บทที่ 5
ผลการศึกษาพฤติกรรมของสะพานเหล็กที่เสริมกำลังโดยวัสดุโพลิเมอร์

5.1 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง

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

ตารางที่ 5.1 ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต จากสมการ และแบบจำลอง

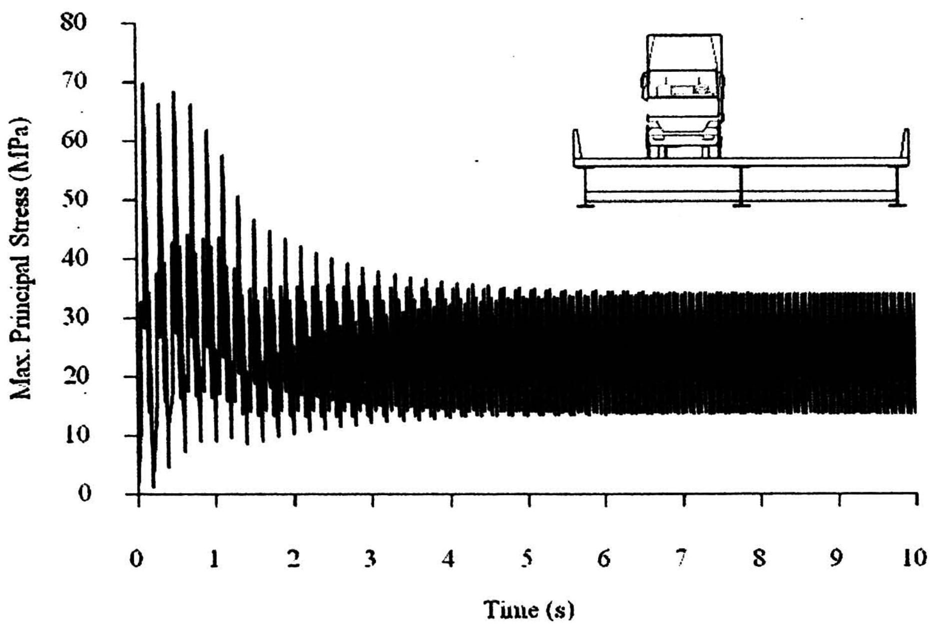
จำนวนคานเหล็ก (ตัว)	ค่าความถี่ธรรมชาติ (Hz)		คลาดเคลื่อนร้อยละ
	จากสมการที่ 2.16	จากแบบจำลอง	
3	7.894	7.794	1.27
5	9.398	9.324	0.79
3 (CFRP composite deck)	10.476	10.423	0.51
5 (CFRP composite deck)	11.106	10.921	1.67

จากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากโปรแกรม และจากการใช้สมการที่ 2.16 พบว่านั้นมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 1.7 แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

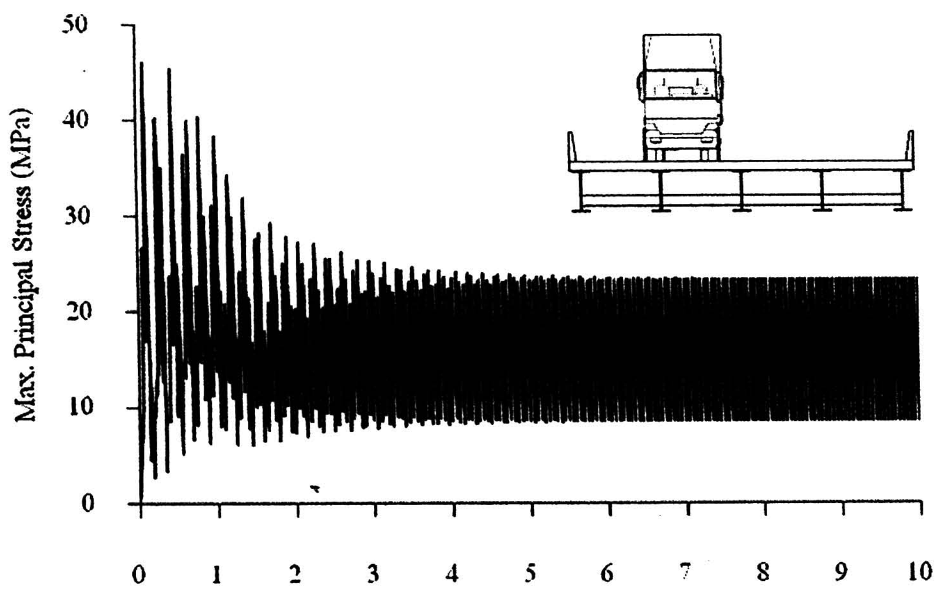
5.2 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

จากการวิเคราะห์สะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP จากแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ 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

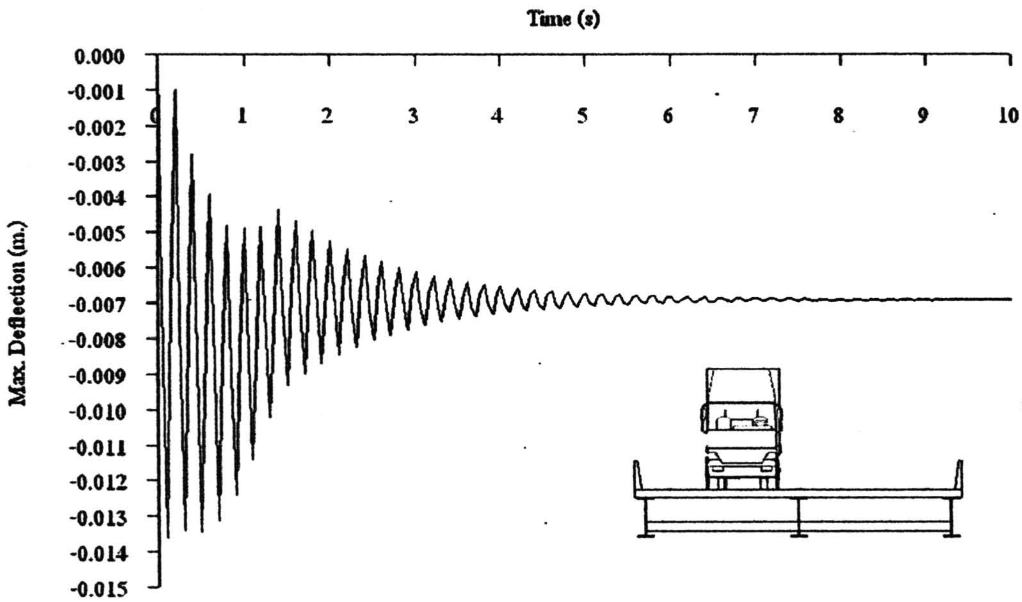


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

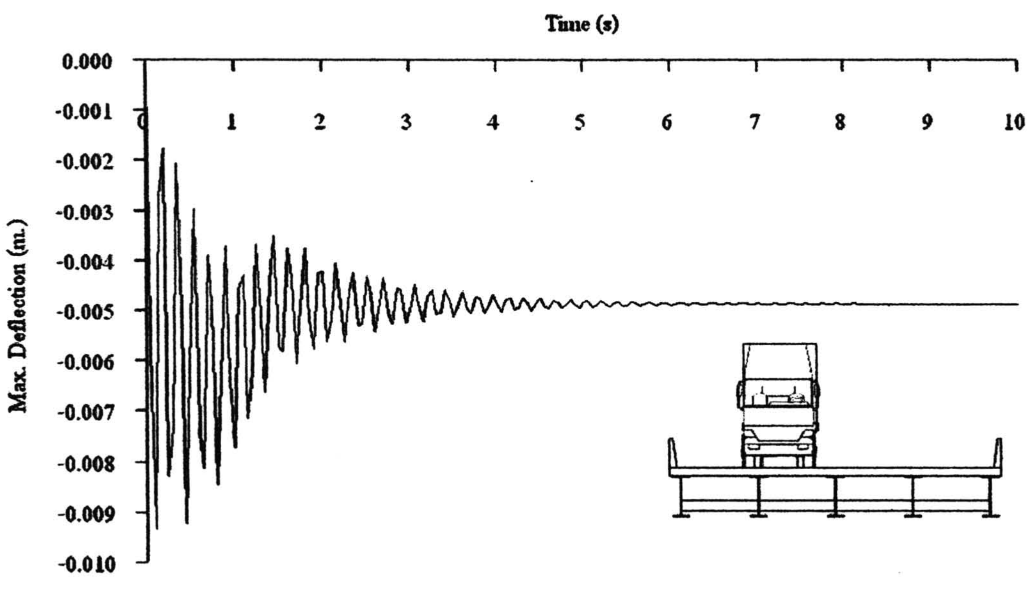


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.1 ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร



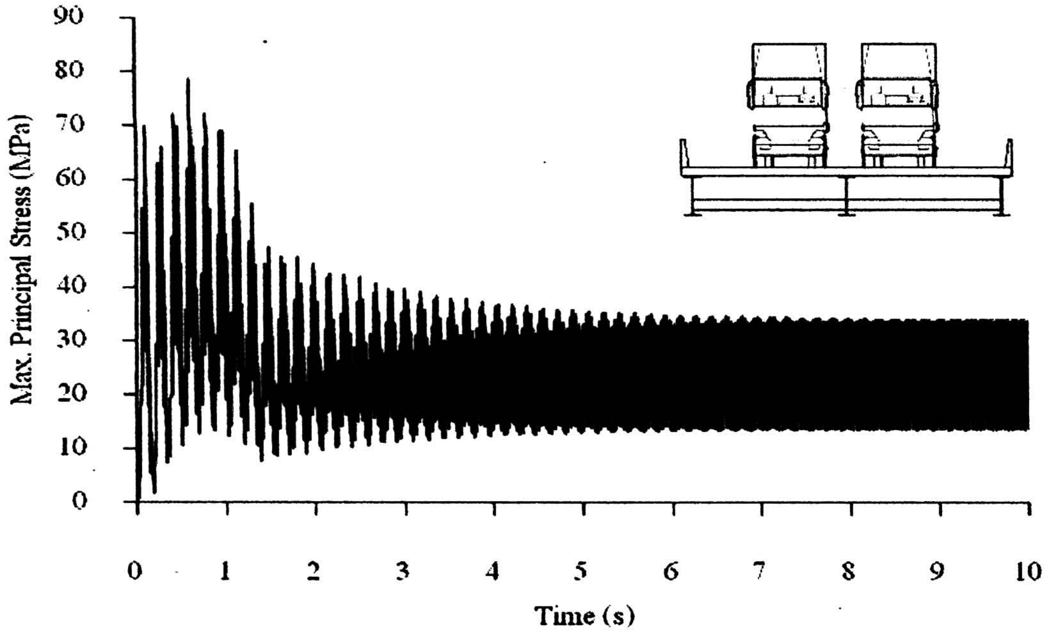
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



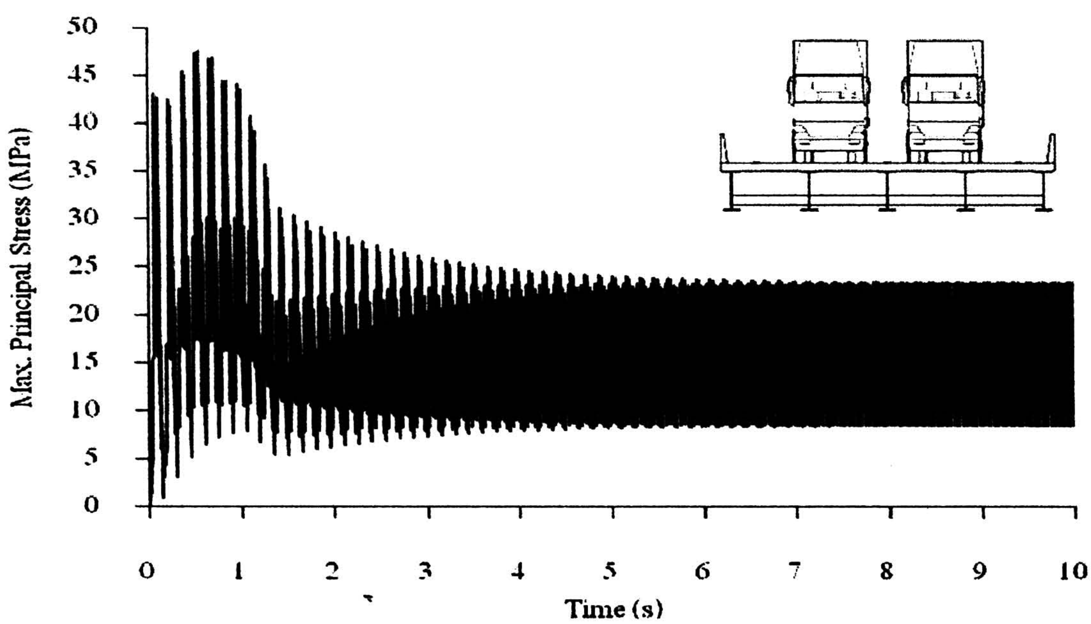
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.2 ค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองที่วิ่ง 1 ช่องจราจร

5.2.2 กรณีรถวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน) จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของกรณีที่รถวิ่งในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.3 และ 5.4 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนรถวิ่ง 2 ช่องทางจราจร (วิ่งทางเดียวกัน) ตามลำดับ

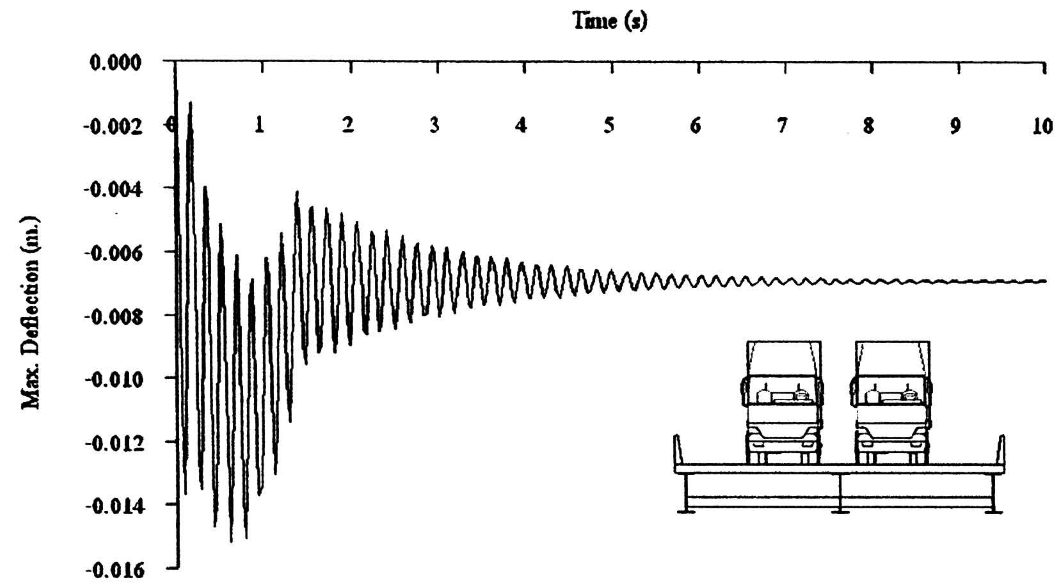


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

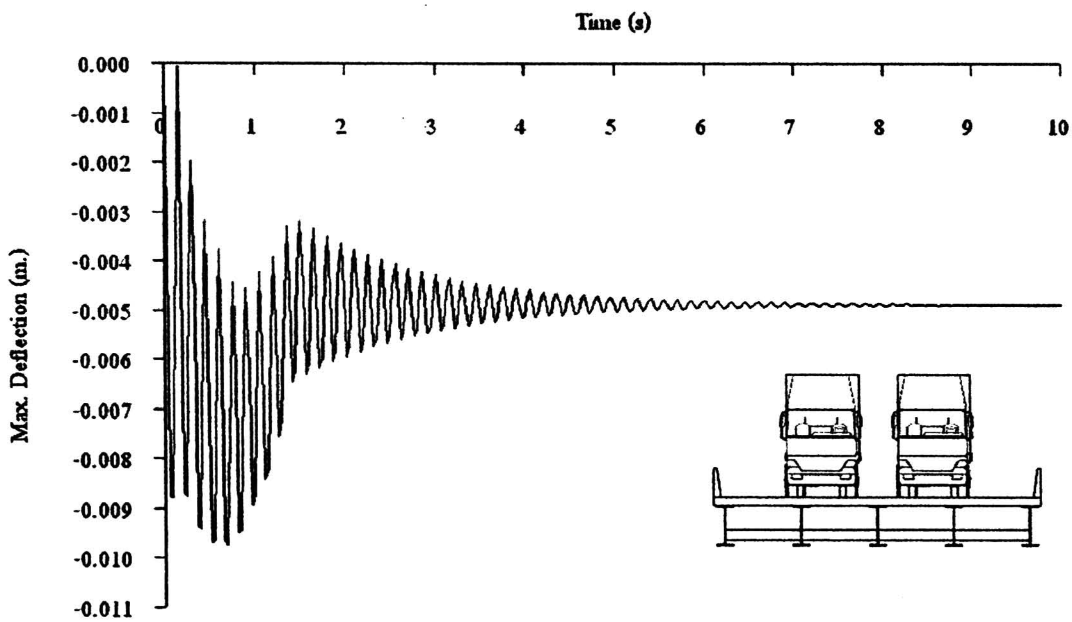


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.3 ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)



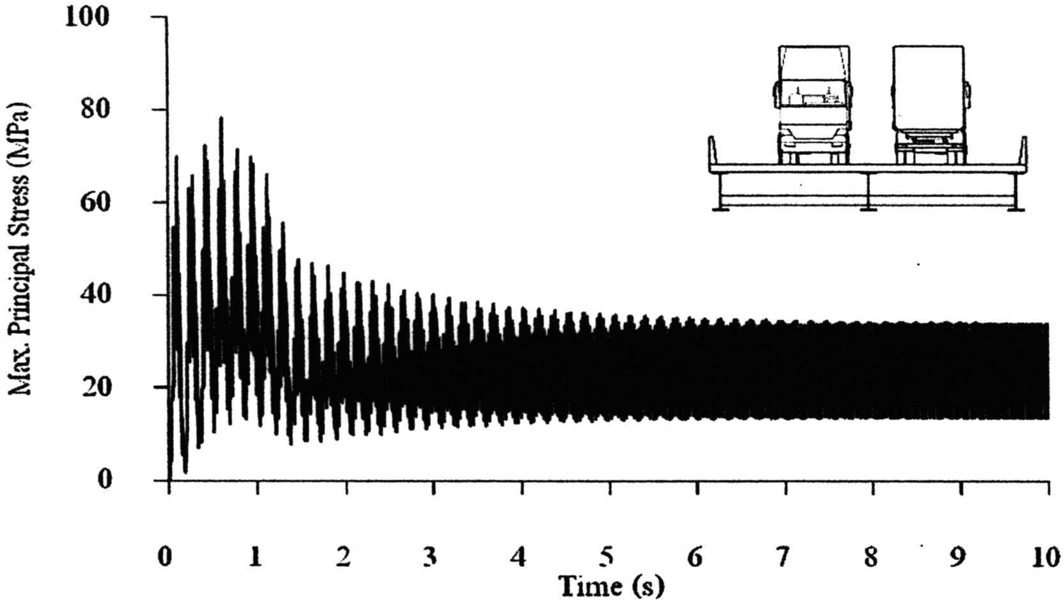
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



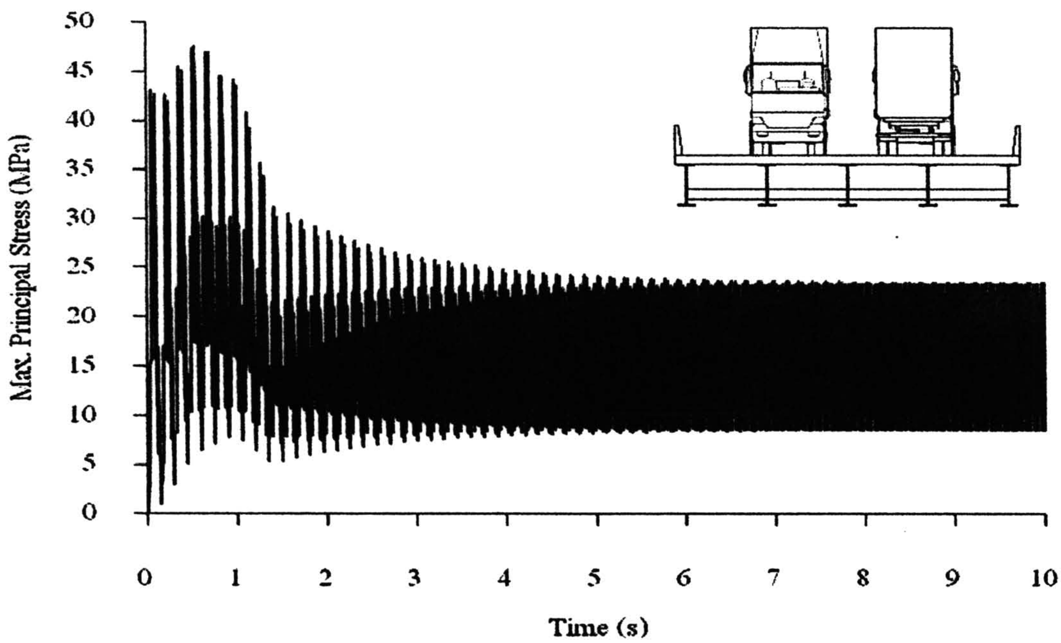
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.4 ค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งทางเดียวกัน)

5.2.3 กรณีรถวิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน) จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิต จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของกรณีที่รถวิ่งสวนทางกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.5 และ 5.6 แสดงค่าหน่วยแรง และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในสะพานคอมโพสิตที่มีจำนวนรถวิ่ง 2 ช่องทางจราจร (วิ่งสวนทางกัน) ตามลำดับ

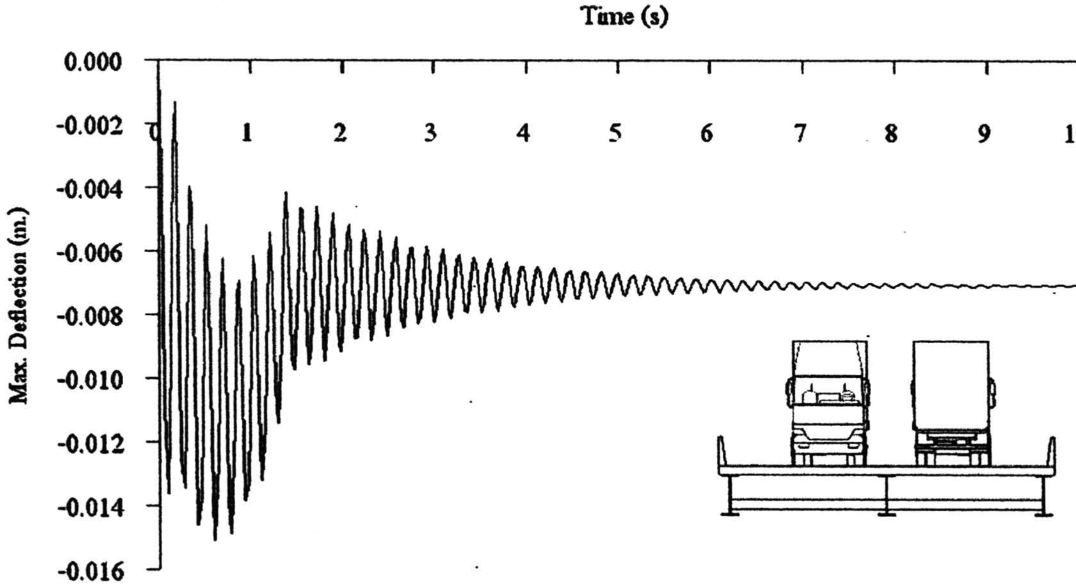


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

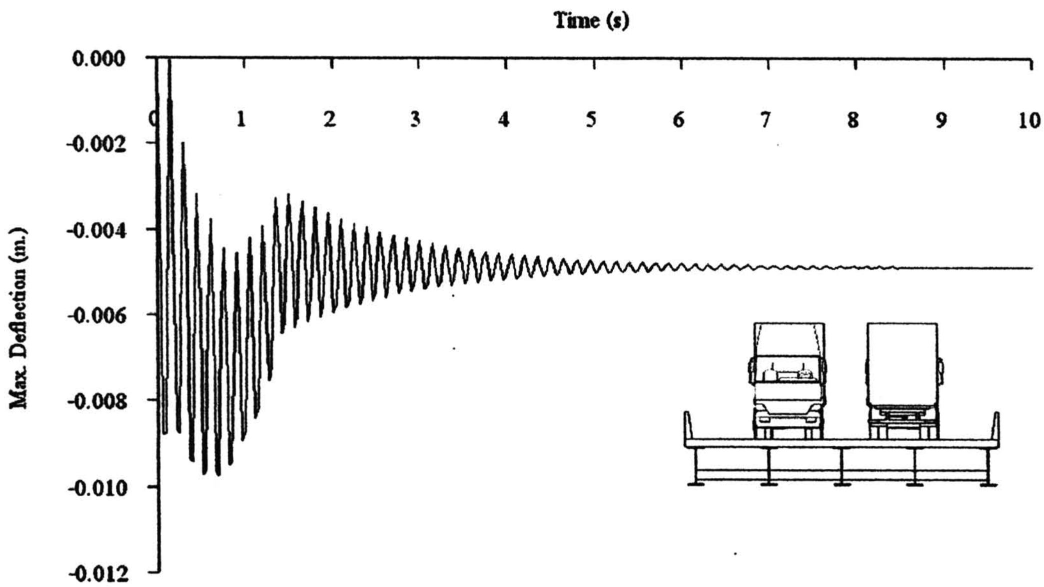


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.5 ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.6 ค่าการแอ่นตัวจากแบบจำลองที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (วิ่งสวนทางกัน)

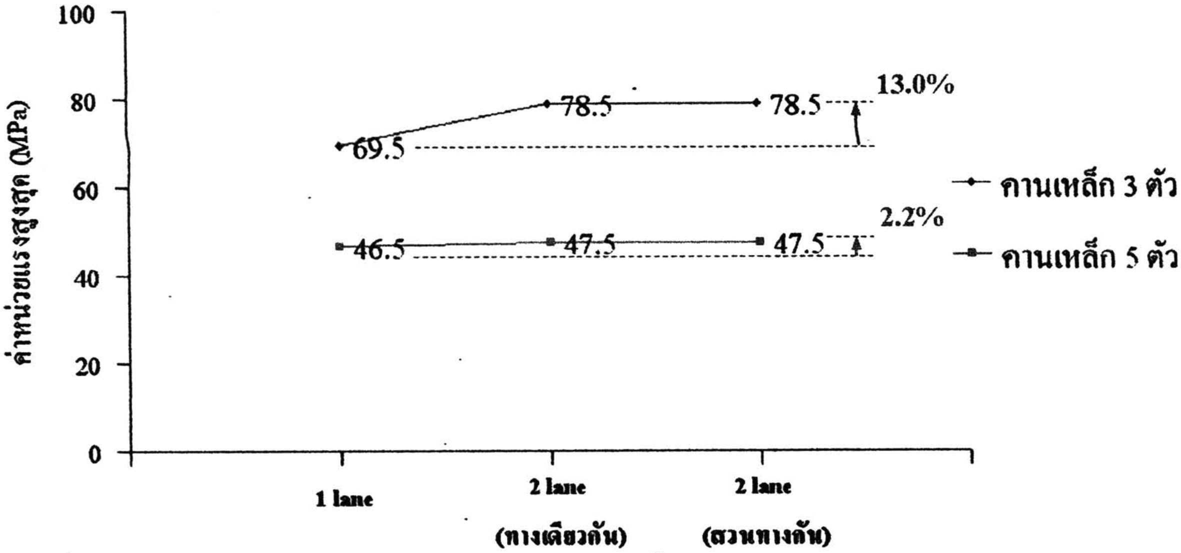
จากหัวข้อที่ 5.2.1 ถึง 5.2.3 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุก 3 รูปแบบ

ตารางที่ 5.2 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกลักษณะต่าง ๆ

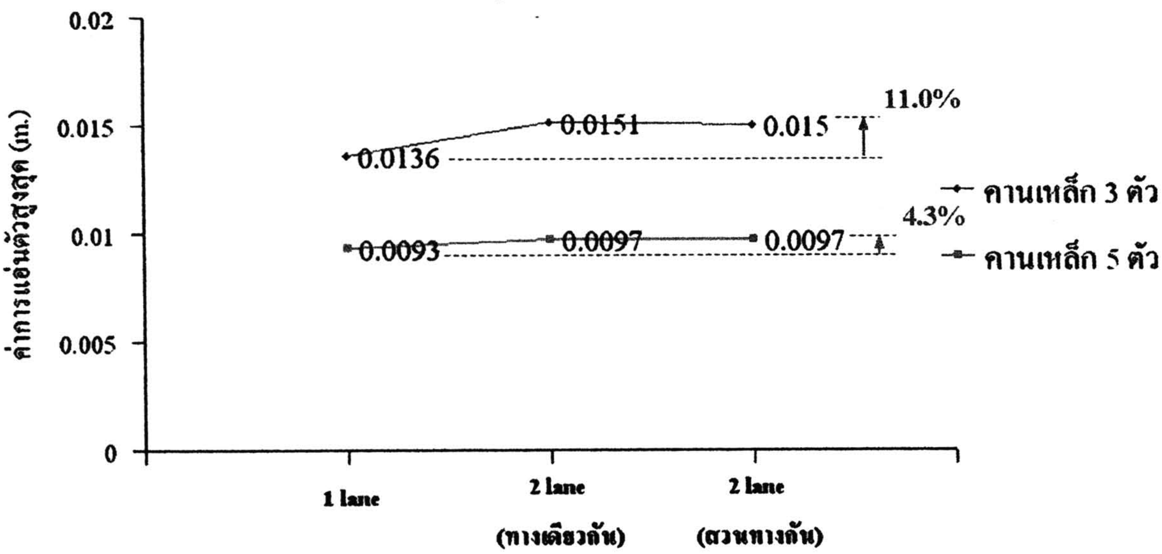
รูปแบบของสะพาน		กรณีที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	
		Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
3 Girders	1 lane	69.5	-0.0136
	2 lanes (ทางเดียวกัน)	78.5	-0.0151
	2 lanes (สวนทางกัน)	78.5	-0.015
5 Girders	1 lane	46.5	-0.0093
	2 lanes (ทางเดียวกัน)	47.5	-0.0097
	2 lanes (สวนทางกัน)	47.5	-0.0097

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์สูงสุดจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีรถวิ่ง 2 ช่องจราจร ทั้งกรณีสะพานที่มี 3 และ 5 คาน โดยในกรณีสะพานที่มี 3 คาน ค่าการแอ่นตัวและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับกรณีที่รถวิ่ง 1 ช่องจราจร ค่าการเพิ่มขึ้นนี้เกิดเนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของสะพานที่มี 5 คาน จะพบว่าค่าการแอ่นตัวและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 4 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มจำนวนคานจะทำให้ค่าสติฟเนสของสะพานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากรถวิ่ง 2 ช่องจราจรจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ภาพที่ 5.7 และ 5.8 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับทิศทางการวิ่งของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งกรณีที่มีรถบรรทุกวิ่ง 2 ช่องจราจร จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์สูงที่สุด



ภาพที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ



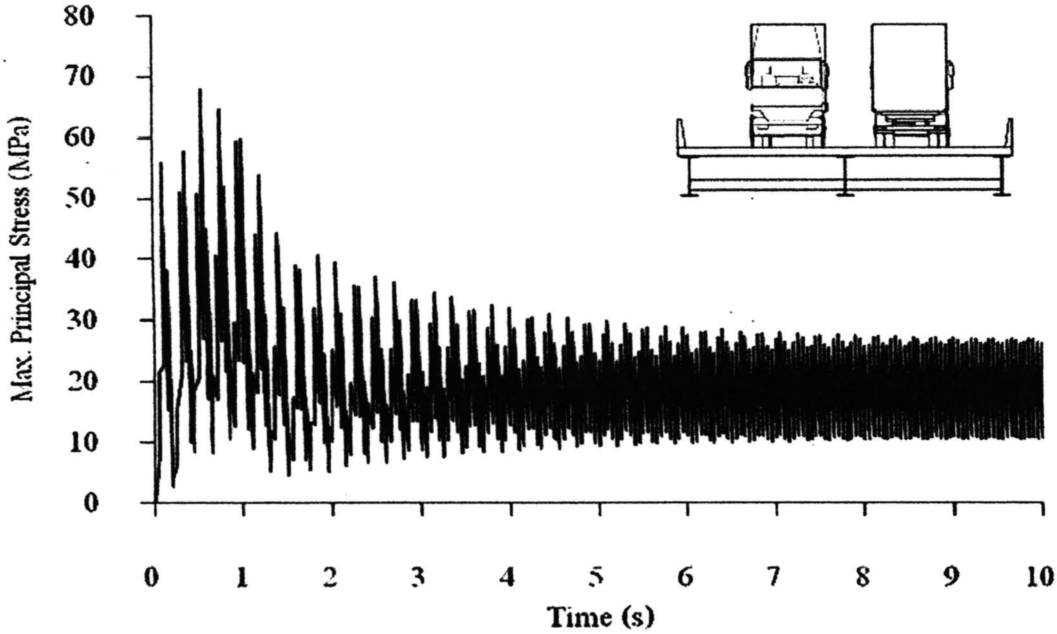
ภาพที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ

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 ที่ทำหน้าที่รับแรงดึง และการใช้แผ่นพื้นคอมโพสิต (CFRP Composite deck) แทนที่แผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งผล

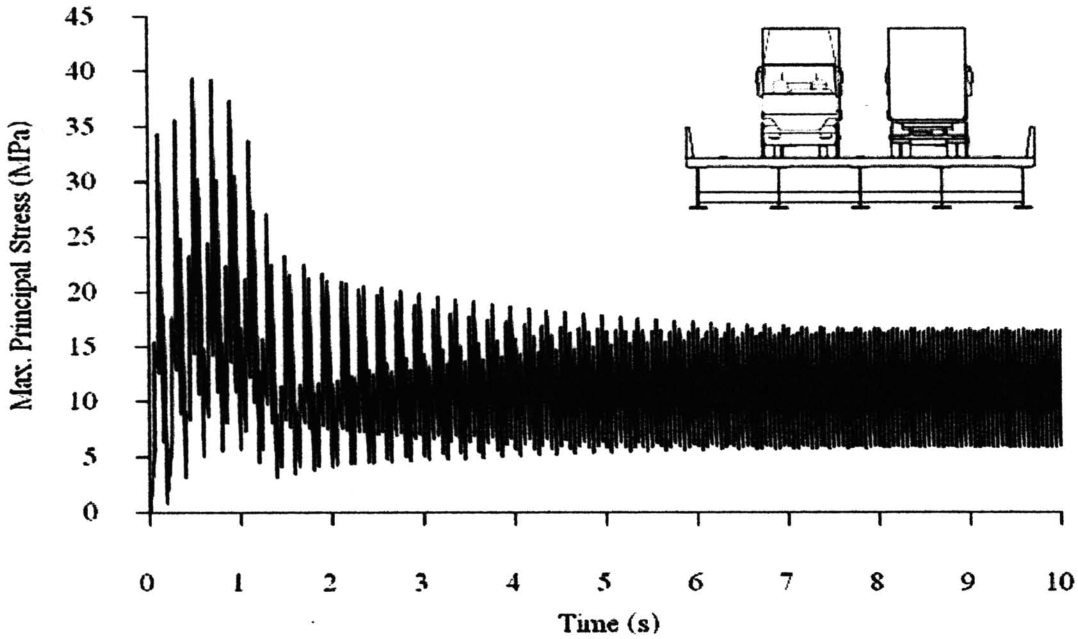
ที่ได้จากการวิเคราะห์สะพานคอมโพสิตที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP จากแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนท์ จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ในรูปของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานเหล็ก และค่าการแอ่นตัวสูงสุด

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



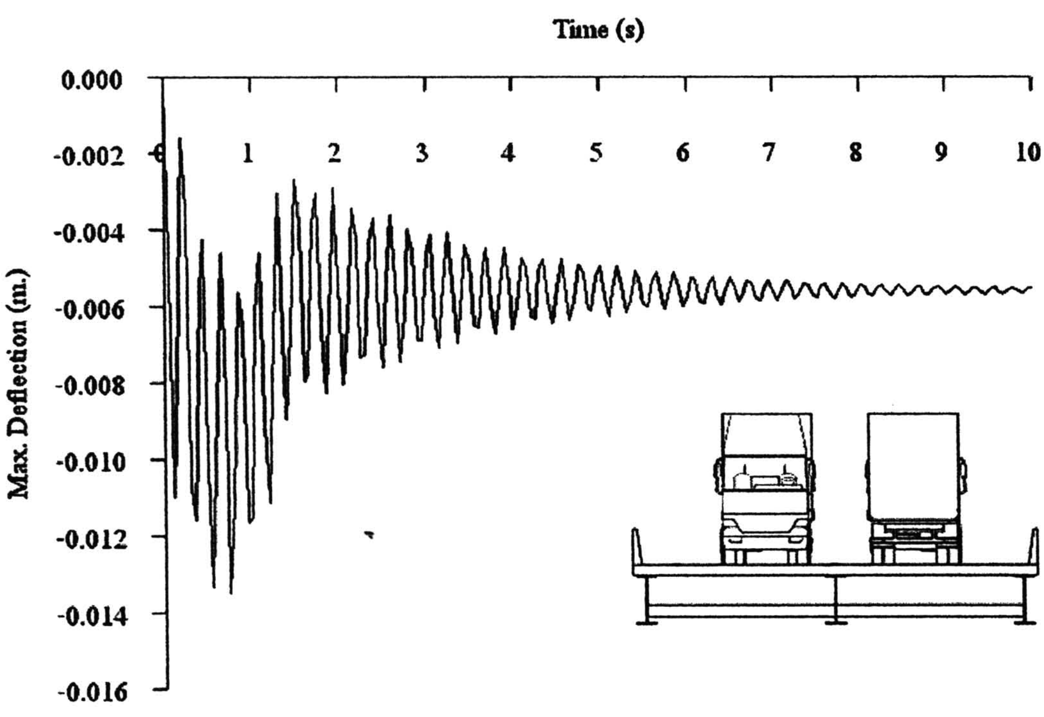
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

ภาพที่ 5.9 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



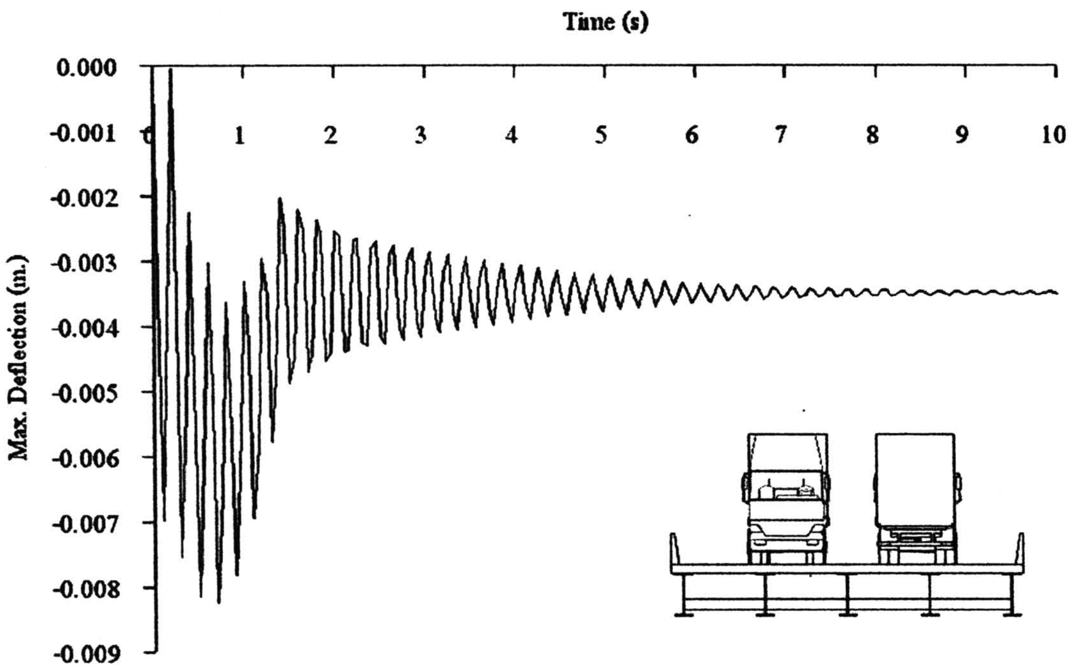
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.9 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate (ต่อ)



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

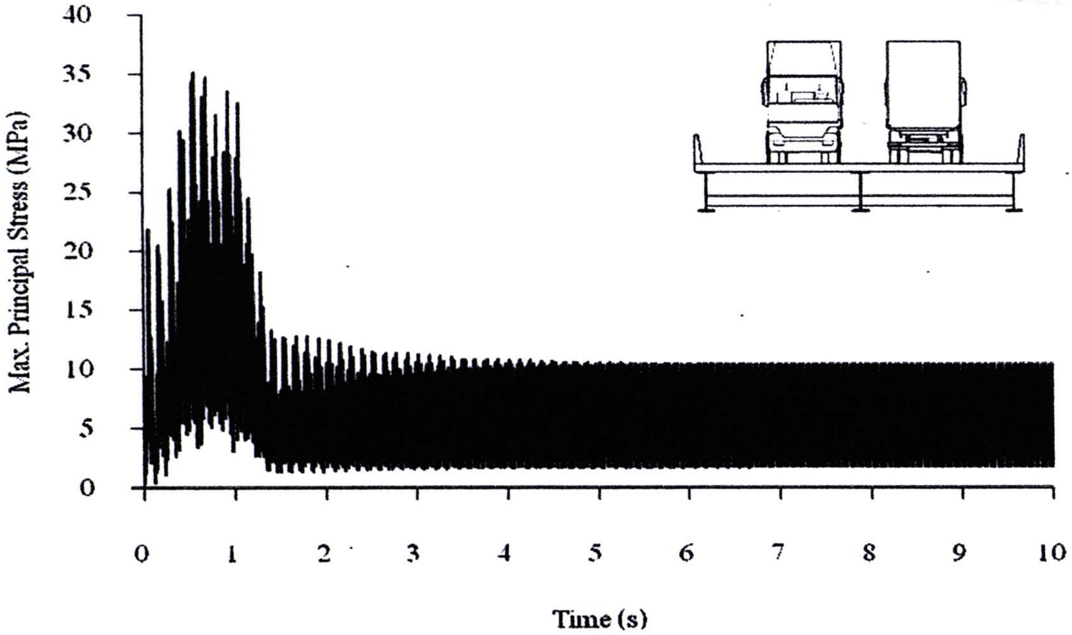
ภาพที่ 5.10 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



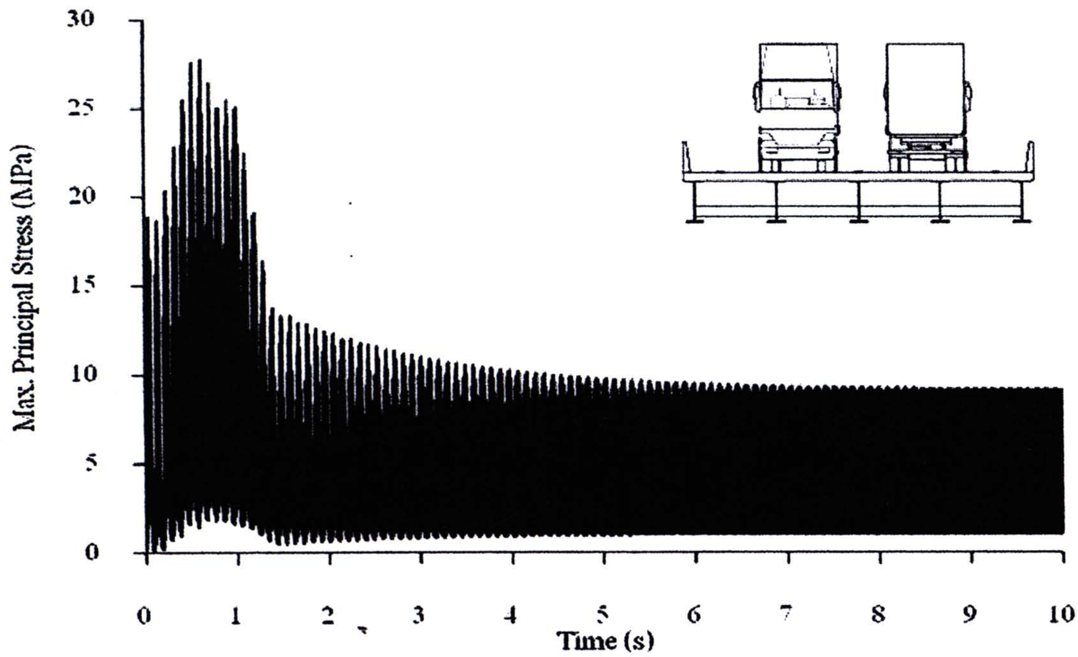
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

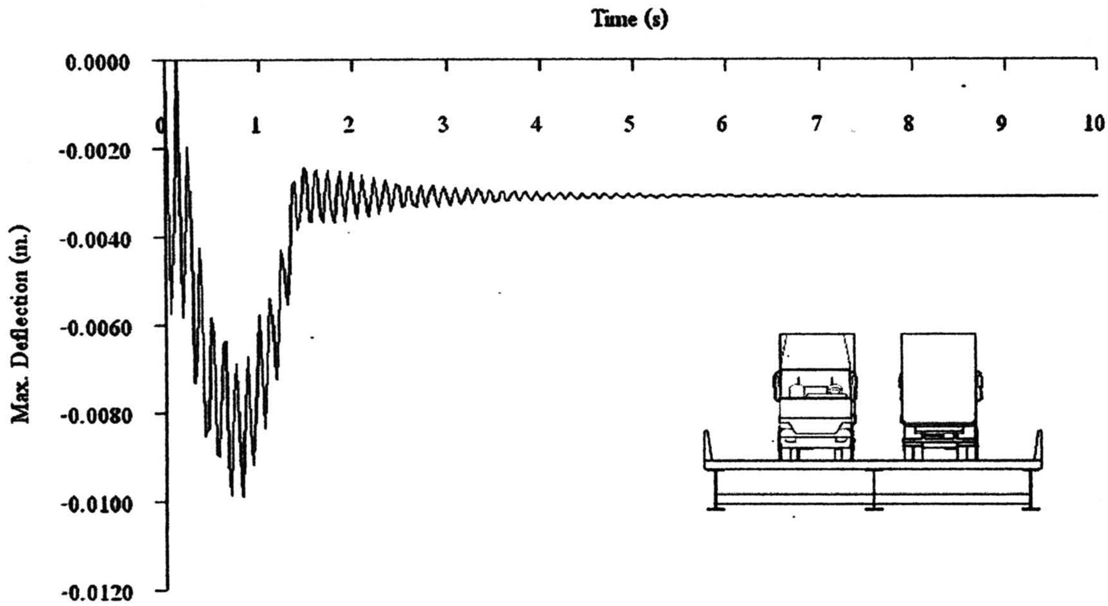


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

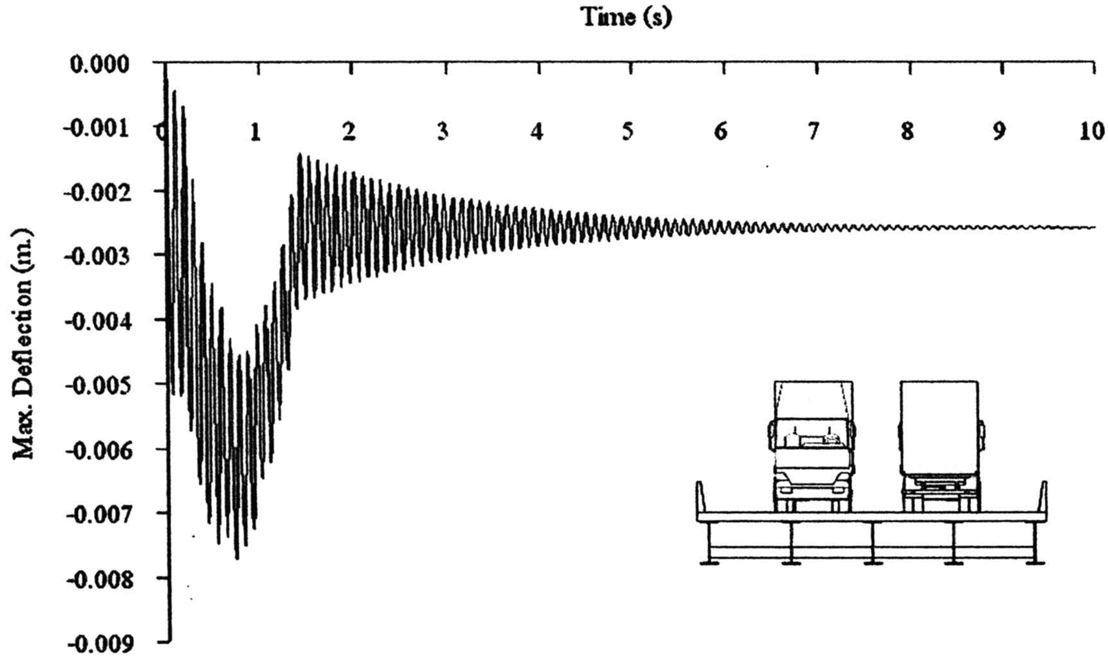


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

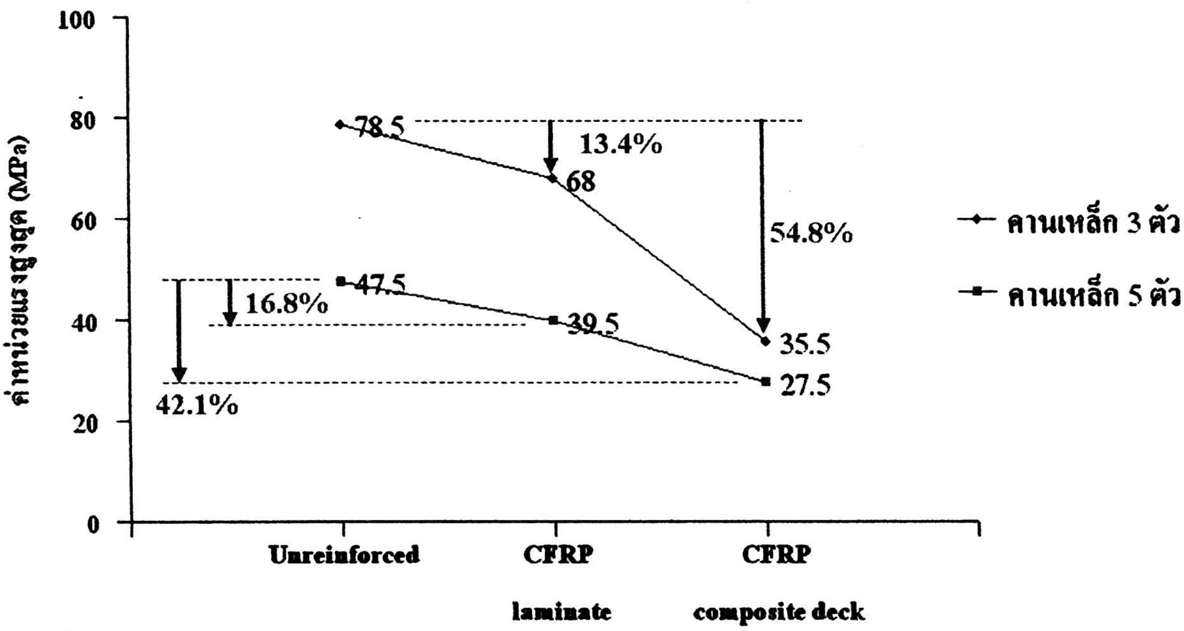
เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน) เพราะเป็นกรณีที่ให้ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ที่สูงที่สุด

ตารางที่ 5.3 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

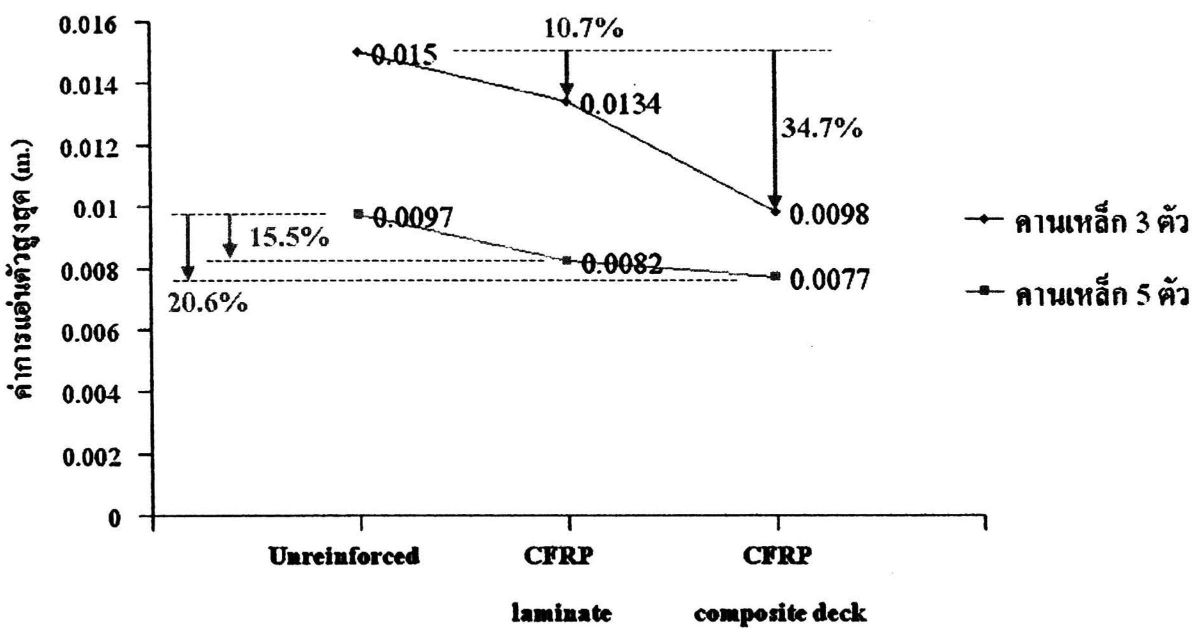
รูปแบบของสะพาน	กรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate		กรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	
	Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)	Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
3 Girders 2 lanes	68.0	-0.0134	35.5	-0.0098
5 Girders 2 lanes	39.5	-0.0082	27.5	-0.0077

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

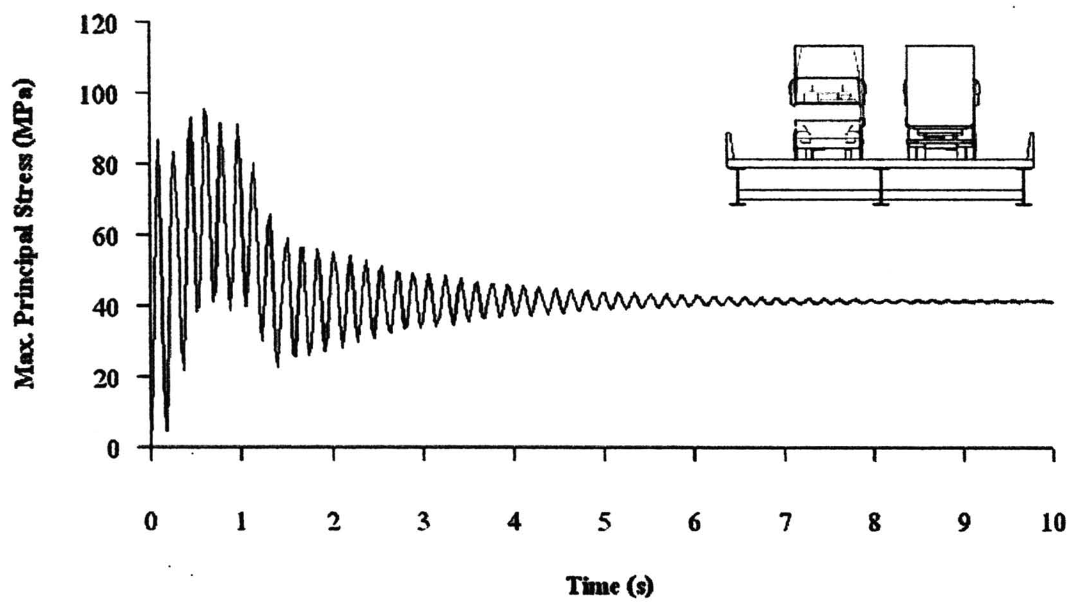


ภาพที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับการเสริมกำลังด้วย CFRP

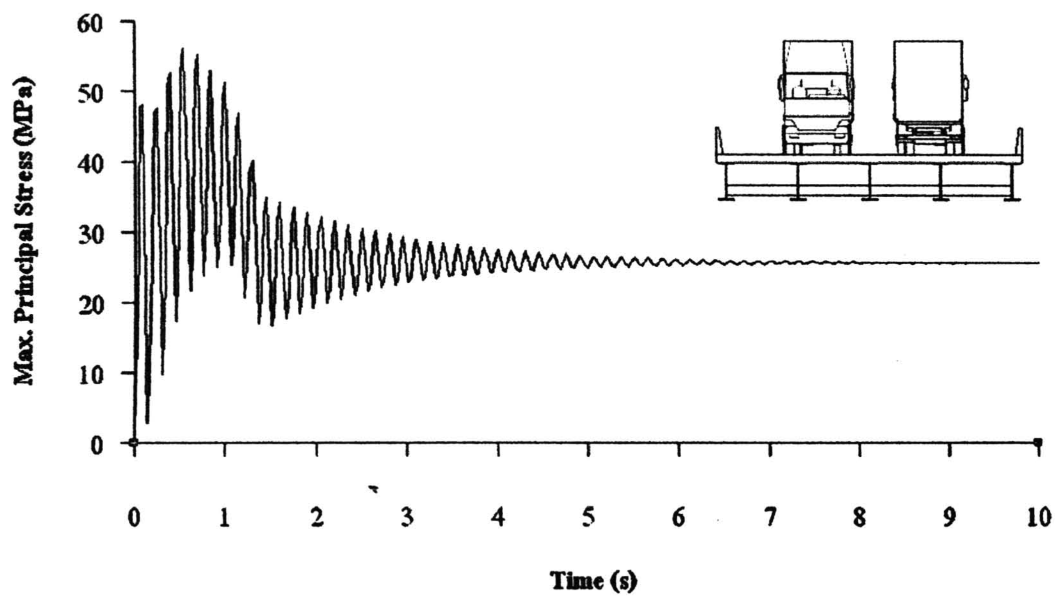
5.4 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

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

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

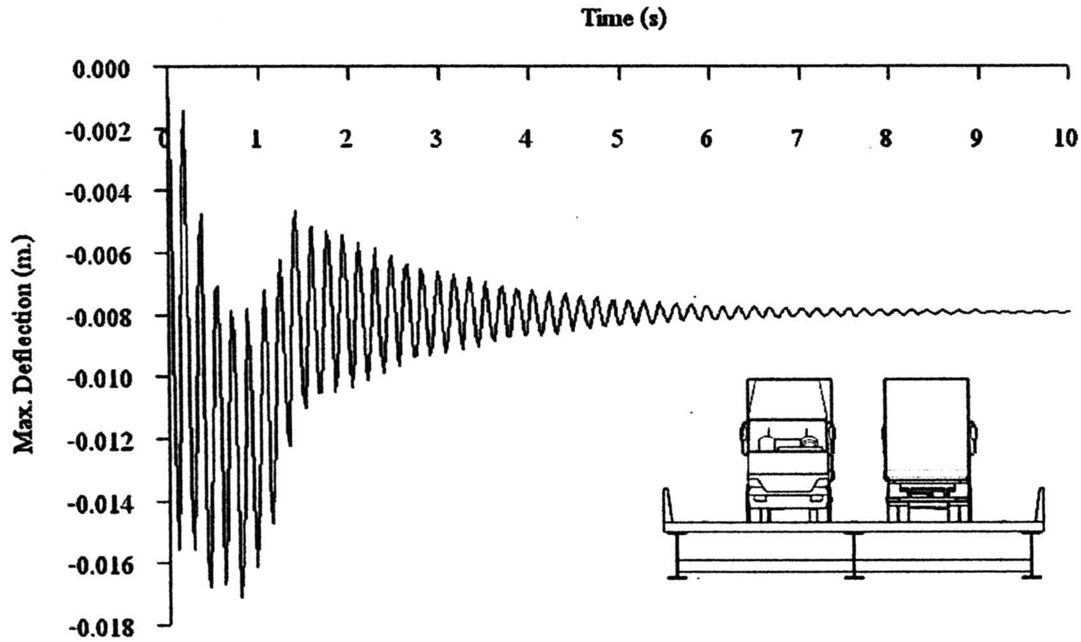


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

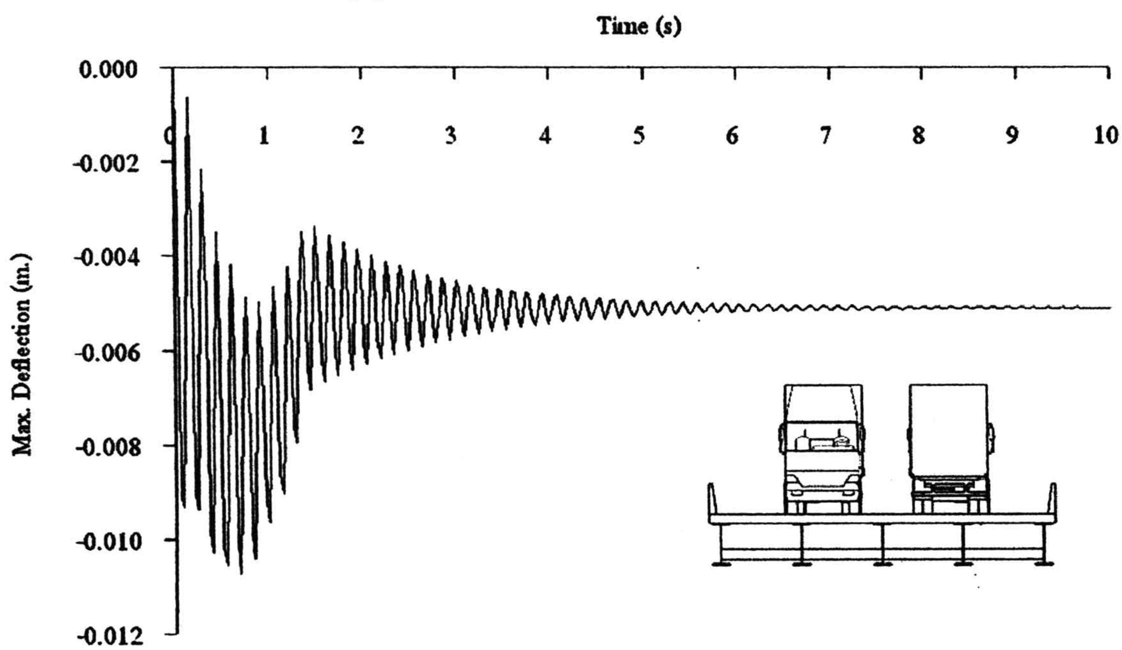


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.15 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP



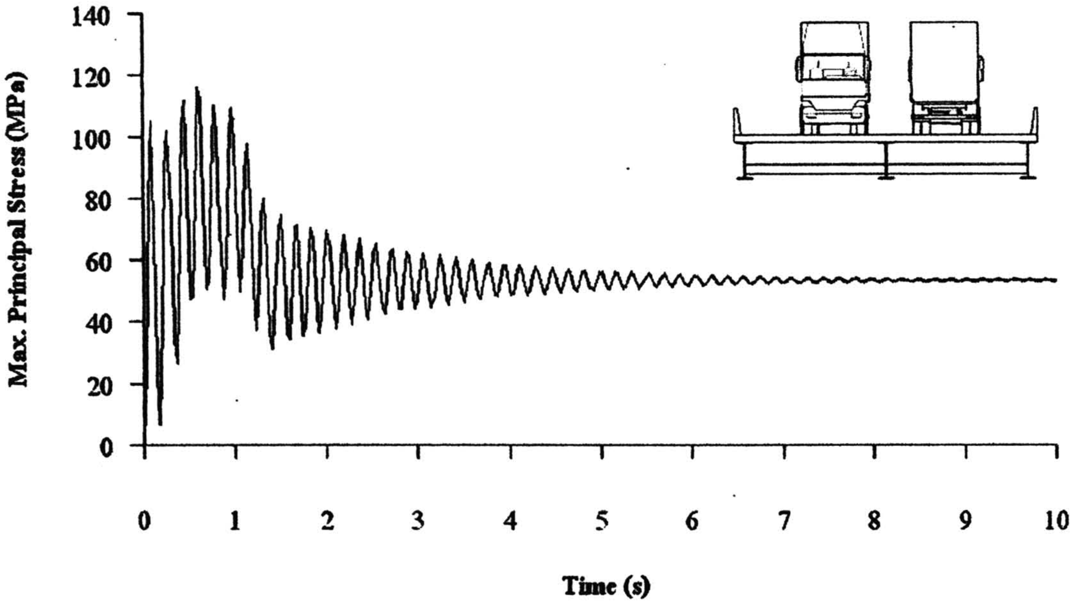
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



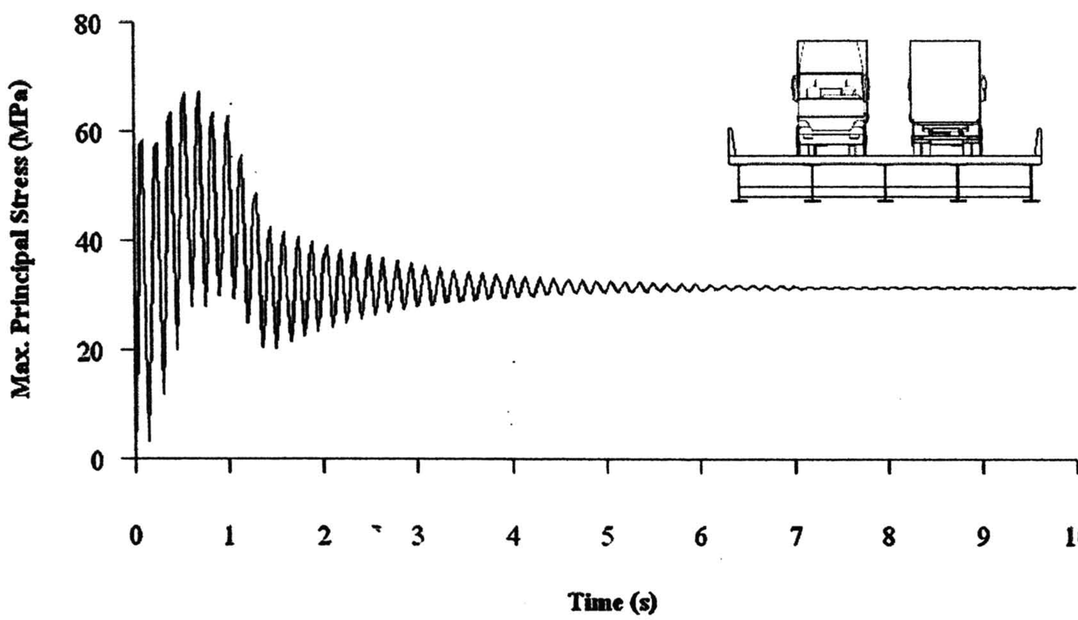
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

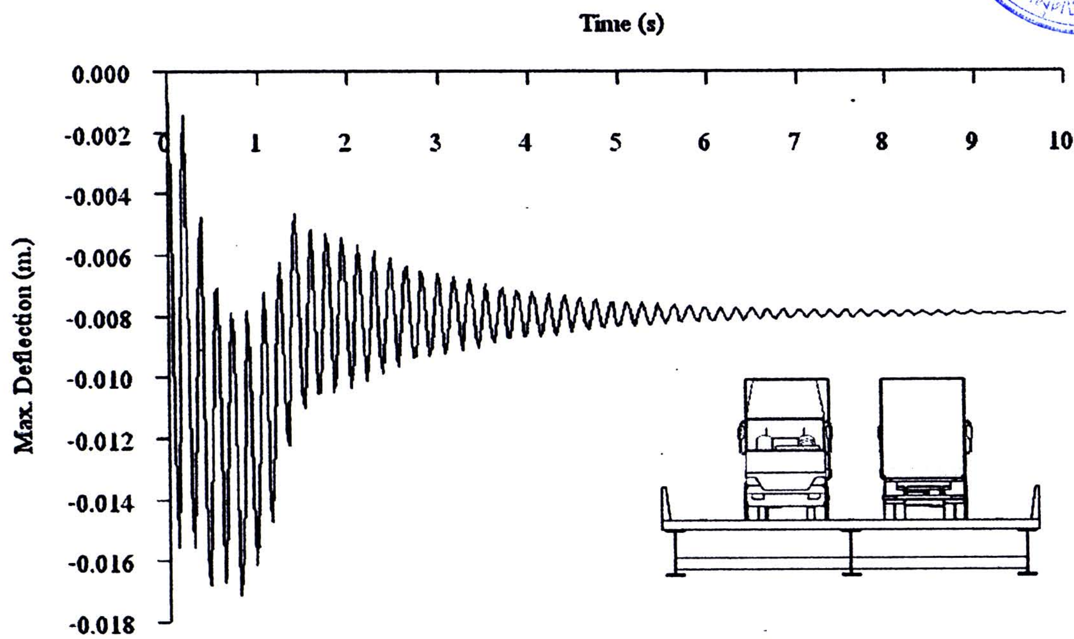


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

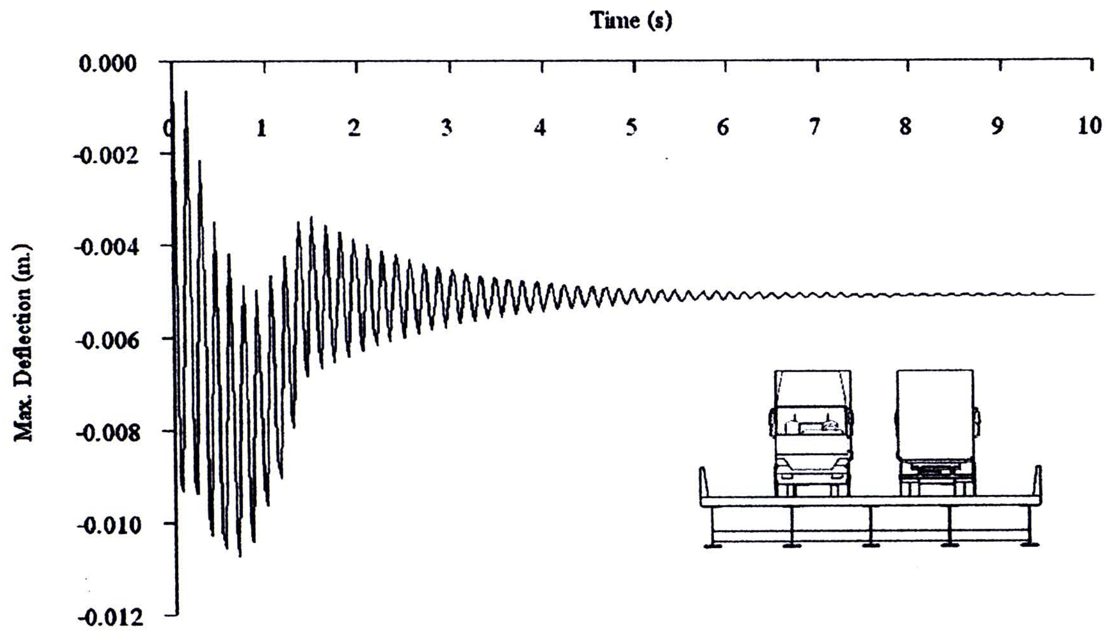


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.17 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.18 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

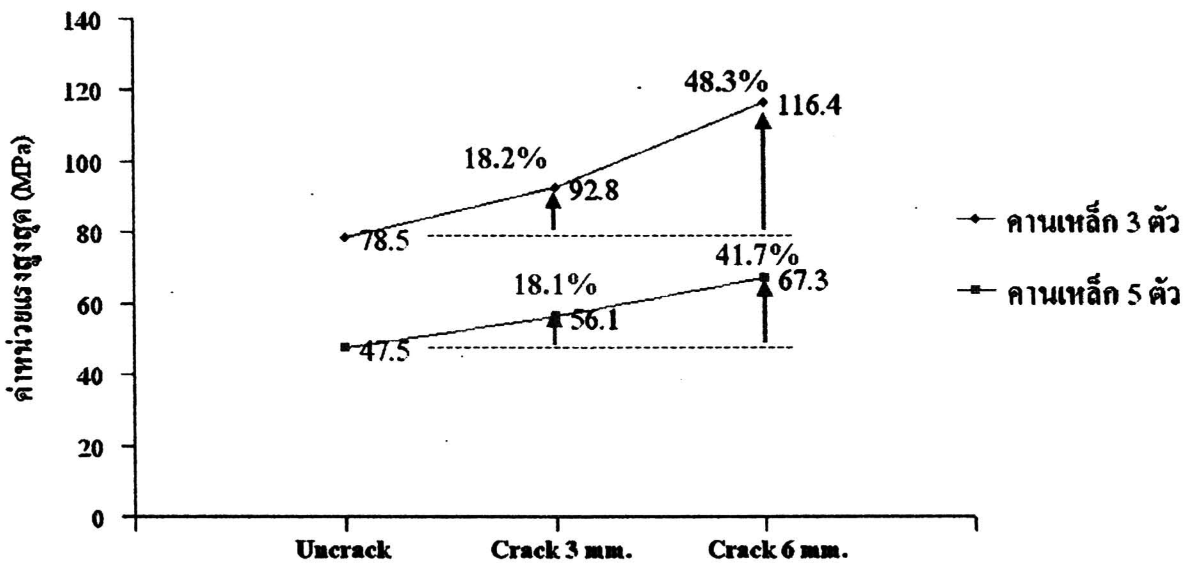
จากหัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.2 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร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

ตารางที่ 5.4 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร

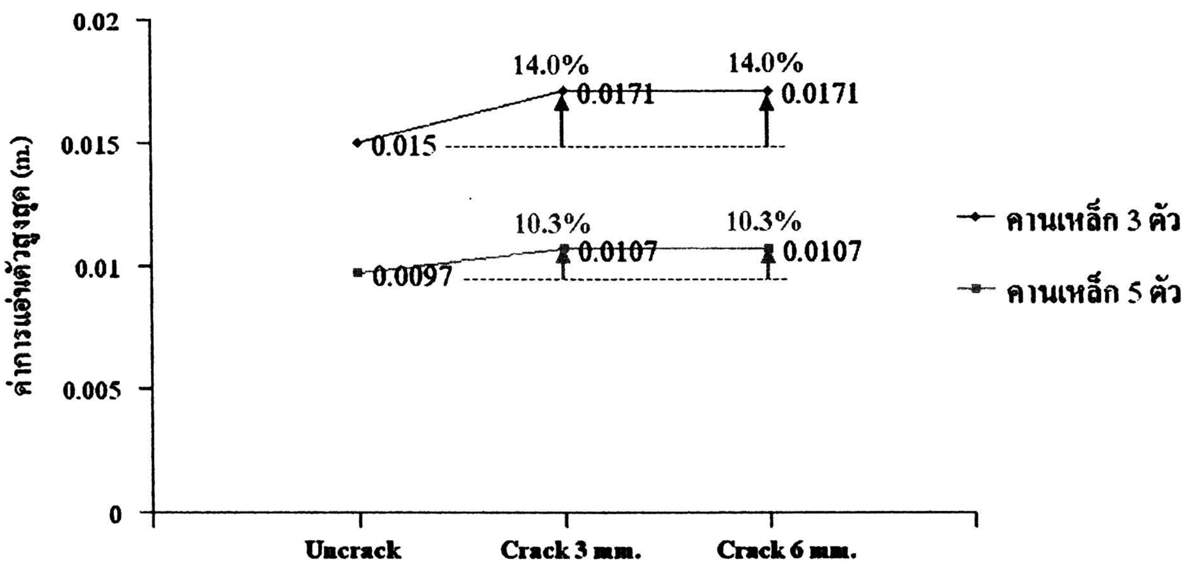
รูปแบบของสะพาน		กรณีที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP	
		Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
รอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร	3 Girders	92.8	-0.0171
	5 Girders	56.1	-0.0107
รอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร	3 Girders	116.4	-0.0171
	5 Girders	67.3	-0.0107

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

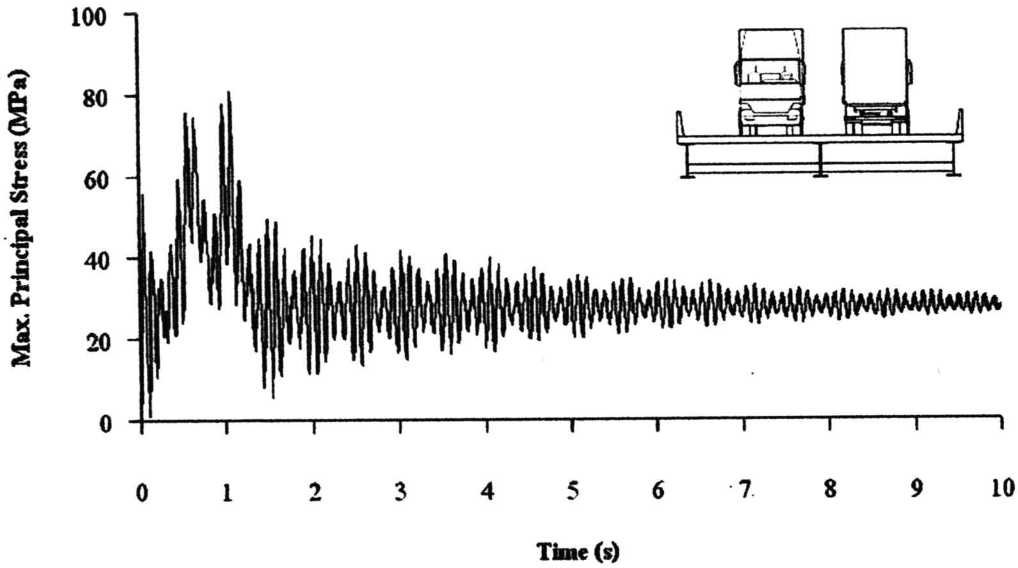


ภาพที่ 5.20 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ

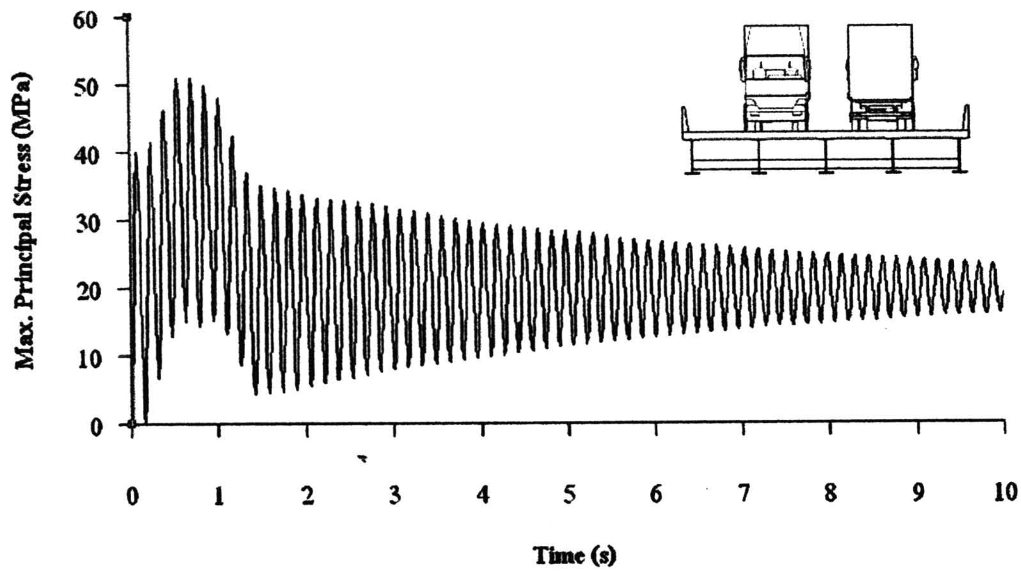
5.5 การตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น และเสริมกำลังด้วย CFRP

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

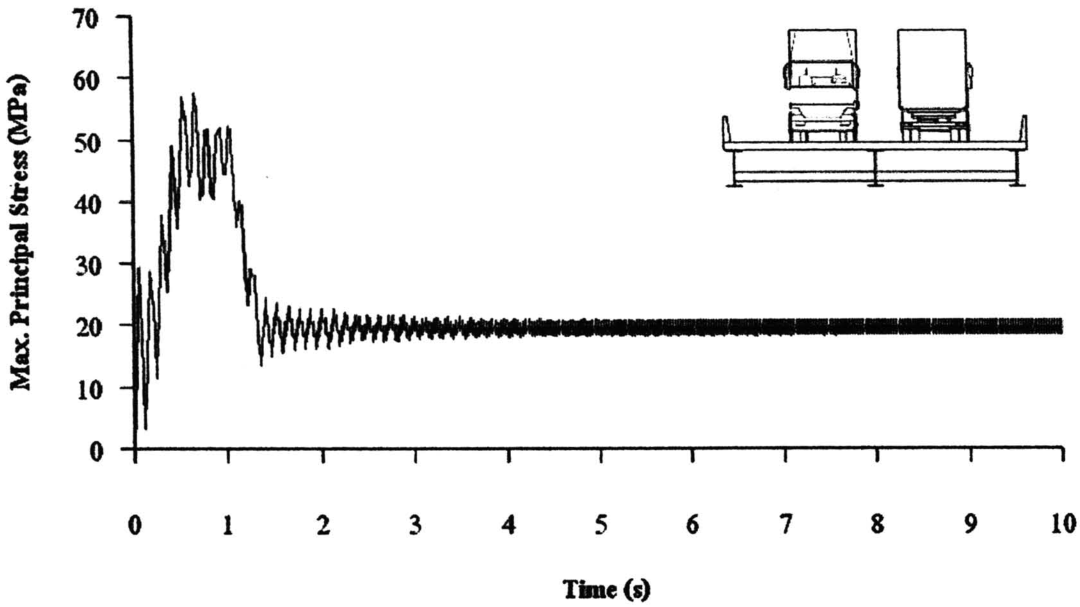


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

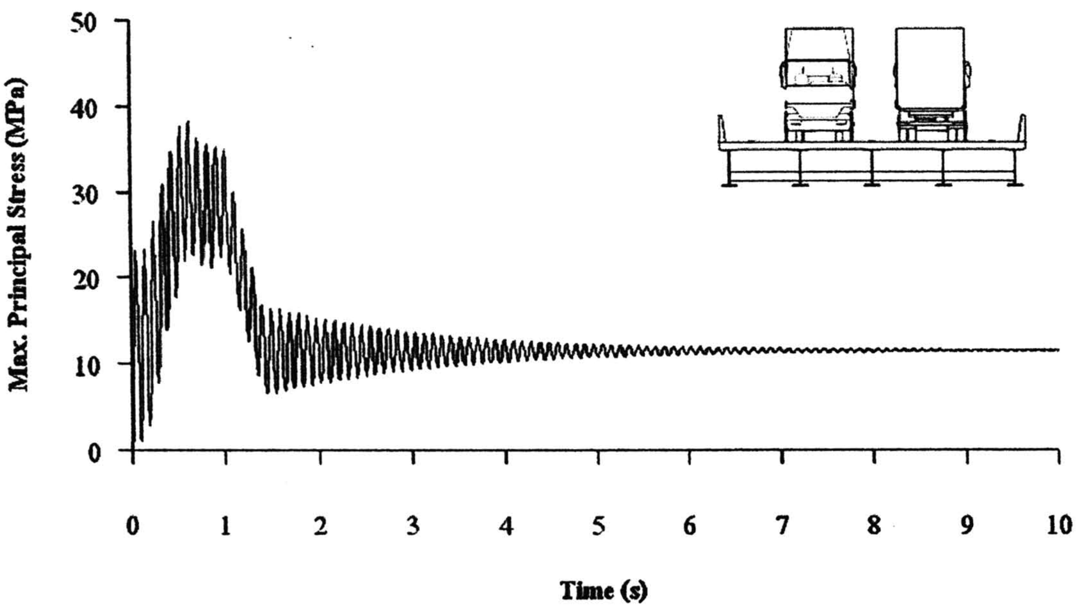


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.21 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

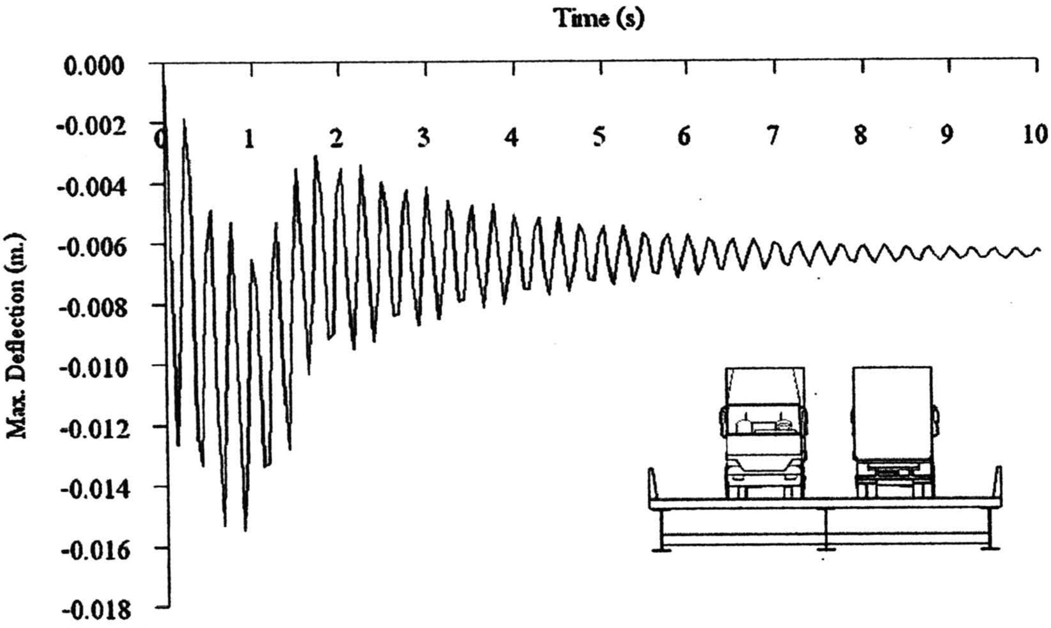


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

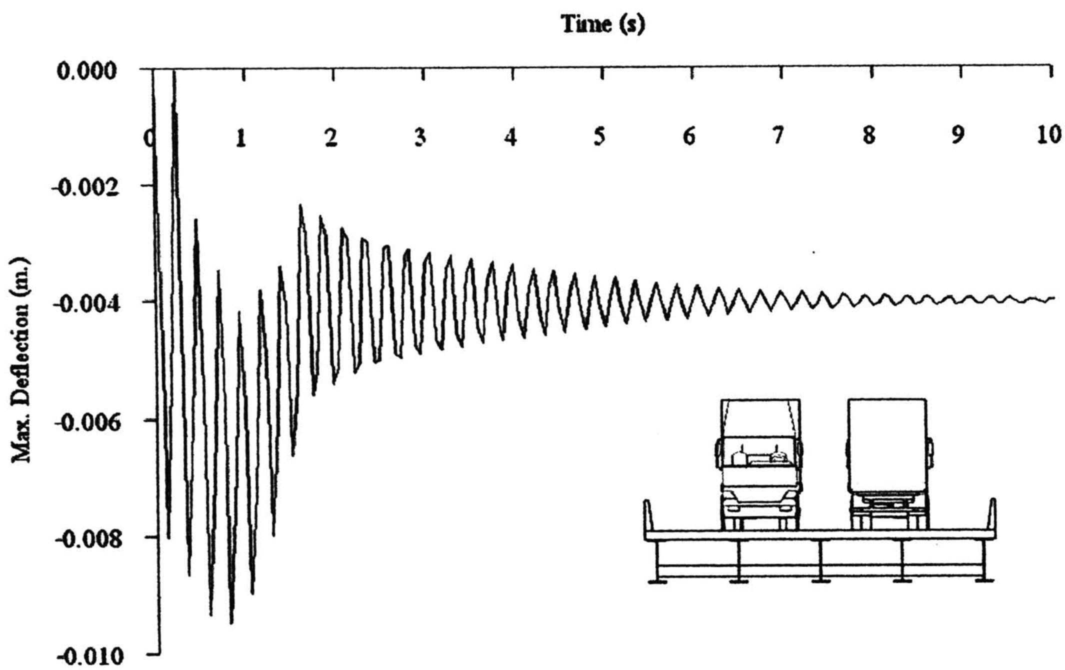


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.22 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

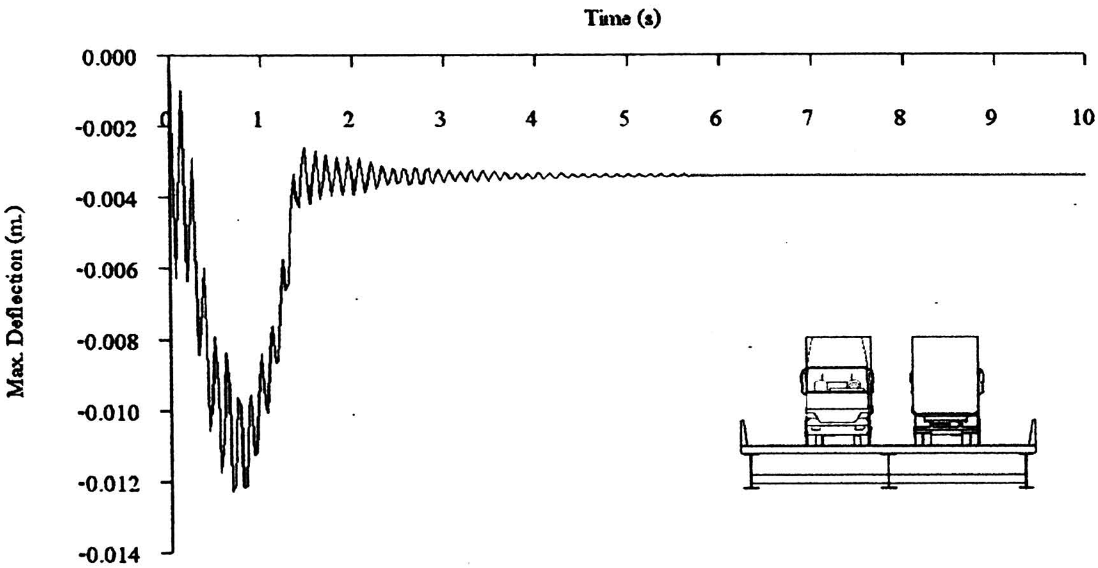


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

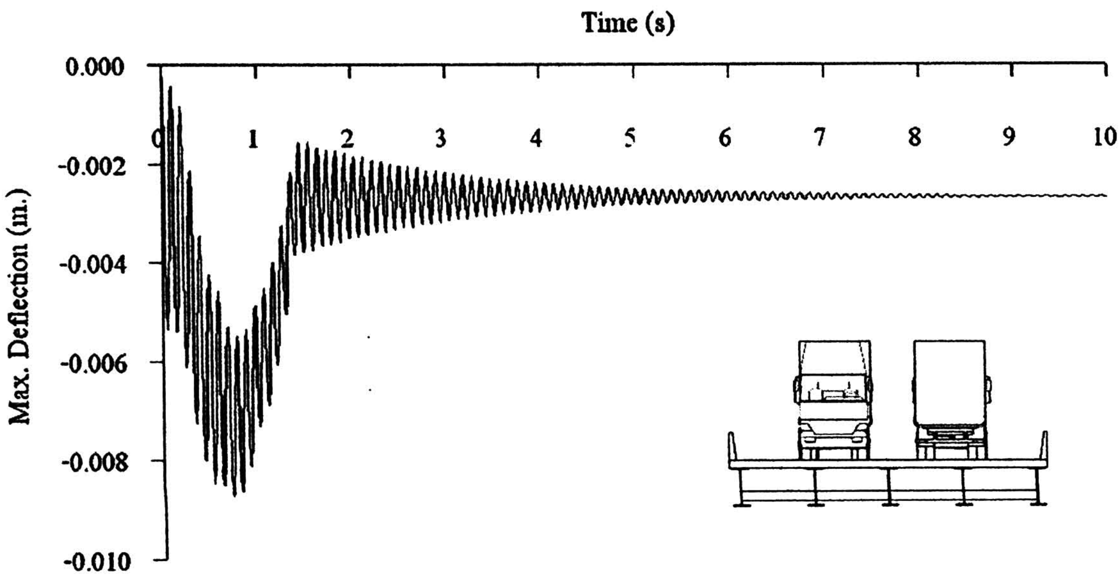


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.23 ค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate



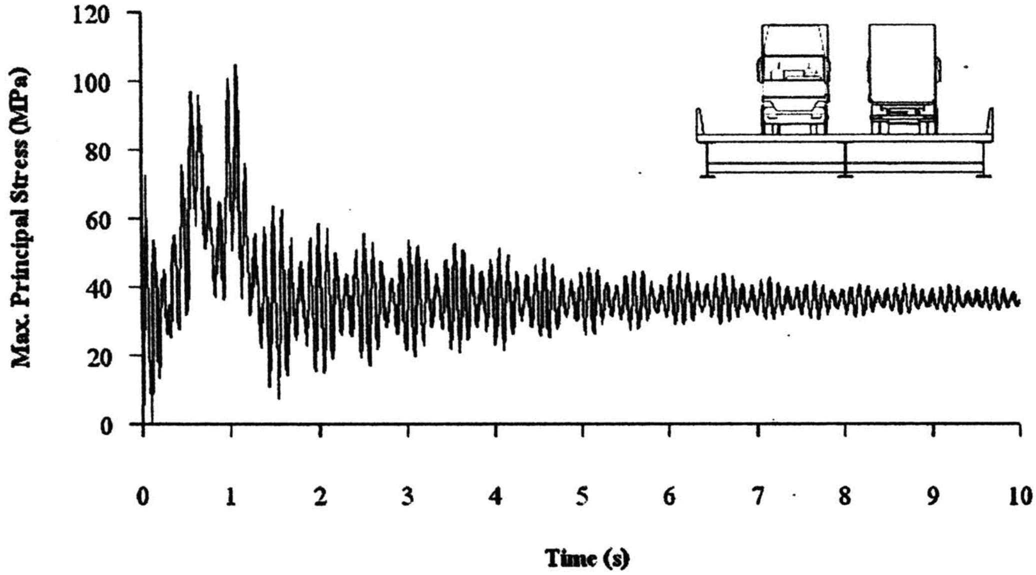
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



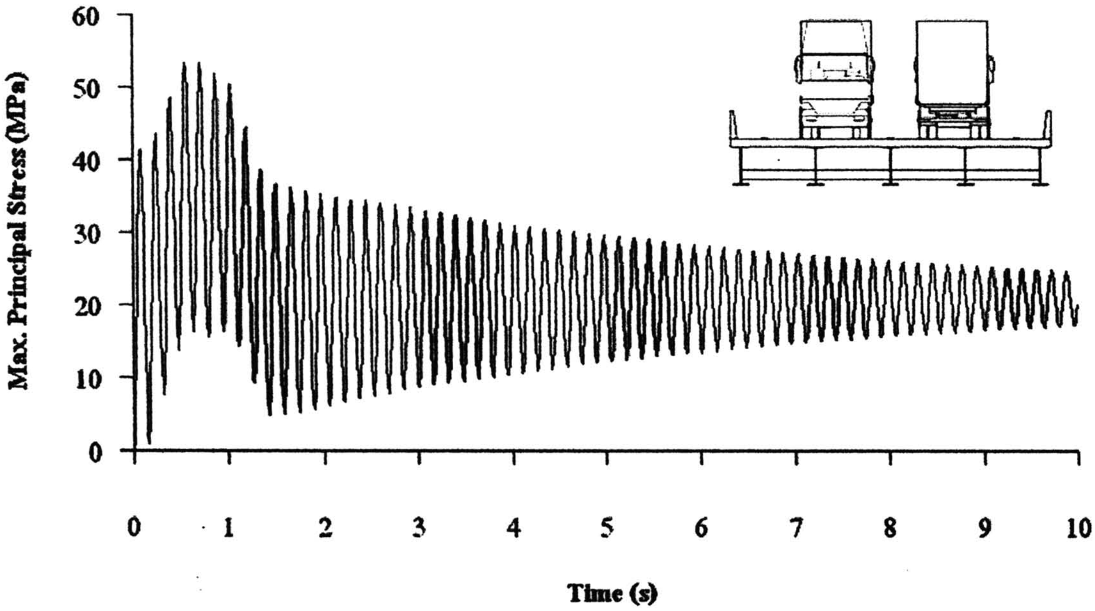
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

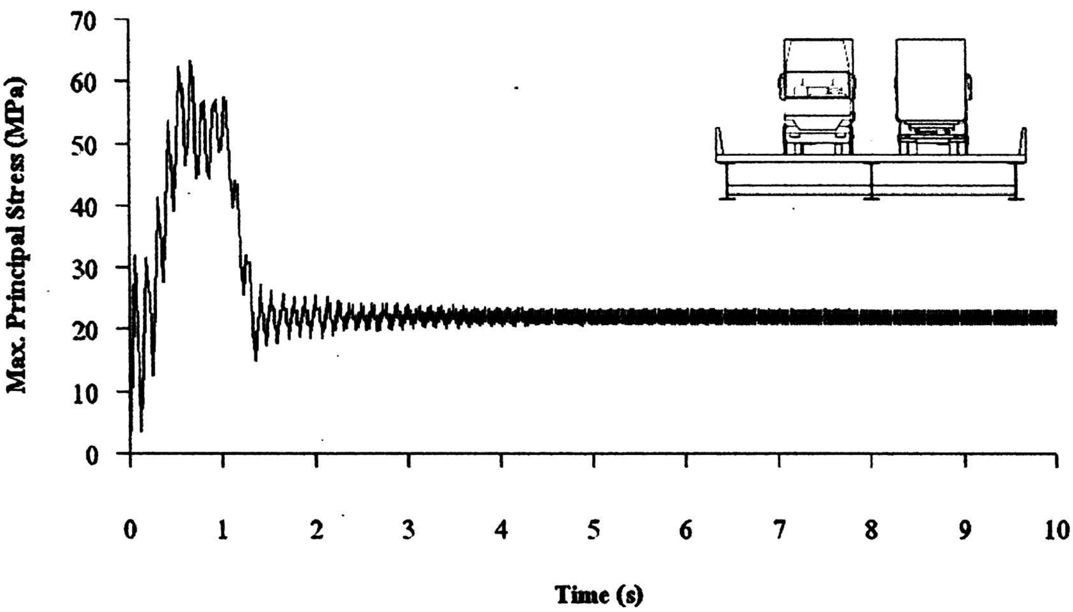


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

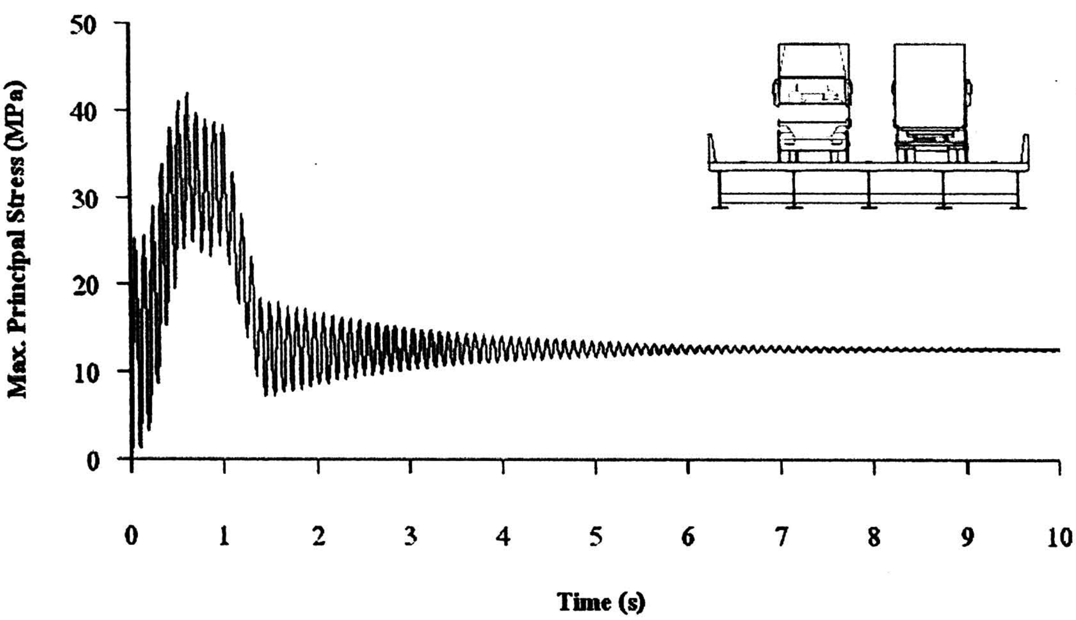


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.25 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

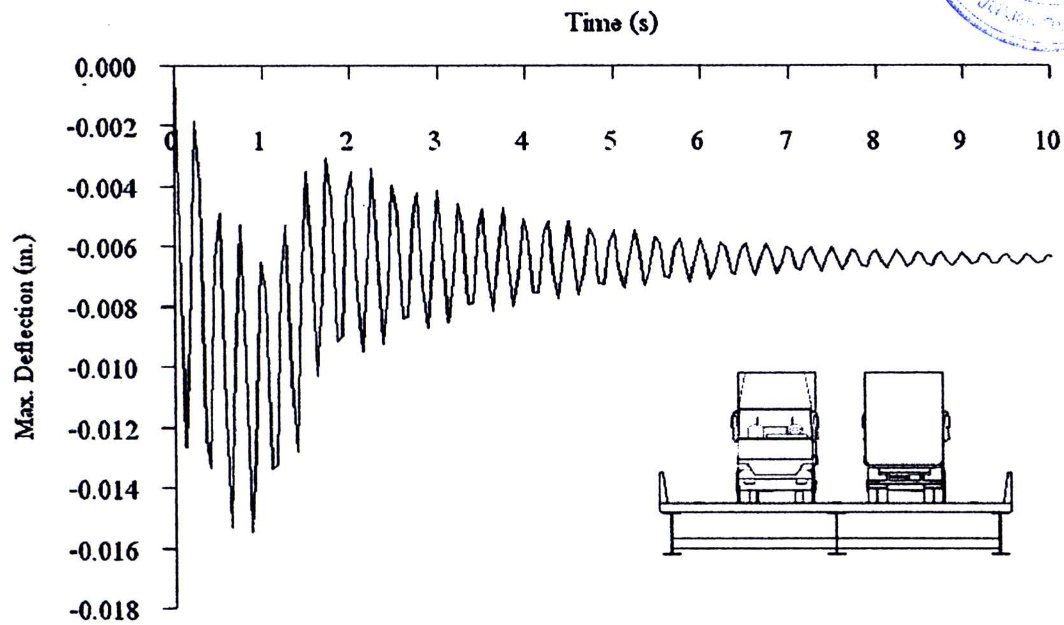


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

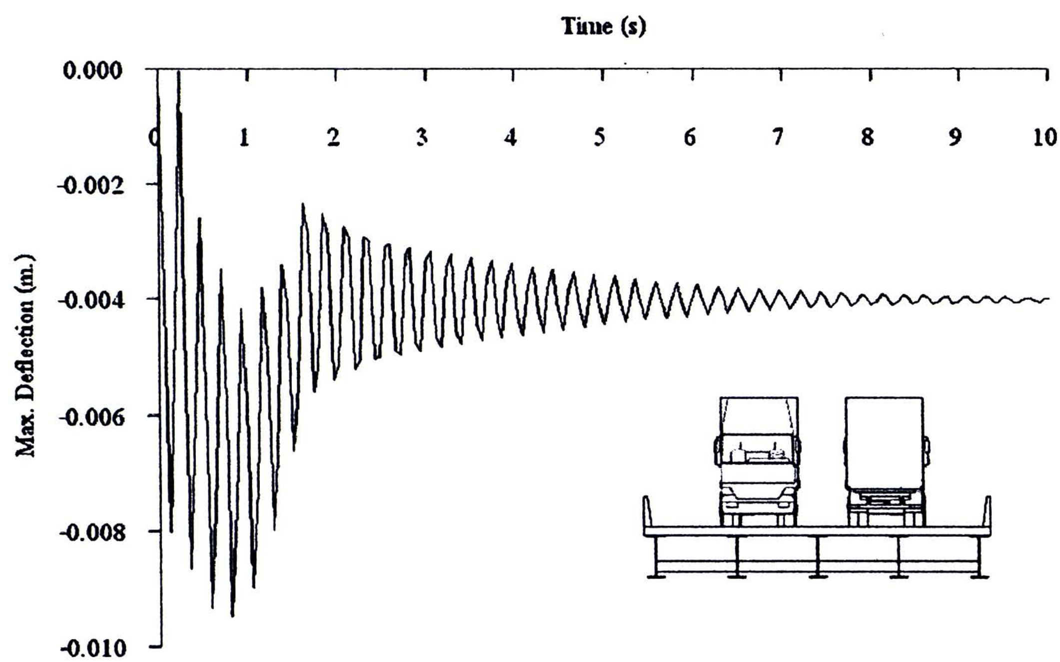


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.26 ค่าหน่วยแรงของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

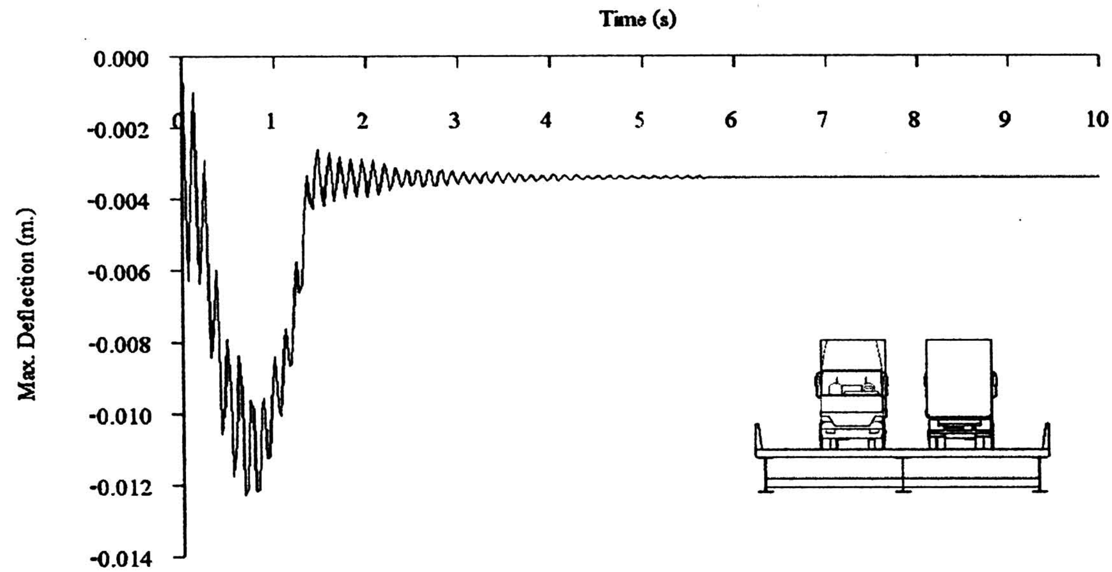


(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

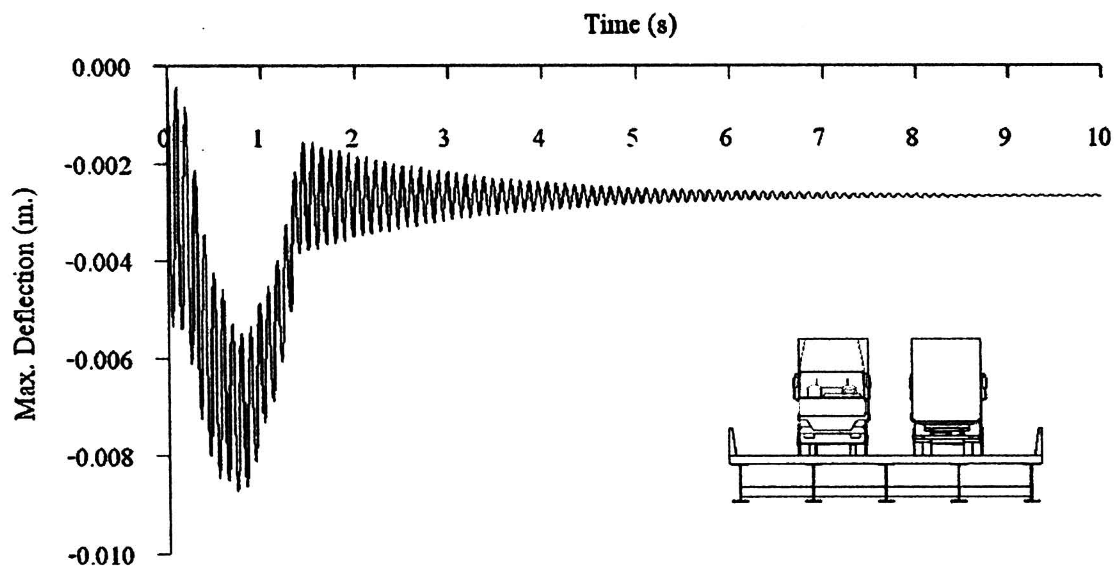


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

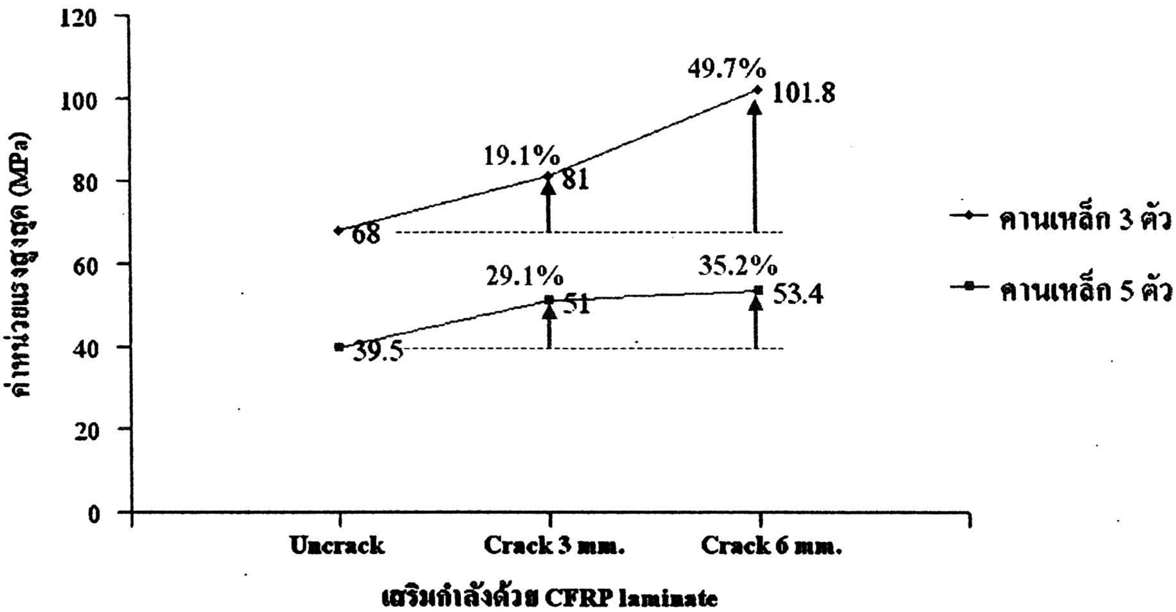
จากหัวข้อที่ 5.5.1 ถึง 5.5.2 สามารถสรุปผลของการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น และค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

ตารางที่ 5.5 ค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP และมีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 และ 6 มิลลิเมตร

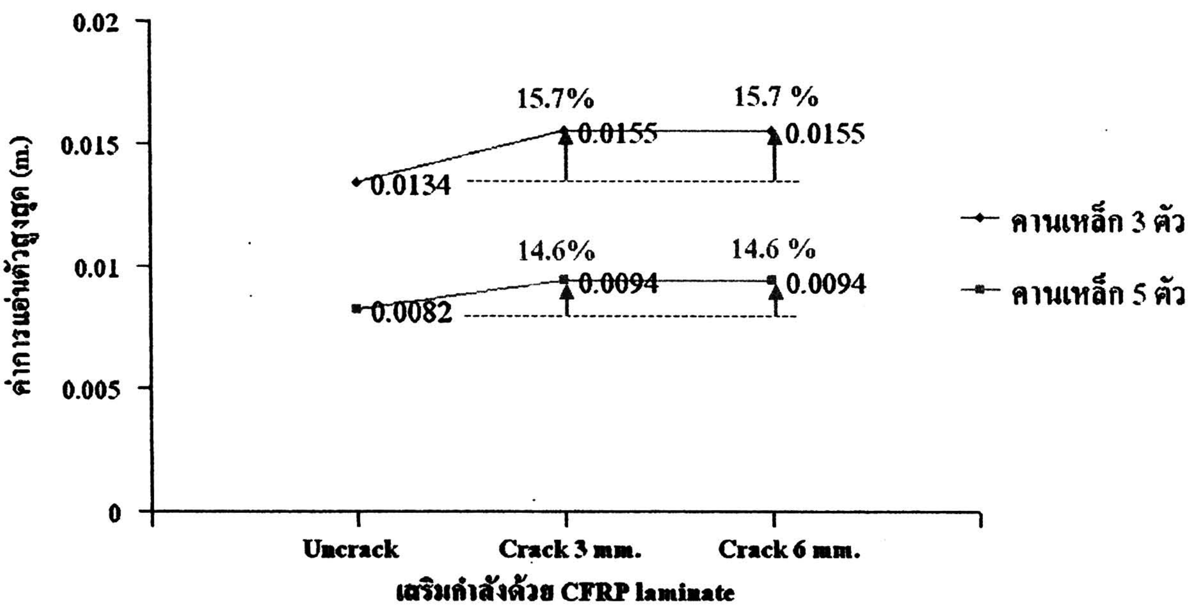
รูปแบบของสะพาน		กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate		กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck	
		Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)	Maximum Stress (MPa)	Maximum Deflection (m)
รอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร	3 Girders	81.0	-0.0155	57.8	-0.0122
	5 Girders	51.0	-0.0094	38.3	-0.0087
รอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร	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 จะให้การตอบสนองทางพลศาสตร์เพิ่มขึ้นมากว่ากรณีที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร แต่ความเสียหายเริ่มต้น จะไม่มีผลต่อค่าการแอ่นตัวของสะพานคอมโพสิตมาก แต่จะส่งผลต่อจำนวนรอบของรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานมากกว่า

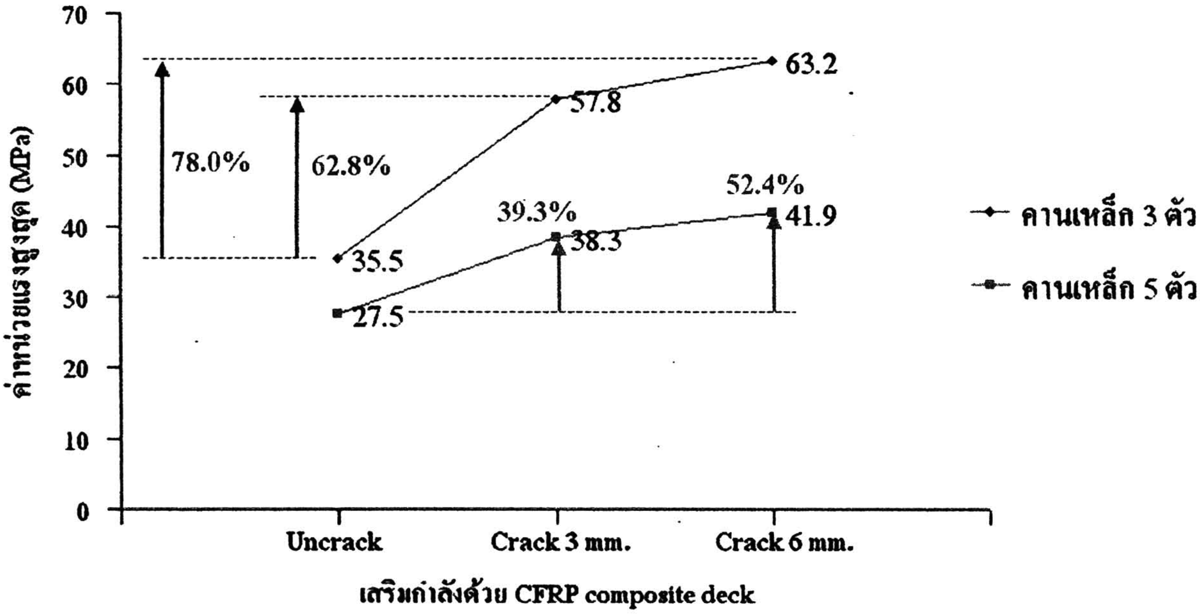


ภาพที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate

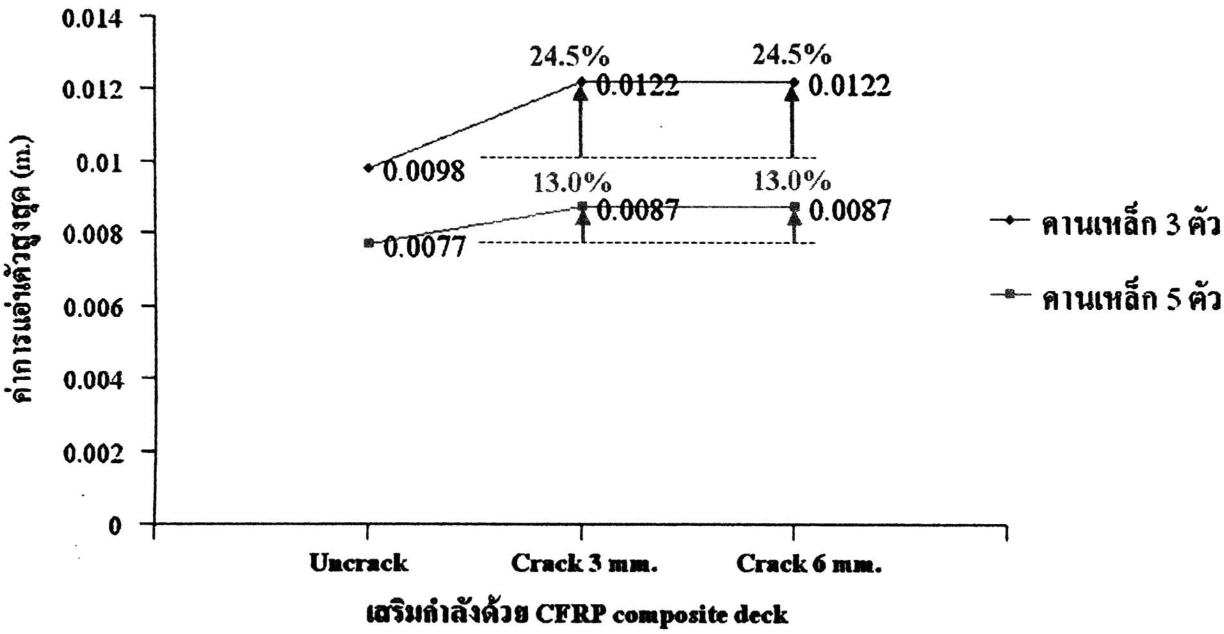


ภาพที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุด กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate

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

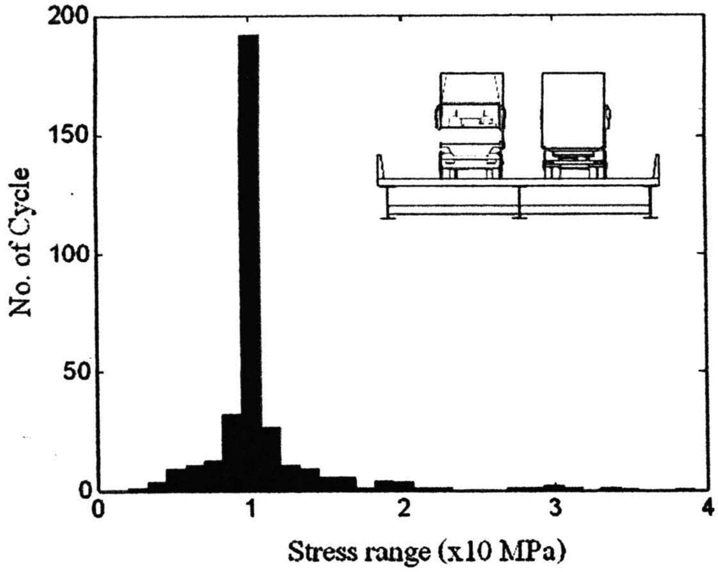
ในการวิเคราะห์ความล้าของสะพานคอมโพสิต จะพิจารณาจากค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งก็คือค่าหน่วยแรง โดยจะใช้วิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ในการหาค่าช่วงของหน่วยแรง (Stress range) และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycle per truck passage) จากกราฟค่าหน่วยแรงกับเวลา โดยค่าที่ได้จากวิธีนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) จะนำไปหาอายุความล้า (Fatigue life) และจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน (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) โดยจะใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิตที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางไฟไนท์อิลิเมนท์ และการพิจารณาความล้าของสะพานคอมโพสิต จะพิจารณาน้ำหนักของรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน) เท่านั้น

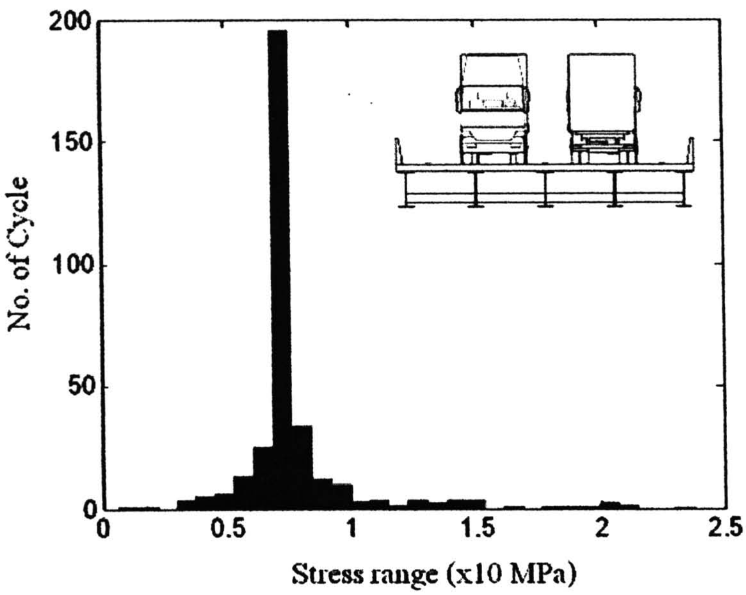
จากผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต ทั้งกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP และกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง ในหัวข้อที่ผ่านมา จะสามารถหาช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ได้ดังนี้

- **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



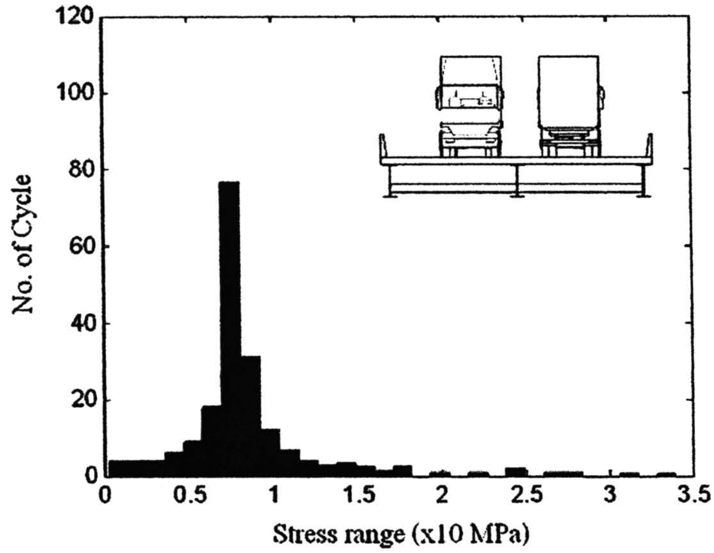
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.33 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

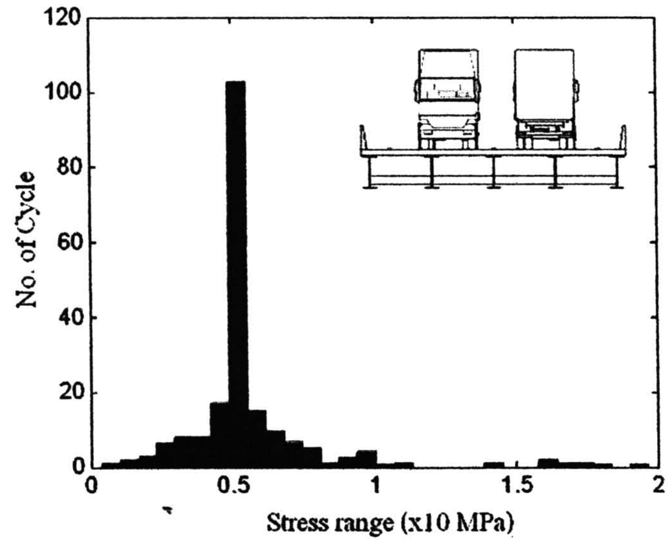
- **สะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP**

จากแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และ CFRP composite deck จะได้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ คือ ค่าหน่วยแรงกับเวลา แต่จะมีค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ที่น้อยกว่าจากกรณีที่สะพานคอมโพสิตที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย 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

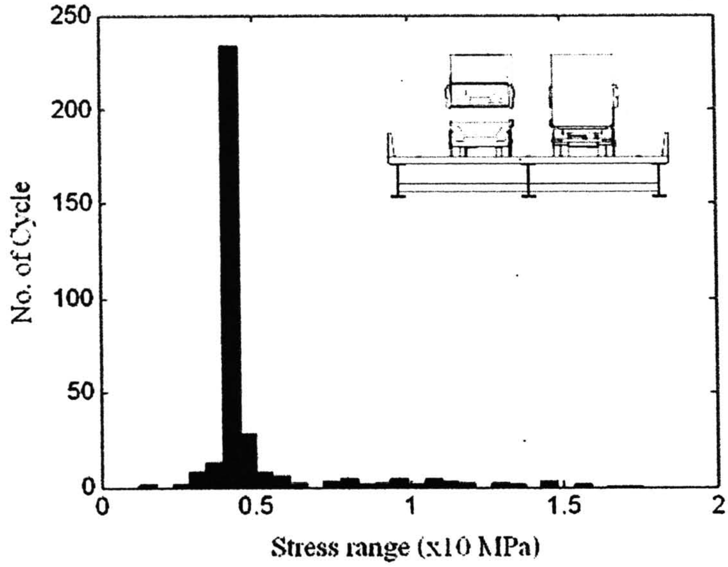


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

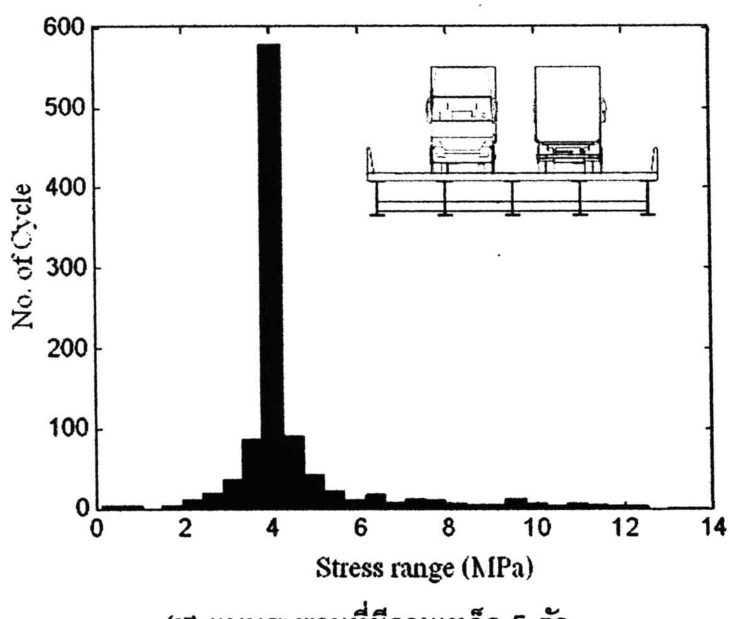
ภาพที่ 5.34 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminate

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



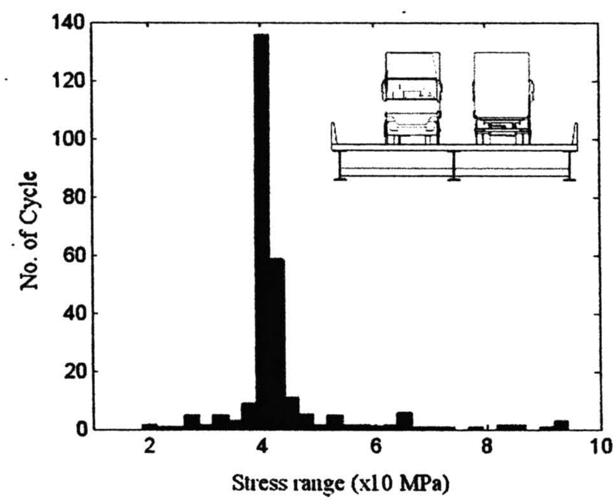
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.35 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

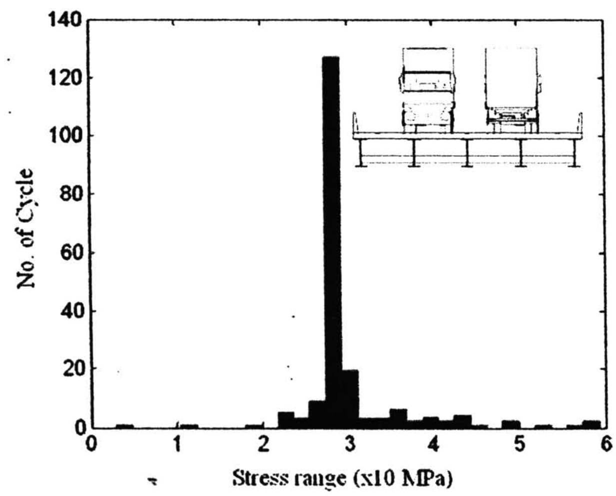
- **สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้น ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP**

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 และค่าจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรงเท่ากับ 3 และ 2 ตามลำดับ



(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว

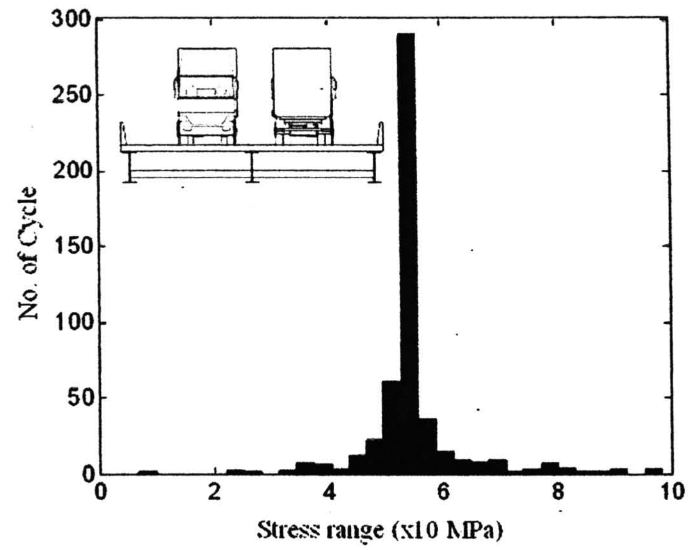


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

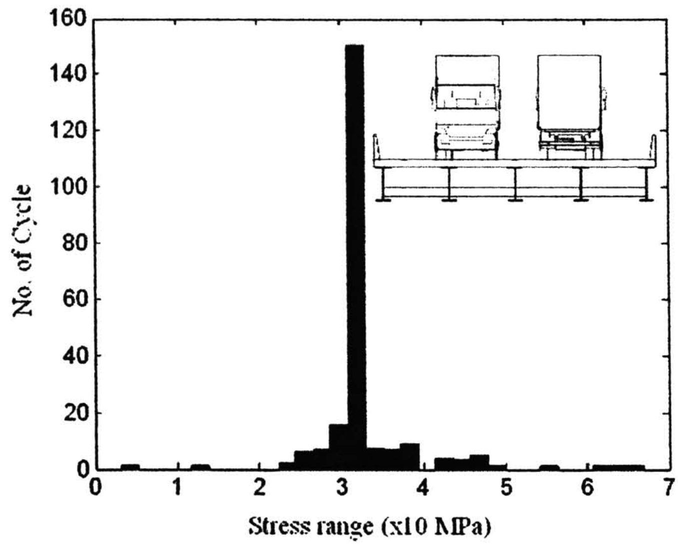
ภาพที่ 5.36 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

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



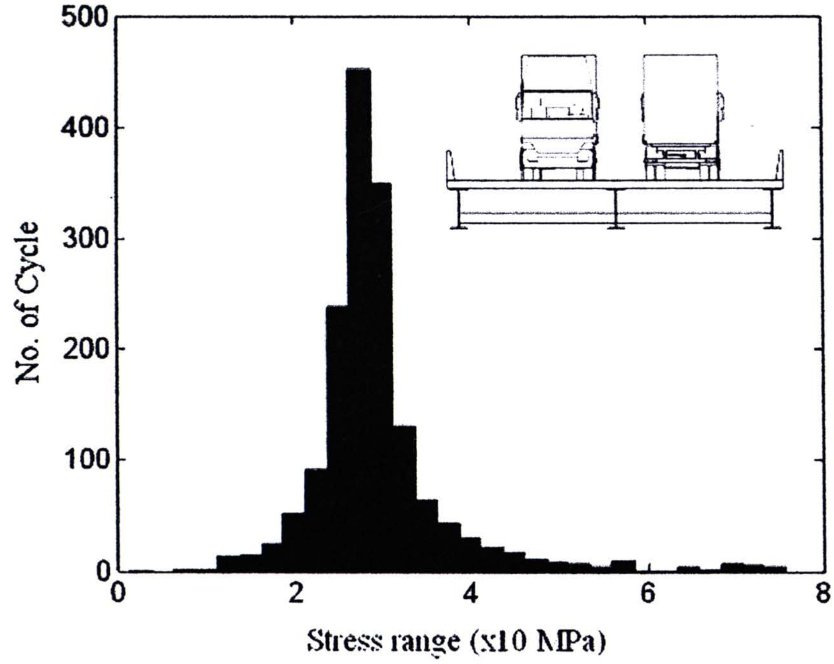
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

ภาพที่ 5.37 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 6 มิลลิเมตร ไม่ได้เสริมกำลังด้วย CFRP

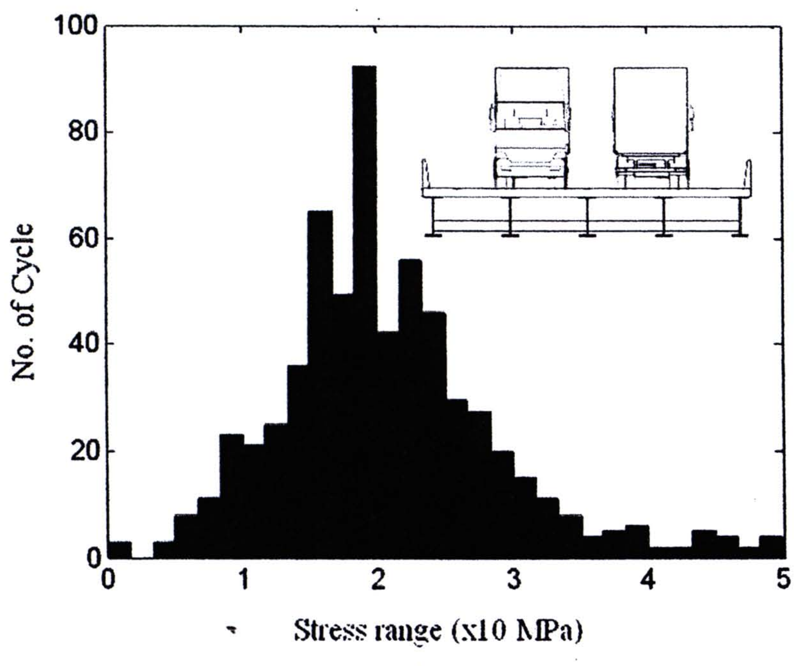
- **สะพานคอมโพสิตที่มีความเสียหายเริ่มต้นขนาดของรอยร้าว 3 มิลลิเมตร และเสริมกำลังด้วย CFRP**

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



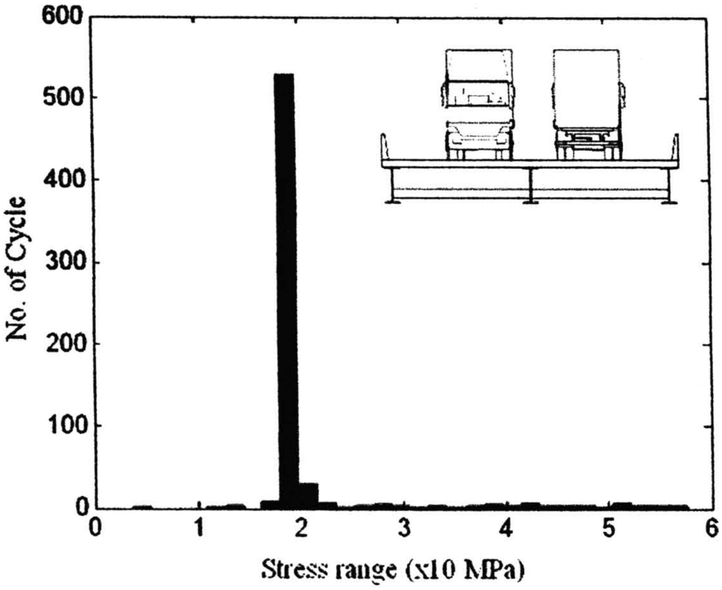
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



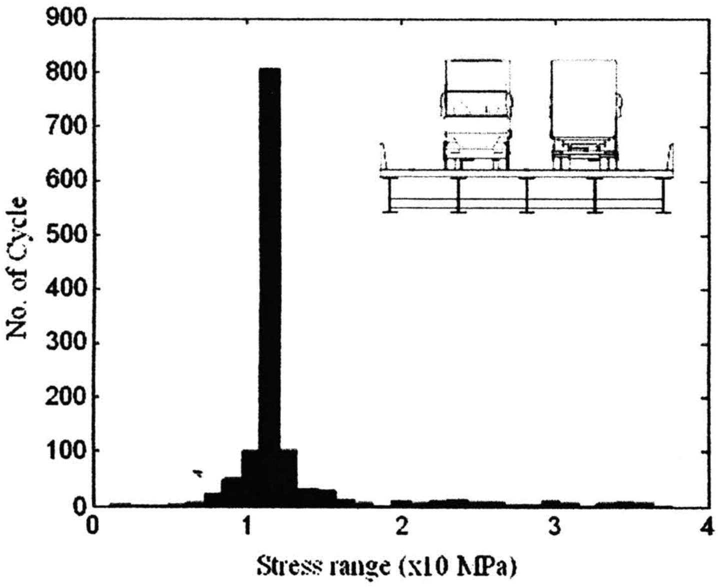
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

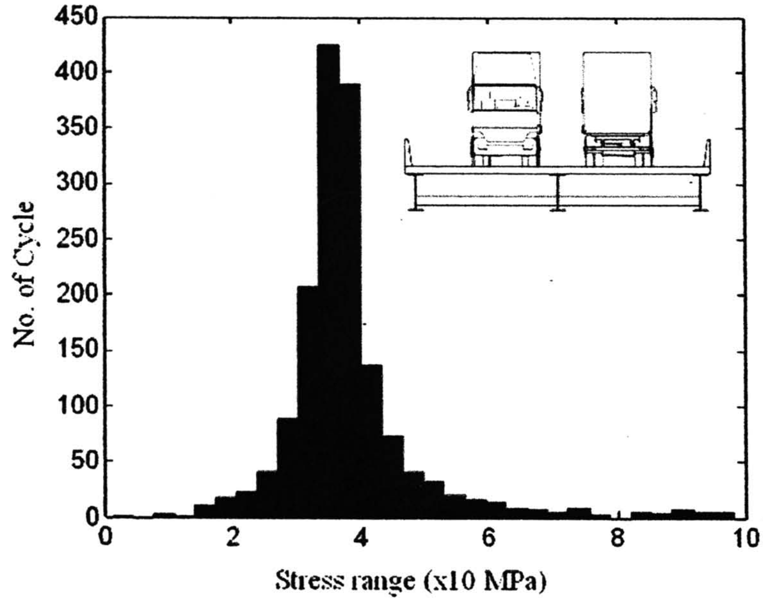


(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

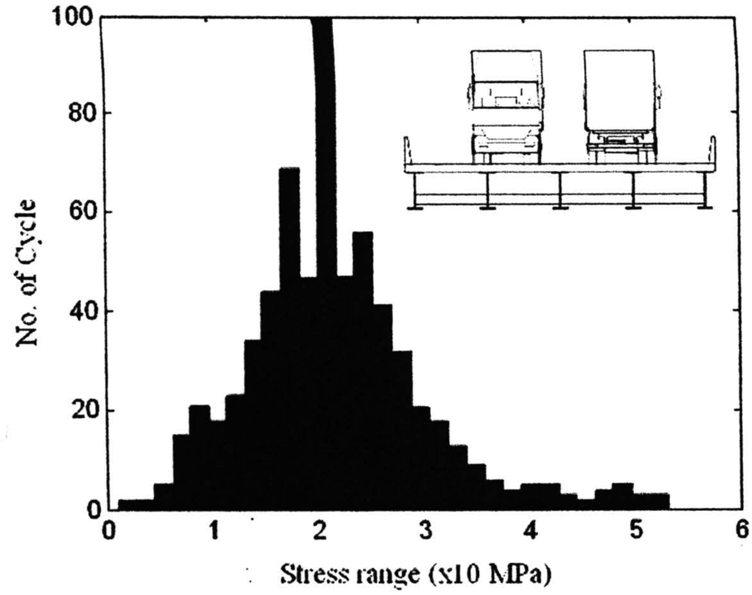
ภาพที่ 5.39 กราฟช่วงของหน่วยแรง และจำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง ของสะพานคอมโพสิตที่มีขนาดรอยร้าวเริ่มต้น 3 มิลลิเมตร เสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

- **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



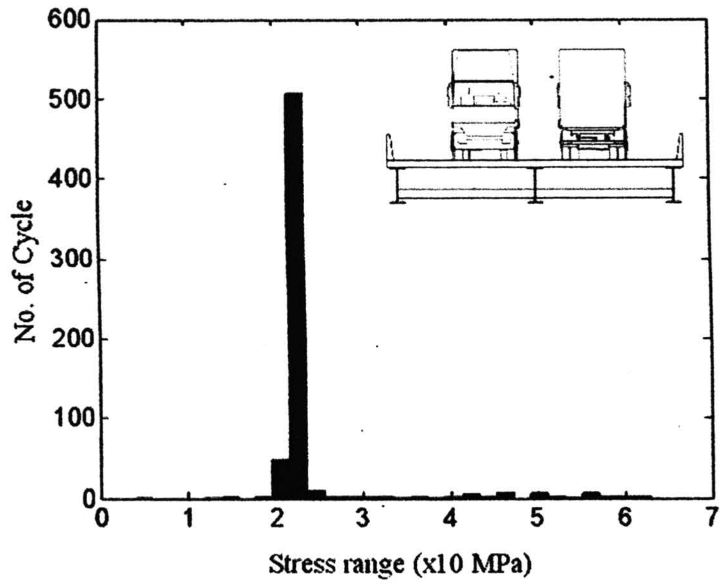
(ก) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 3 ตัว



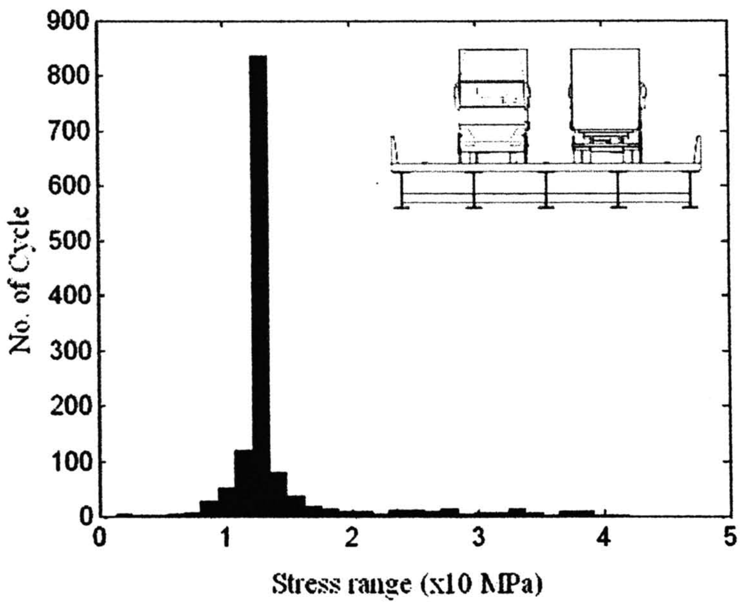
(ข) แบบสะพานที่มีคานเหล็ก 5 ตัว

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

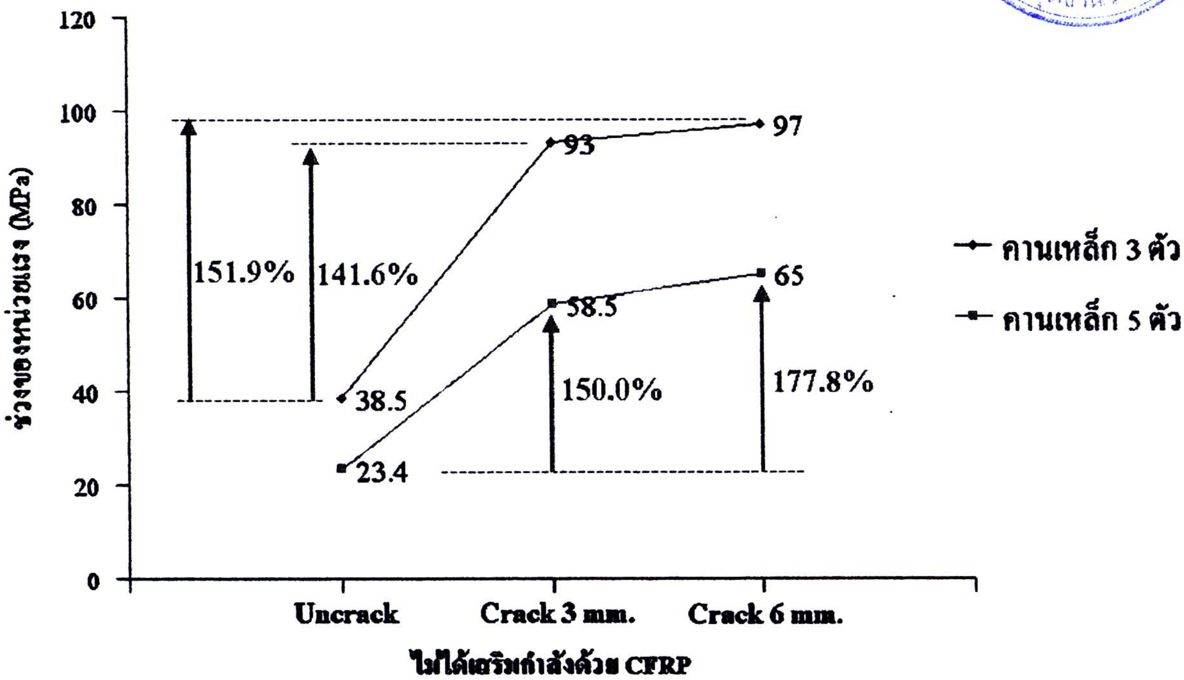
รูปแบบสะพาน	จำนวนช่องจราจร	จำนวนคานเหล็ก	ช่วงของหน่วยแรง (MPa)	จำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (n)
ไม่เสริมกำลัง Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	38.5	0.5
		5	23.4	0.5
ไม่เสริมกำลัง Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	93.0	3
		5	58.5	2
ไม่เสริมกำลัง Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	97.0	3
		5	65.0	2
CFRP laminate Uncrack	2 (สวนทางกัน)	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 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย จะให้ค่าช่วงของหน่วยแรง มีค่าลดลงมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะช่วยลดค่าช่วงของหน่วยแรงได้มาก แต่เมื่อสะพานมีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นกับสะพานก็เป็นสาเหตุที่จะเพิ่มค่าช่วงของหน่วยแรงเพิ่มขึ้นได้มากถึงร้อยละ 60

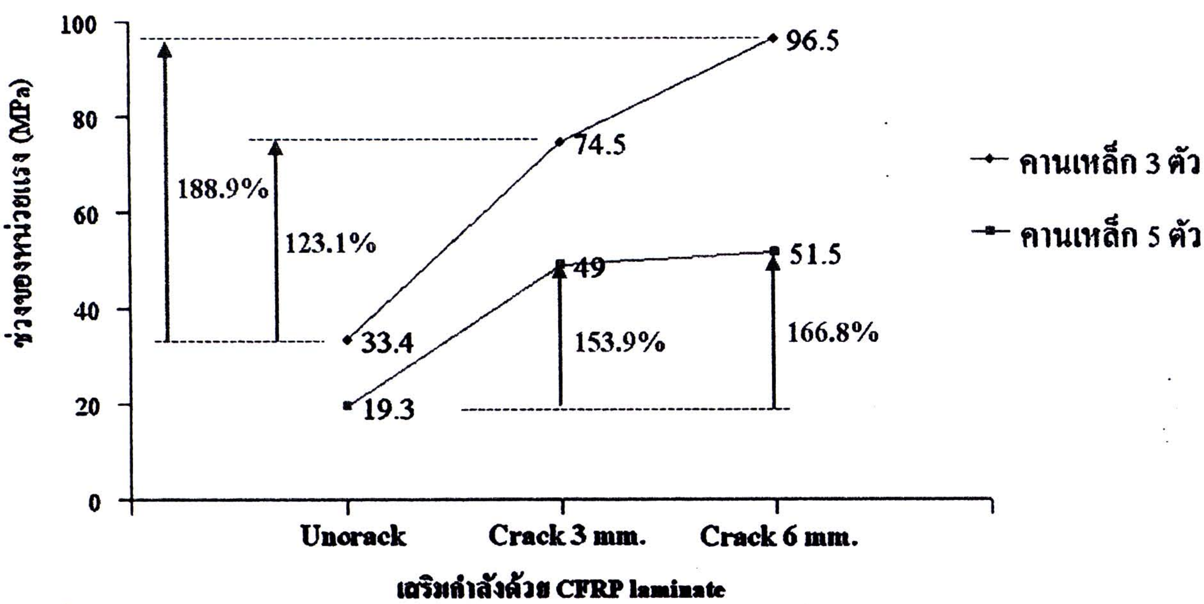
ตารางที่ 5.7 ค่าคลาดเคลื่อนของช่วงของหน่วยแรง เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลังกับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

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

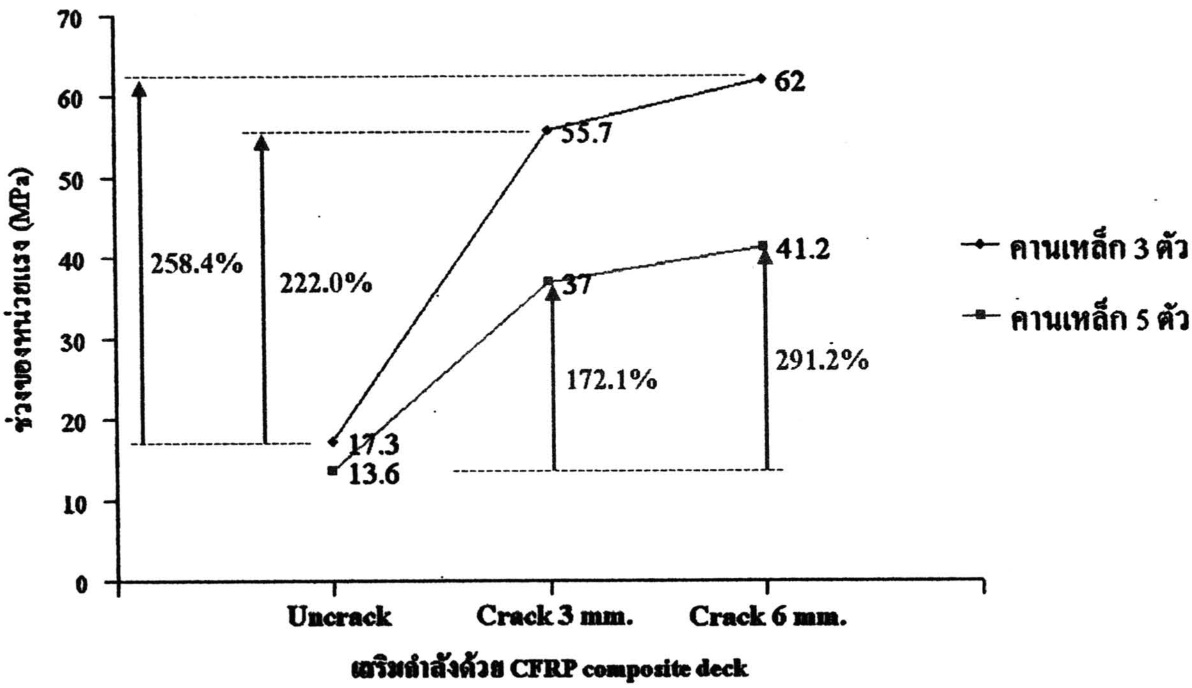
ภาพที่ 5.42 ถึง 5.44 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าช่วงของหน่วยแรง กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตมีขนาดรอยร้าว 6 มิลลิเมตร จะให้ช่วงของหน่วยแรงเพิ่มขึ้นมากว่า สะพานที่มีขนาดรอยร้าว 3 มิลลิเมตร และสะพานที่ไม่มีรอยร้าวตามลำดับ



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 หรืออายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิตนั้นสามารถหาได้จากมาตรฐาน AASHTO โดยพิจารณาจากค่าการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพานคอมโพสิต โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ 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 โดยใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์

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) จะมีค่าตามประเภทของจุดรองรับของสะพานคอมโพสิต 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

จากการวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 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) ซึ่งจะพิจารณาจำนวนรถที่

วิ่งผ่านสะพานในแต่ละวันเท่ากับ 3,000 คันต่อวัน ภายใต้น้ำหนักรถบรรทุกที่วิ่ง 2 ช่องจราจร (สวนทางกัน)

ตารางที่ 5.10 อายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เมื่อพิจารณาจากตัวแปรที่ได้จากแบบจำลอง

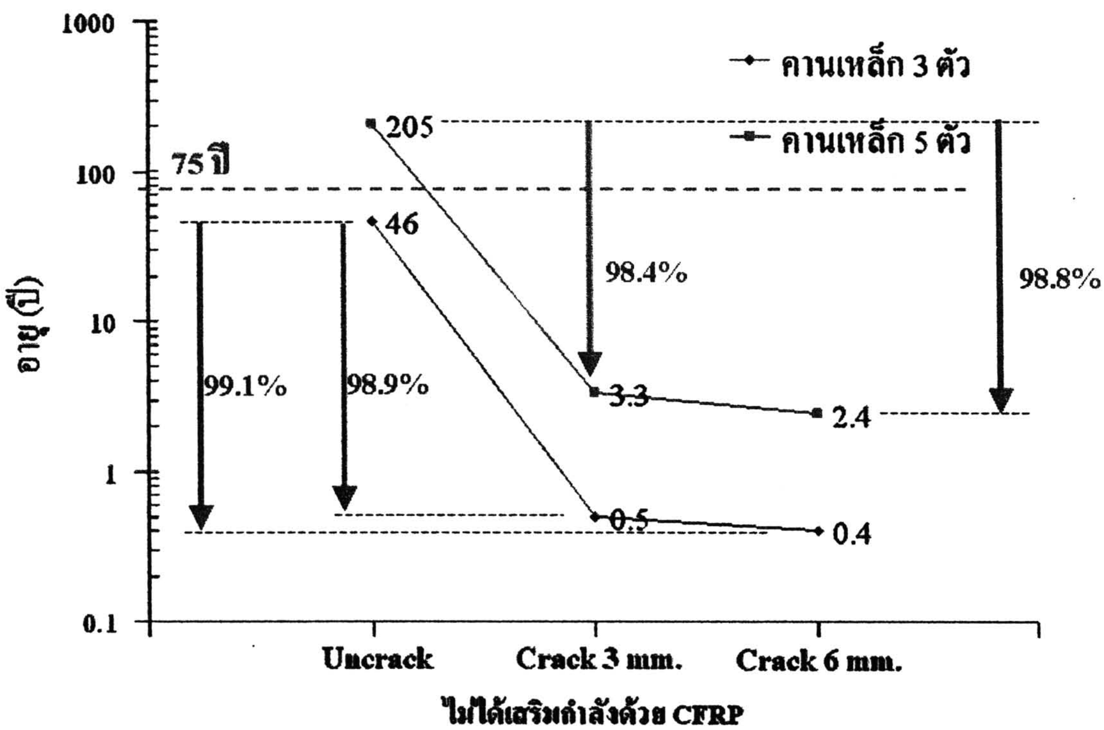
รูปแบบสะพาน	จำนวนช่องจราจร	จำนวนคานเหล็ก	จำนวนรถบรรทุก (คัน/วัน)	อายุ (ปี)
ไม่เสริมกำลัง Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	46
		5	3,000	205
ไม่เสริมกำลัง Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	0.5
		5	3,000	3.3
ไม่เสริมกำลัง Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3,000	0.4
		5	3,000	2.4
CFRP laminate Uncrack	2 (สวนทางกัน)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

ตารางที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงอายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพานเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย จะให้อายุความล้า มีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสะพานคอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะช่วยลดอายุความล้าได้มาก แต่เมื่อสะพานมีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นกับสะพานก็เป็นสาเหตุที่จะลดอายุความล้าลงขึ้นได้มากถึงร้อยละ 660 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอายุความล้าลดลงอย่างมาก เมื่อเกิดรอยร้าว หรือความเสียหายเริ่มต้น ดังนั้นเมื่อความเสียหายเริ่มต้นจึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่ออายุความล้ามาก

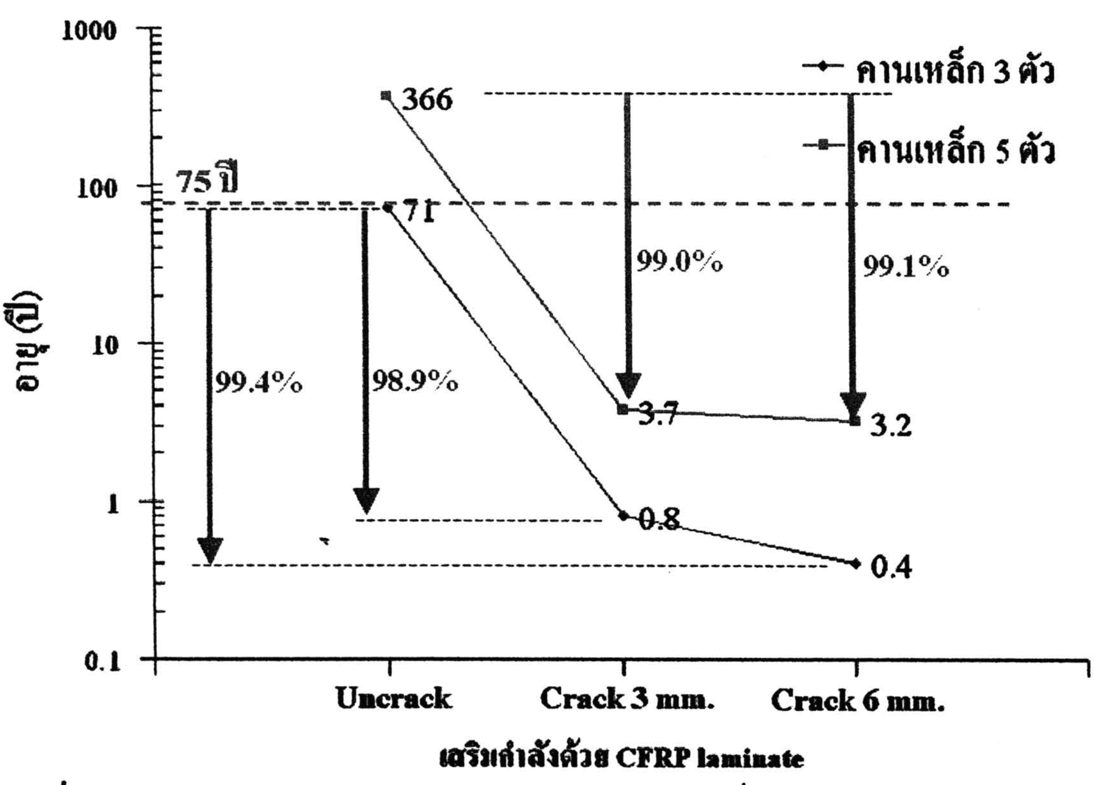
ตารางที่ 5.11 ค่าคลาดเคลื่อนของอายุความล้า หรืออายุการใช้งานของสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

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

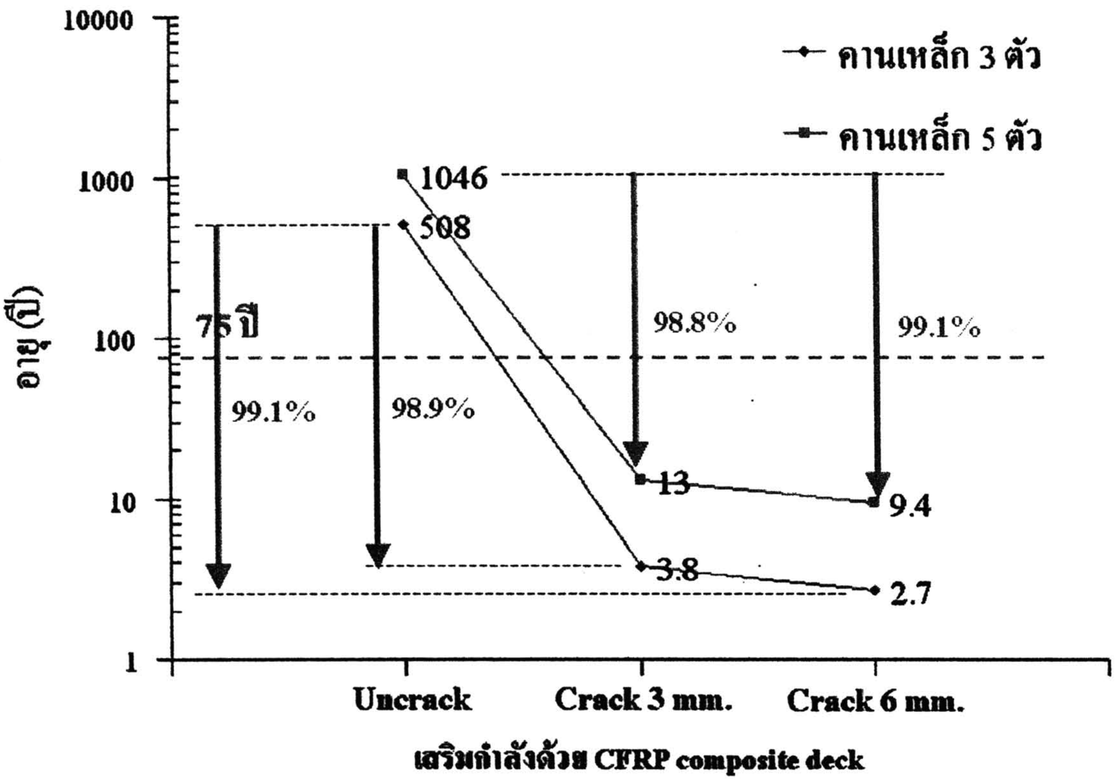
ภาพที่ 5.45 ถึง 5.47 เป็นกราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าวจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า กรณีที่สะพานคอมโพสิตมีรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร แต่จากกราฟจะเห็นได้ชัดว่าสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าว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



ภาพที่ 5.45 กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง

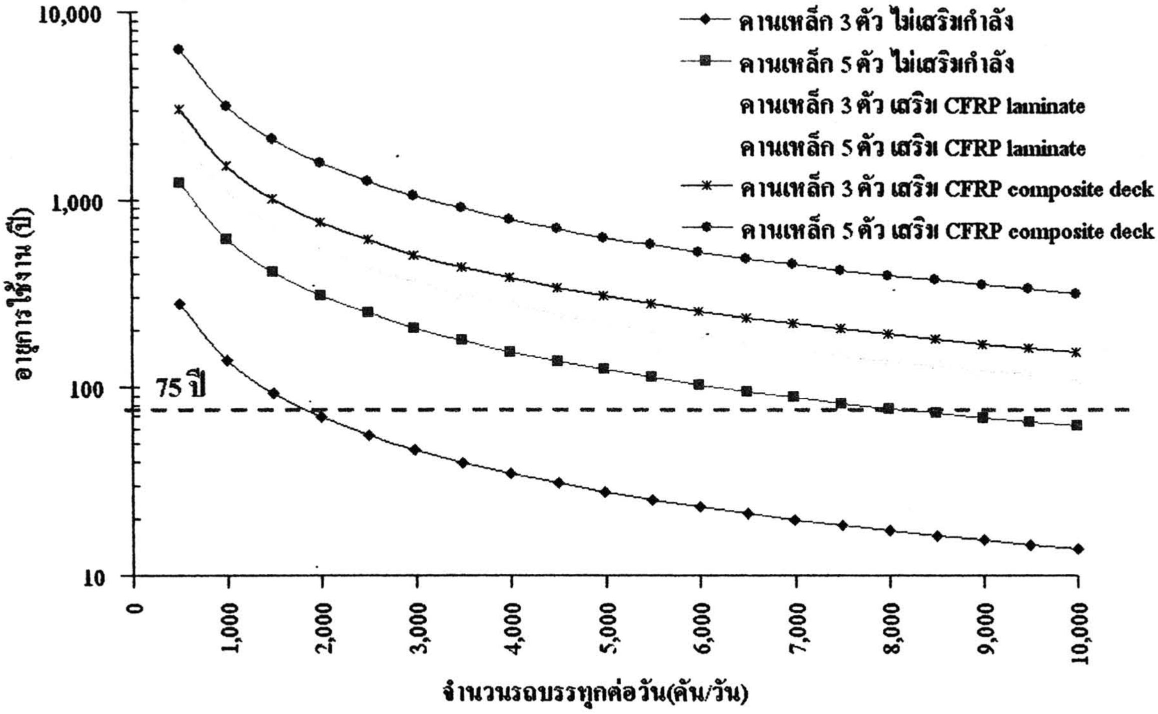


ภาพที่ 5.46 กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate

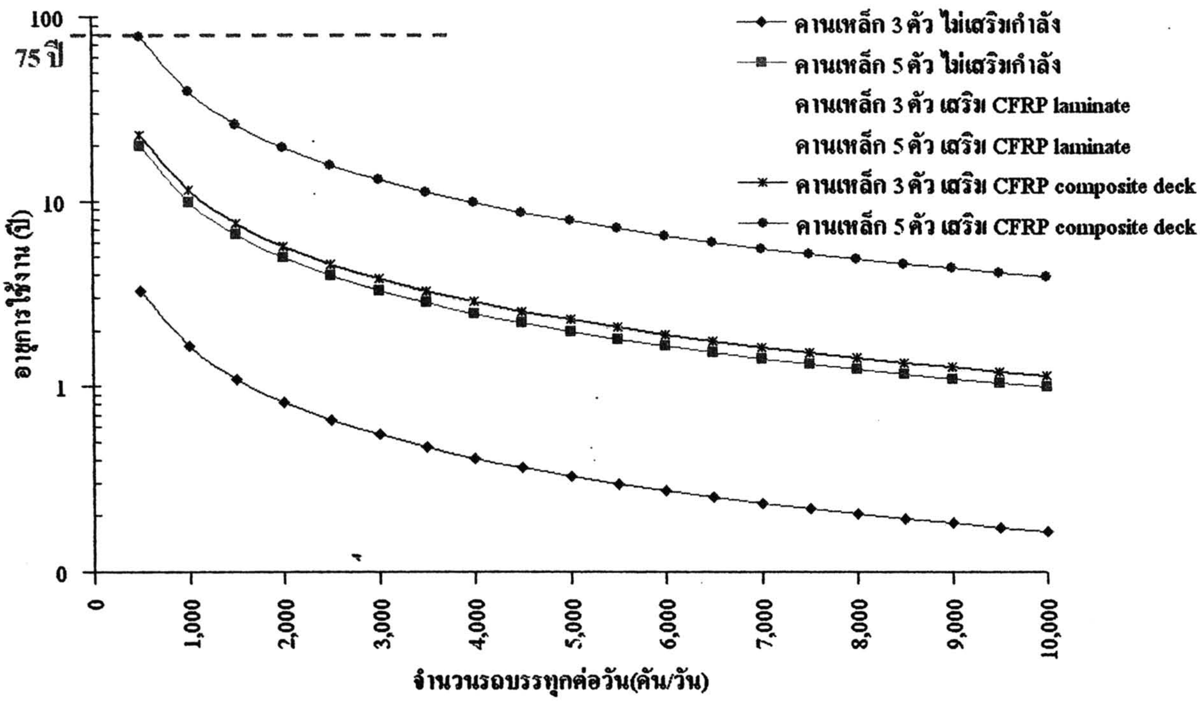


ภาพที่ 5.47 กราฟเปรียบเทียบอายุความล้า กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck

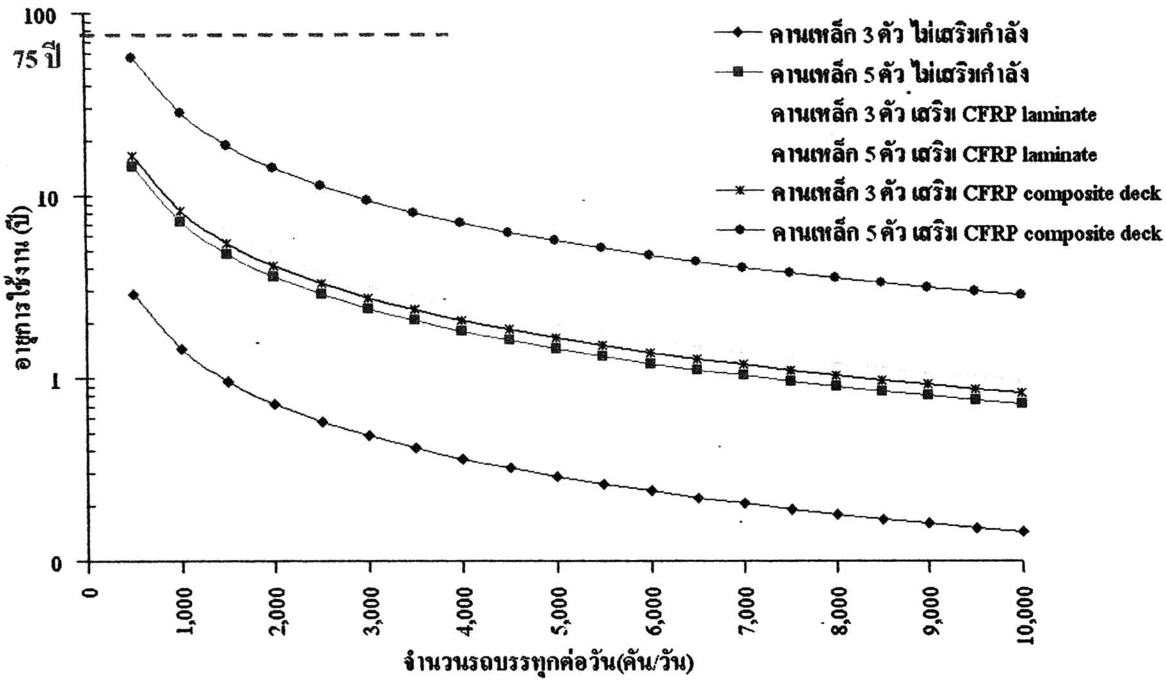
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ มาพิจารณาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต โดยที่กำหนดให้จำนวนของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานมีค่าเปลี่ยนแปลง เริ่มต้นจาก 500 ถึง 10,000 คันต่อวัน แล้วพิจารณาหาอายุของสะพานเหล็กโดยใช้สมการ จากมาตรฐาน AASHTO จะได้กราฟการเปรียบเทียบ ดังแสดงในภาพที่ 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) ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ และจำนวนรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานในแต่ละวัน 3,000 คันต่อวัน ในสมการเช่นกัน ซึ่งผลที่ได้จะแสดงค่าจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน โดยที่จำนวนรอบนี้จะเป็นการบอกให้ทราบว่าสะพานคอมโพสิตสามารถที่จะรับน้ำหนักของรถบรรทุกตามมารฐาน AASHTO ได้กี่รอบ ถึงจะเกิดการเสียหายเนื่องจากความล้า โดยผลของจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน แสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 จำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน (Number of cycle)

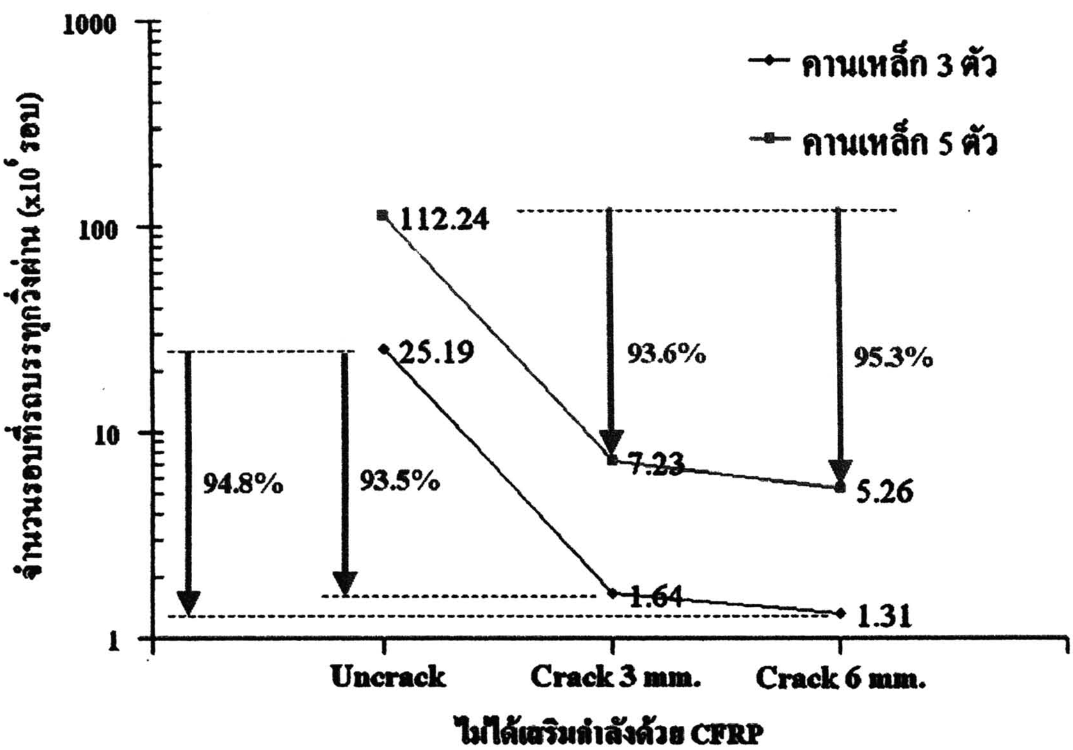
รูปแบบสะพาน	จำนวนช่องจราจร	จำนวนคานเหล็ก	อายุ (ปี)	จำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (n)	N ($\times 10^6$ รอบ)
ไม่เสริมกำลัง Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	46	0.5	25.19
		5	205	0.5	112.24
ไม่เสริมกำลัง Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	0.5	3	1.64
		5	3.3	2	7.23
ไม่เสริมกำลัง Crack 6 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	0.4	3	1.31
		5	2.4	2	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
CFRPcomposite deck Uncrack	2 (สวนทางกัน)	3	508	0.5	278.13
		5	1,046	0.5	572.69
CFRPcomposite deck Crack 3 mm.	2 (สวนทางกัน)	3	3.8	2	8.32
		5	13.0	2	28.47
CFRPcomposite 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 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย จะให้ค่าจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานคอมโพสิต มีค่าเพิ่มมากขึ้น

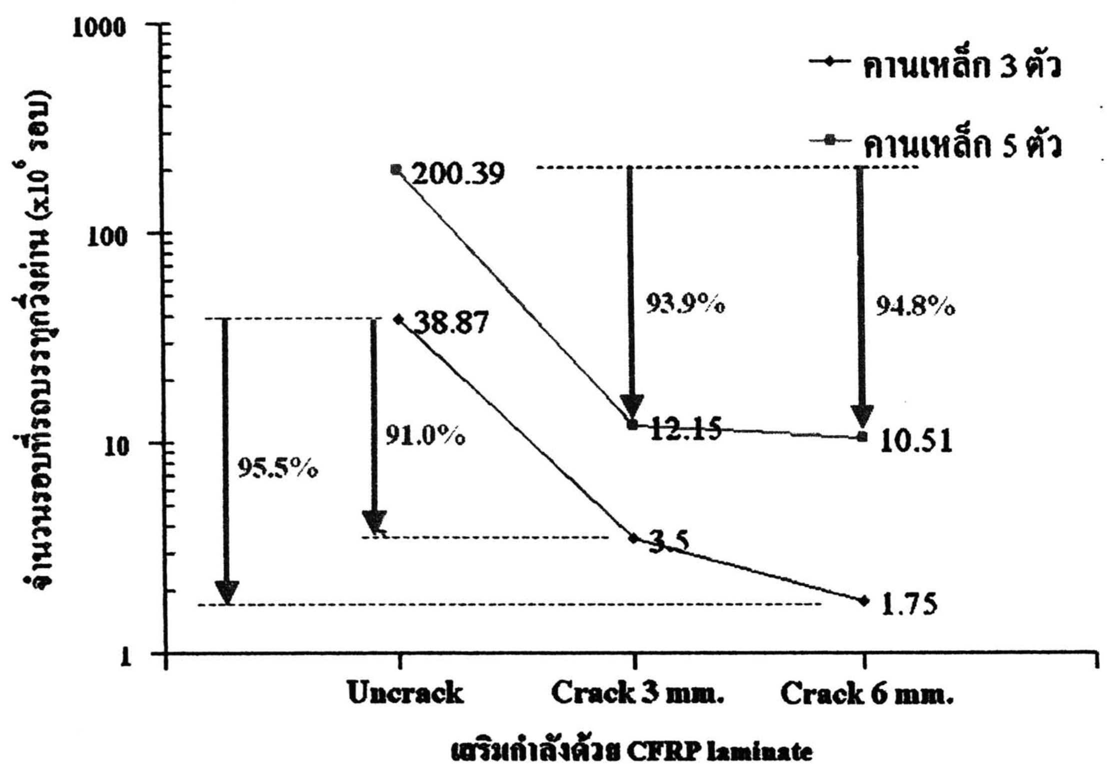
ตารางที่ 5.13 ค่าคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลัง กับกรณีที่เสริมกำลังด้วย CFRP

รูปแบบรอยร้าว	ชนิดของสะพาน		ไม่เสริมกำลัง	CFRP laminate		CFRP composite deck	
			N ($x10^6$ รอบ)	N ($x10^6$ รอบ)	เพิ่มขึ้น (%)	N ($x10^6$ 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

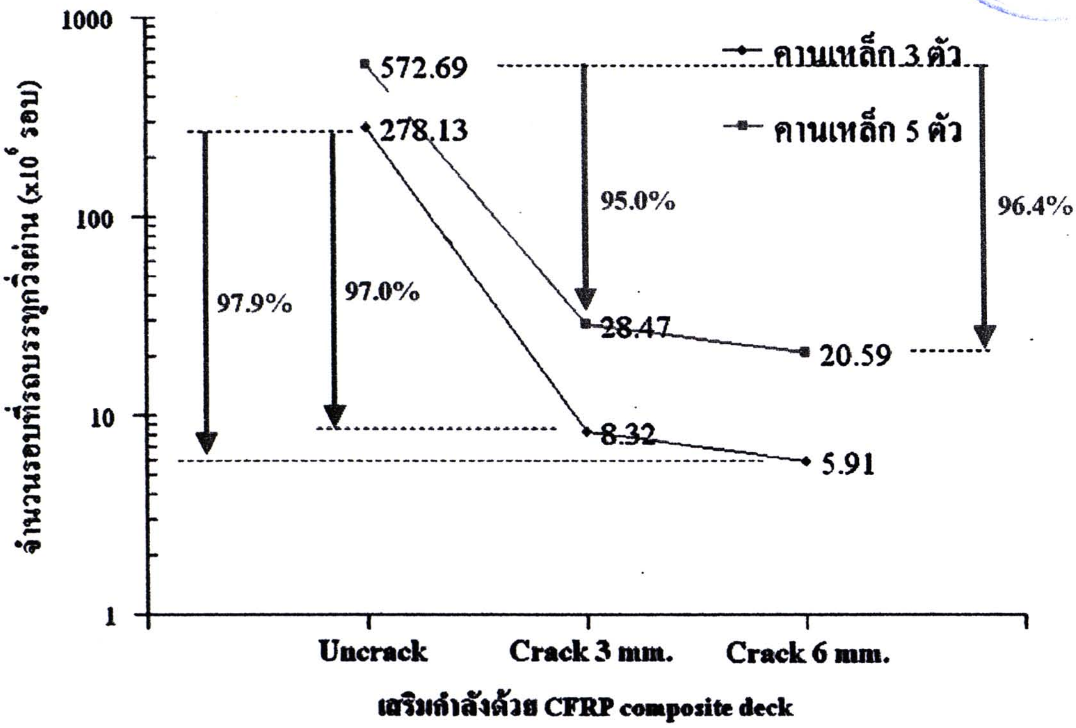
ภาพที่ 5.51 ถึง 5.53 เป็นกราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานกับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง เสริมกำลังด้วย CFRP laminate และเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck ซึ่งกรณีที่สะพานคอมโพสิตที่ไม่มีรอยร้าวจะมีจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพาน ที่มากกว่า กรณีที่สะพานคอมโพสิตมีรอยร้าว 3 และ 6 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5.51 กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีไม่เสริมกำลัง



ภาพที่ 5.52 กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP laminate



ภาพที่ 5.53 กราฟเปรียบเทียบจำนวนรอบที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน กับความเสียหายเริ่มต้นขนาดต่าง ๆ กรณีเสริมกำลังด้วย CFRP composite deck