดของสะพานคอมโพสิตแบบต่าง ๆ	34
3.1	ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต	40
3.2	ระยะการแบ่งเลน และความยาวของช่วงสะพาน (หน่วย เมตร)	41
3.3	รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)	41
3.4	ระยะห่างของคานเหล็ก (หน่วย มิลลิเมตร)	42
3.5	รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20	44
3.6	กราฟน้ำหนักของรถบรรทุกที่กระทำกับแบบจำลอง	45
3.7	กรณีศึกษาของน้ำหนักรถบรรทุก	45
3.8	ขั้นตอนในการศึกษาแบบจำลอง	46
3.9	รูปแบบของส่วนโปรแกรมในการสร้างแบบจำลอง (Create Model Method)	48
3.10	คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	48
3.11	ส่วนต่าง ๆ ของ Parts ในแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต	50
3.12	การใส่คุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลอง	52
3.13	แบบจำลองที่นำแต่ละ Parts มารวมกันใน Assembly	52
3.14	ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS	54
3.15	แบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่ศึกษา	54
4.1	ค่าหน่วยแรง จากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร	58
4.2	ค่าการแอ่นตัว จากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร	59
4.3	ค่าหน่วยแรง จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)	60
4.4	ค่าการแอ่นตัว จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)	61
4.5	ค่าหน่วยแรง จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)	62
4.6	ค่าการแอ่นตัว จากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)	63
4.7	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด ภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ	65
4.8	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด ภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ	65
4.9	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.10	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	67
4.11	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	69
4.12	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	70
4.13	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP	72
4.14	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP	72
4.15	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	73
4.16	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	74
4.17	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	75
4.18	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	76
4.19	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ	78
4.20	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ	78
4.21	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	79
4.22	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	80
4.23	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	81
4.24	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	82
4.25	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.26	ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	84
4.27	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	85
4.28	ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	86
4.29	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	88
4.30	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	88
4.31	กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	89
4.32	กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	89
4.33	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	91
4.34	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	92
4.35	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	93
4.36	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	94
4.37	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	95
4.38	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.39	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	98
4.40	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate	100
4.41	กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอม-โพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	101
4.42	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	103
4.43	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	104
4.44	กราฟเปรียบเทียบช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	104
4.45	กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	108
4.46	กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	108
4.47	กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	109
4.48	กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีไม่มีรอยร้าวเริ่มต้น	110
4.49	กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีมีรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร	110
4.50	กราฟจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับอายุการใช้งาน กรณีมีรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.51	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหาย เริ่มต้น ขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง	113
4.52	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหาย เริ่มต้น ขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate	114
4.53	กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหาย เริ่มต้น ขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	114
ก.1	น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ประเภท HS20	124
ก.2	น้ำหนักแผ่เทียบเท่า (Lane Loading) สำหรับรถยนต์แบบ HS20	124
ก.3	การกำหนดรูปแบบโครงสร้าง (หน่วยเป็น เมตร)	125
ก.4	รายละเอียดเหล็กเสริมในพื้นคอนกรีต	129
ก.5	การจัดวางน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้เกิดแรงภายในสูงสุด	131
ก.6	รูปตัดของเหล็กตัว I (1200WB455 cross section.) (หน่วย มิลลิเมตร)	134