



ประสิทธิภาพของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการลดระดับความเครียดของสะพานแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (PC-Plank Girder) ภายใต้น้ำหนักบรรทุก

ปรัชญา ยอดดำรงค์¹ ชิชญาส์ บุญมี^{2*} และ กิตติภูมิ รอดสิน³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาครุศาสตร์โยธา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 18 มีนาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 27 มีนาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างแผ่นพื้นของสะพานข้ามคลองแพรกสี จ.สมุทรสงคราม เนื่องจากสะพานมีการใช้งานมาอย่างยาวนาน จึงได้ทำการตรวจสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ด้วยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสมือนจริง ผลของการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymers: CFRP) จากผลของการเสริมกำลังโครงสร้างโดยการติดตั้งแผ่น CFRP จำนวน 2 ชั้น พบว่า การเสริมกำลังสามารถทำให้ระดับค่าความเครียดและการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางแผ่นพื้นใต้สะพานโดยรวมมีค่าลดลงร้อยละ 4.33 สำหรับความเครียดและ 3.68 สำหรับการแอ่นตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP สามารถช่วยในการลดระดับความเครียด และการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกได้ และจากการประเมินค่าโมเมนต์ตัดในโครงสร้างสะพานส่วนบนโดยวิธี LRFR ค่า Rating Factor (RF) ทั้งระดับ Inventory และระดับ Operation พบว่าหลังเสริมกำลังด้วย CFRP สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 35 แสดงว่า สะพานยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้น โดยไม่เกิดการวิบัติและสามารถใช้สะพานได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: การทดสอบสะพาน; เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์; การเสริมกำลัง

The Performance of Carbon Fiber in Decreasing the Strain Level of the PC-Longitudinal Bridge (PC-Plank Girder) under Service Load

Pruchaya Yoddumrong¹, Chichaya Boonmee^{2*} and Kittipoom Rodsin³

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Bangkok

² Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th

Received: 26 June 2023; Revised: 18 March 2024; Accepted: 27 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: This research focuses on studying the effectiveness of carbon fiber reinforcement in increasing the strength of the floor structure of the bridge over the Canal Phrae Kluang, Samut Songkhram Province. Due to the prolonged use of the bridge, an inspection and evaluation of the load-bearing capacity of the bridge were conducted through quasi-static load tests. The results of the structural strength assessment were used in the design of structural reinforcement using Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP). From the results of the reinforcement with the installation of two layers of CFRP, it was found that the reinforcement could reduce the levels of stress and deformation in the middle area of the bridge floor by 4.33% for stress and 3.68% for deformation. This demonstrates that CFRP reinforcement can help in reducing the levels of stress and deformation caused by increased load, and from the assessment of the moment capacity in the upper bridge structure using the LRFR method, both at the Inventory and Operation levels, it was found that after reinforcement with CFRP, the bridge can withstand an increased load capacity by 35%. This indicates that the bridge can still handle an increased load without experiencing failure and can be used safely.

Keywords: Bridge Load Test; Carbon Fiber Reinforced Polymer; Strengthening



1. บทนำ

ในปัจจุบันสะพานเป็นโครงสร้างที่ถูกใช้งานไม่น้อยไปกว่าถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง และสะพานยังช่วยให้สามารถเดินทางไปยังแหล่งต่างๆที่เข้าถึงได้ยาก เช่น การข้ามแม่น้ำ หรือการใช้ข้ามผ่านถนนตามแยกต่างๆ เป็นต้น จากการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันอันเนื่องมาจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและความเจริญของประเทศ ทำให้สะพานหรือโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสะพานถูกใช้มาอย่างยาวนานนั้น ต้องมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน อีกทั้งยังมีการฝ่าฝืนข้อกฎหมายของน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานของสะพาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อกรรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานทำให้สะพานมีอายุการใช้งานที่สั้นลงกว่าที่ได้ถูกออกแบบไว้ ดังนั้นการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทำให้เรามั่นใจว่า สะพานที่ใช้งานในปัจจุบันนั้นมีความปลอดภัยเพียงพอหรือไม่ อย่างเช่นในงานวิจัยของ Sukit et al [1] ที่ได้ทำการประเมินความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจรของโครงสร้างสะพานโดยวิธี Load and Resistance Factor Rating (LRFR) โดยในงานวิจัยได้ใช้พาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกลงเพลาก็คงว่าที่ได้กำหนดโดยสะพานที่ใช้ในการศึกษาเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรง (Plank Girder) ช่วงความยาว 9 เมตร จากการศึกษพบว่าโครงสร้างสะพานส่วนบนมีค่า Shear และ Moment Rating Factor เท่ากับ 11.69, 4.28 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 1 โดยสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย แต่โครงสร้างส่วนล่างมีค่า Shear Rating Factor เท่ากับ 0.83 มีค่าน้อยกว่า 1 ทำให้สะพานไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาได้และสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง [2] ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม

การรับแรงของสะพานข้ามคลองลาดน้ำ ไทร และสะพานข้ามคลองต่างๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Load Test) [3-10] เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างคานสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานจริง อีกทั้งยังได้มีการปรับปรุงโครงสร้างสะพานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะพานโดยการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เสริมโพลีเมอร์ ตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 [11] จากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมา [12-15] พบว่า การติดตั้ง CFRP มีผลทำให้การรับกำลังดัดของคานสูงขึ้นและช่วยลดการแตกร้าวในคอนกรีต และพบว่าเมื่อนำ CFRP มาเสริมกำลังในท้องพื้นสะพาน ทำให้เกิดค่าความเครียดใต้พื้นสะพานลดลงเมื่อโครงสร้างพื้นสะพานรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างคานสะพานอีกครั้งภายหลังการเสริมกำลังด้วย CFRP เสร็จสิ้น

2. วิธีการวิจัยและตัวอย่างการทดสอบ

2.1 วิธีการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างสะพาน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาดต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างด้วยทฤษฎีทางโครงสร้างต่าง ๆ และการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์การวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักอันแท้จริงของสะพาน และการประมาณอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของสะพาน จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีผลต่อการรับแรงของโครงสร้างสะพานอย่างละเอียด วิธีการที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันก็คือ การใช้ผลการทดสอบ

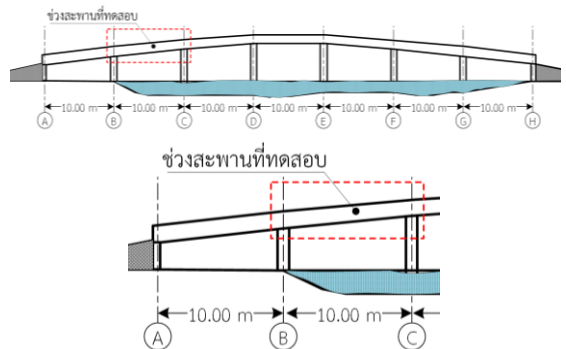


น้ำหนักบรรทุกทุกจริง (Load Test) ในการศึกษา ใช้วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจริงของสะพานทั้งแบบสถิต (Static) การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานนั้นจะดำเนินการโดยวิธี Bridge Diagnostics Instruments Test (BDI) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ที่พัฒนาขึ้นมาจากความต้องการทราบถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างจริงว่ามีค่าเป็นเท่าใด โดยการประยุกต์หลักการพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นและความเครียดในตัวโครงสร้างเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำทดสอบน้ำหนักบรรทุกจรประกอบไปด้วย การติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด เครื่องมือวัดการแอ่นตัว และเครื่องมือวัดความเร่งที่มีความแม่นยำสูงในบริเวณจุดที่สำคัญตลอดช่วงความยาวของสะพานเครื่องมือที่ใช้สามารถที่จะแปลงสัญญาณที่ได้จากการวัดออกมาในรูปของคลื่นไฟฟ้าไปยังส่วนบันทึกข้อมูลซึ่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะมีลักษณะเฉพาะสำหรับสะพานแต่ละแบบที่มีความแตกต่างกันในเรื่องวัสดุ ระบบโครงสร้าง ช่วงความยาว สภาพการยึดรั้งของจตุรรองรับ โดยข้อมูลต่างๆ จะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบ ซึ่งค่าเหล่านี้จะใช้ประกอบในการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนัก โดยมีรูปแบบช่วงสะพานที่ทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 1

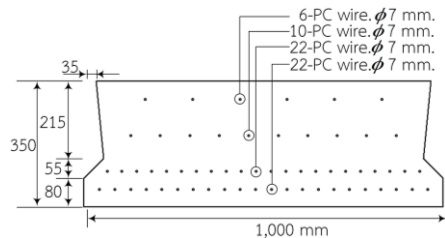
2.2 ตัวอย่างการทดสอบ

ในการทดสอบโครงสร้างพื้นสะพานได้แสดงตำแหน่งช่วงสะพานในการทดสอบไว้ในรูปที่ 1 โดยลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสะพานมีความยาวช่วง 7 ช่วง โดยในแต่ละช่วงยาว 10 เมตร โดยมีแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

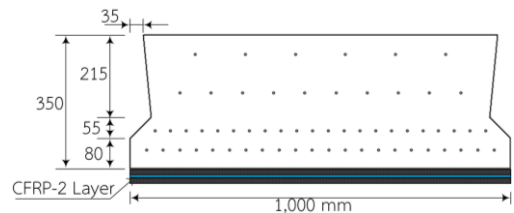
(PC.PLANK GIRDER) วางบนคานสะพาน โดยรายละเอียดหน้าตัดสะพานได้แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีขนาดหน้าตัดของ PC.PLANK GIRDER เท่ากับ 0.35x1.00 เมตร มีความยาว 10 เมตร โดยมีคุณสมบัติของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ดังแสดงดังรูปที่ 3 มีสมบัติของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 1 ตำแหน่งสะพานสำหรับทำการทดสอบ



รูปที่ 2 รายละเอียดหน้าตัด PC- PLANK GIRDER



รูปที่ 3 รายละเอียดหน้าตัด PC- PLANK GIRDER ที่เสริมกำลังด้วย CFRP



ตารางที่ 1 สมบัติของ PC - Longitudinal Bridge

รายการ	ปริมาณ
Section Area, (mm ²)	327.6 x10 ³
Moment of Inertia, (mm ⁴)	3,417 x10 ⁶
กำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c)	350 ksc
กำลังที่จุดครากของลวดอัดแรง (f_{py})	14,399 ksc
มอดุลัสยืดหยุ่น (E_s), (ksc)	2.04x10 ⁶
ความเครียดที่จุดคราก (ϵ_{ps})	0.007
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดอัดแรง	7 มิลลิเมตร
จำนวนลวดอัดแรง	60 เส้น

ตารางที่ 2 สมบัติของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในการเสริมกำลัง

รายการ	ปริมาณ
ความหนา (t_f)	0.16 mm.
ความเค้นดึงประลัย (f_{fu}^*)	38,000 ksc
มอดุลัสยืดหยุ่น (E_f)	2,270,000 ksc
ความเครียดที่จุดแตกหัก (ϵ_{fu}^*)	0.0167

2.3 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย





ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการตรวจสอบเพื่อหาค่าการแอ่นตัว (Deflection) ค่าความเครียด (Strain) ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) โดยได้สรุปอุปกรณ์ต่างๆไว้ในตารางที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้ Strain Gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการเสียรูปของโครงสร้าง โดยวัดการยืดหดตัวของโครงสร้าง โดยกำหนดให้ เครื่องหมาย - เป็นการหดตัว และถ้าเครื่องหมาย + เป็นการยืดตัวของโครงสร้าง, LVDT (Linear Variable Displacement

Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการเสียรูปโดยวัดค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง อาศัยการเคลื่อนตัวเข้า - ออกของการตรวจวัด ที่สัมผัสกับโครงสร้างที่ต้องการทราบค่าการเคลื่อนที่, Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเร่งของการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยอาศัยหลักการที่เมื่ออุปกรณ์เกิดการสั่นไหวจะทำให้วงจรไฟฟ้าที่อยู่ภายในอุปกรณ์มีค่าความต้านทานหรือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากนั้นจึงประเมินค่าความเร่งจากสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ดังกล่าว อุปกรณ์ Accelerometer จะใช้ในการวัดระดับการสั่นไหวและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง และส่วนอุปกรณ์ Data Logger ชนิดไร้สายสำหรับบันทึกข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บและแปลงข้อมูลจาก จากเซ็นเซอร์เข้ามาในรูปแบบของสัญญาณ Analog และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณ Digital ซึ่งสามารถส่งต่อไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผล โดยรูปที่ 4 ได้แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพานบริเวณท้องแผ่นดินสะพาน



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพานใต้แผ่นดินสะพาน

ตารางที่ 3 Specifications of sensors

Name	Sensor	Specifications
Strain gauge		Gauge length: -2000 to +2000 micro strain
Displacement sensor		Full scale length: 50 mm
Accelerometer		Integrated 3-axis high performance accelerometer Adjustable input range: 8G
Data Logger		Wireless Sensor

3. ผลการทดสอบ

ในการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานก่อนเสริมและหลังเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์นี้ ได้ทำการทดสอบในสภาวะสถิต (Static Load Test) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้ง (LVDT) เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัว และติดตั้ง strain gauge (SG) เพื่อตรวจวัดค่าการยืดหดตัวที่ผิวท้องคานสะพาน โดยมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถออกเป็น 2 ช่องทางเดินรถ ในการทดสอบนี้ใช้รถบรรทุกชนิด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น จำนวน 2 คัน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรถบรรทุกในการทดสอบนี้มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 25 ตันต่อคัน ในการวิจัยนี้ได้ใช้รถบรรทุก 2 คัน เคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 2 ช่องทาง โดยไปจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 ตามแนวเส้นประใน 1 ช่วงความยาวสะพาน โดยในการทดสอบกรณีนี้จะมีน้ำหนักบรรทุกบนสะพานมากที่สุด ดังนั้นจึงเป็นกรณีที่แสดงออกถึงขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

ของสะพานที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดและในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้แบ่งหัวข้อการอธิบายผลการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการติดตั้ง Strain gauge สำหรับวัดการยืดหดตัวที่ผิวคอนกรีตบริเวณใกล้กับฐานรองรับของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต และบริเวณกึ่งกลางคานของคานสะพานคอนกรีต เพื่อตรวจสอบว่าสะพานเป็นระบบคานต่อเนื่องหรือเป็นแบบคานช่วงเดียว จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานของคานสะพานคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกทำให้เกิดการยืดตัวที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต มีค่าเป็นบวก มีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 46 micro-strain (Tensile Strain) และค่าความเครียด (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณใกล้กับ

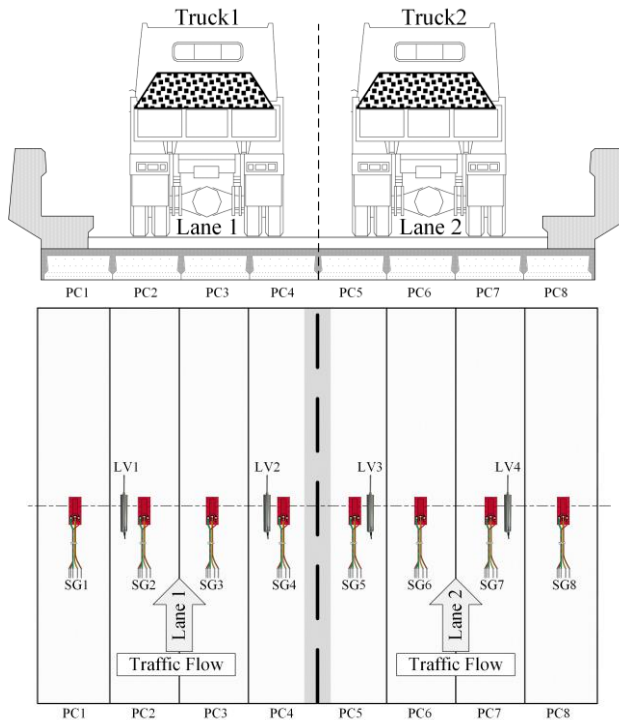


ฐานรองรับของแผ่นพื้นสะพานคอนกรีต ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8 micro-strain (Tensile Strain) ดังแสดงในรูปที่ 6 จากผลของความเครียดที่เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าจุดรองรับของพื้นสะพานเป็นแบบยึดหมุนโดยสมบูรณ์

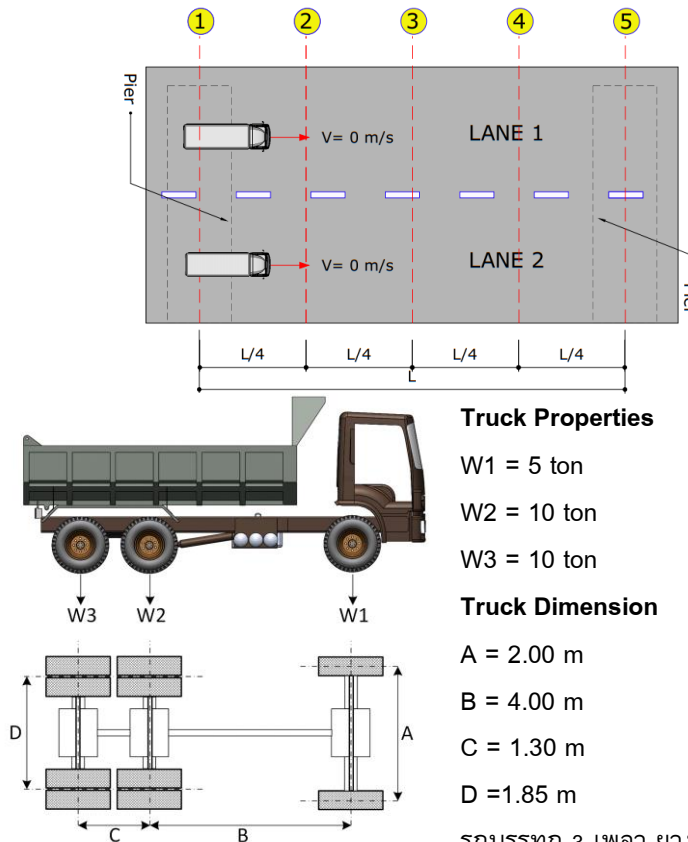
3.2 ผลการทดสอบแบบสถิตศาสตร์หลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์

จากผลการทดสอบพบว่า หลังจากที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ไปตรงตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางสะพาน พบว่าค่าการยืดหดตัว (Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานของพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรง ภายใต้ผลของน้ำหนักบรรทุกที่ใหญ่หนึ่งตรงตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน มีความเครียดสูงสุดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 44.12 micro-

strain ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสะพานก่อนเสริมกำลัง ซึ่งมีค่าความเครียดเฉลี่ยเท่ากับ 46.12 micro-strain โดยมีค่าความเครียดลดลงหลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP ร้อยละ 4.33 ดังแสดงในรูปที่ 7 และทำให้ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางสะพานมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.83 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสะพานก่อนเสริมกำลังซึ่งมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.90 มิลลิเมตร โดยมีค่าการแอ่นตัวลดลงหลังจากการเสริมกำลังด้วย CFRP ร้อยละ 3.68 ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 จากผลการทดสอบทั้งหมดได้สรุปเป็นตารางที่ 4 โดยจะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP ทำให้ค่าความเครียดและการแอ่นตัวบริเวณท้องสะพานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

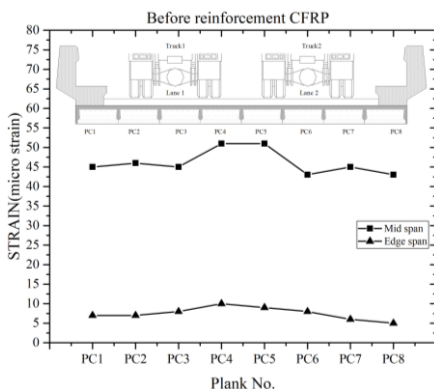


รูปที่ 5 ตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับการทดสอบ

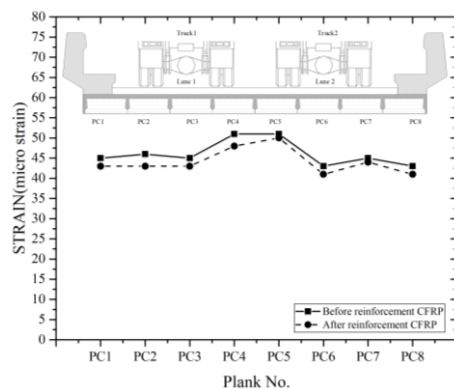


รถบรรทุก 3 เพลา ยาง 10 เส้น น้ำหนัก 25 ตัน

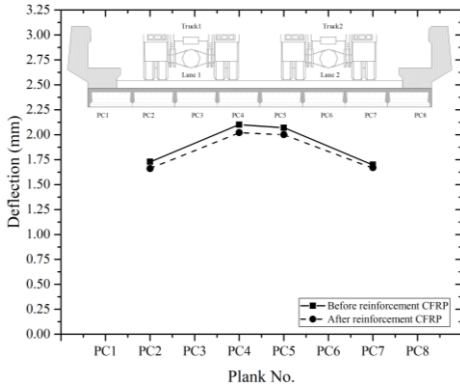
รูปที่ 6 ตำแหน่งการเดินรถบรรทุกสำหรับการทดสอบแบบสถิตย์และรายละเอียดน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณใกล้ฐานรองรับ ก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP



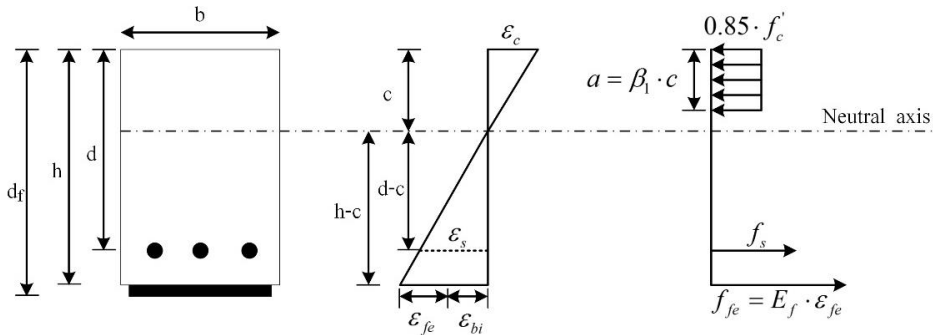
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางสะพาน ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วย CFRP



ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบระยะแอนตัวและค่าความเครียด ของสะพาน

รายการ	ก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP	หลังเสริมกำลังด้วย CFRP
ระยะแอนตัว (mm)	1.90	1.84
ค่าความเครียด $\mu\epsilon$	46.12	44.12

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบระยะแอนตัวบริเวณกึ่งกลางสะพาน ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วย CFRP



รูปที่ 10 การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและความเค้นภายในของหน้าตัดคานภายใต้การตัด

4. การทำนายเชิงทฤษฎีของพฤติกรรมรับแรงตัด เนื่องจากการเสริมกำลังด้วยเส้นใย CFRP

ในส่วนนี้เป็นขั้นตอนการคำนวณตามทฤษฎีโดยใช้วิธีการที่ยึดตามสมการ ACI-440 เป็นหลัก ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการต้านทานโมเมนต์ดัดและความเครียดของการเสริมกำลังด้วย CFRP ทำให้แผ่นพื้นสะพานมีความแข็งแรงขึ้น

4.1 หลักการเสริมกำลังรับแรงตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเส้นใย

หลักการเสริมกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเหมือนกับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง กล่าวคือโมเมนต์ต้านทานสูงสุดที่ได้จากการออกแบบ (M_n) เมื่อคูณตัวลดกำลัง (ϕ) แล้วจะต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดปรัลย (M_u) ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\phi M_n \geq M_u \quad (4.1)$$



โดยที่

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + (\psi_f \cdot M_{nf})]$$

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s \cdot \left[d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right]$$

$$M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left[d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right]$$

โดยที่

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor) มีค่าเท่ากับ 0.90

M_n คือ โมเมนต์ดัดต้านทานสูงสุดที่ได้จากการออกแบบ

M_u คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

M_{ns} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานเนื่องจากเหล็กเสริม

M_{nf} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเนื่องจากเส้นใยที่ใช้เสริมกำลัง

ψ_f คือ ตัวคูณลดกำลัง (Strength reduction factor) มีค่าเท่ากับ 0.85

4.2 ระดับค่าความเครียดที่ใช้ออกแบบ

ค่าความเครียดที่ใช้ออกแบบการเสริมกำลังด้วยเส้นใยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

4.2.1 ค่าความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (ϵ_{bi})

โดยค่าความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (h - kd)}{I_{cr} \cdot E_c} \quad (4.2)$$

โดยที่

ϵ_{bi} คือ ความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

M_{DL} คือ โมเมนต์ดัดประลัยเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ($kN \cdot mm$)

h คือ ความลึกของหน้าตัดคาน (mm)

k คือ ตัวคูณระยะระหว่างศูนย์ถ่วงแรงอัดในคอนกรีต

$$k = \left[\sqrt{(\rho n)^2 + (2 \cdot \rho \cdot n)} \right] - (\rho n)$$

d คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดจากผิวบนมาถึงเหล็กเสริมรับแรงดึง (mm)

I_{cr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงรัว (mm^4)

E_c คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
 $= 15,100 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ MPa}$

4.2.2 ความเครียดก่อนการหลุดล่อนของเส้นใย CFRP

เพื่อป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของเส้นใย ดังนั้น ค่าความเครียดของเส้นใยจะถูกควบคุมไว้ตามสมการที่ 4.3

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n_f \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (4.3)$$

โดยที่

ϵ_{fd} คือ ความเครียดก่อนการหลุดล่อนออกของเส้นใย

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

n_f คือ จำนวนชั้นการติดตั้งของเส้นใย

E_f คือ มอดุลัสความยืดหยุ่นของเส้นใย (MPa)

t_f คือ ความหนาของเส้นใย (mm)

ϵ_{fu} คือ ความเครียดของเส้นใย



4.2.3 ความเครียดประสิทธิผลของเส้นใย CFRP

จากสมการที่ 4.3 หมายความว่าค่าความเครียดของเส้นใยเพื่อป้องกันการวิบัติจากการแตกหลุดล่อนต้องมีค่าน้อยกว่า ค่าความเครียดของเส้นใยที่ใช้ออกแบบคูณกับตัวลดกำลัง ดังนั้นค่าความเครียดประสิทธิผลที่ใช้ออกแบบ ใช้สมการที่ 4.4 แต่ถ้ามสมการที่ 4.4 มีค่ามากกว่าสมการที่ 4.3 ให้ใช้สมการที่ 4.3 สรุปคือให้ใช้ค่าความเครียดของเส้นใยที่น้อยที่สุดเป็นค่าควบคุมในการออกแบบ

$$\varepsilon_{fe} = \left[\left(\varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) \right) - \varepsilon_{bi} \right] \leq \varepsilon_{fd} \quad (4.4)$$

โดยที่

ε_{fe} คือ ความเครียดประสิทธิผลของเส้นใย

ε_{cu} คือ ความเครียดประลัยของคอนกรีต
= 0.003

d_f คือ ความลึกจากผิวคานบนลงมาถึงระยะที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย (mm)

c คือ ระยะจากผิวที่เกิดแรงอัดสูงสุดไปยังแนวแกนสะเทินของหน้าตัดคาน (mm)

ε_{bi} คือ ความเครียดคงค้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

ε_{fd} คือ ความเครียดก่อนการหลุดล่อนออกของเส้นใย

4.3 ความเค้นประสิทธิผลที่ใช้ออกแบบการเสริมกำลังด้วยเส้นใย

ความเค้นประสิทธิผลของการเสริมกำลัง เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่เพิ่มขึ้นก่อนที่หน้าตัดคาน เกิดการวิบัติเนื่องจากการตัด สามารถหาได้จากระดับของความเครียดในเส้นใยที่สมมุติให้อยู่ในช่วงของพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ตามสมการที่ 4.5

จากสมการตั้งที่กล่าวมาได้ทำการคำนวณโดยสรุปไว้ในตารางที่ 5 และจากการคำนวณการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของสะพาน ก่อนและหลังเสริมกำลังความแข็งแรงให้กับโครงสร้างใต้ท้องพื้นสะพานด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดในพื้นที่สะพานเพิ่มขึ้นหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP ร้อยละ 21.05 คิดเป็น 1.21 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการเพิ่มโมเมนต์ดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลัง CFRP

รายการ	ปริมาณ
ε_{bi}	= 0.0012
ε_{fd}	= 0.0285
$0.9\varepsilon_{fu}$	= 0.0128
ε_{fe}	= 0.0088
ψ_f	= 0.85
β_1	= 0.82
f_{fe}	= 20,002 ksc
f_{ps}	= 2,234.82 ksc
A_{ps}	= 184.73 cm ²
A_f	= 19.20 cm ²
Effective depth, d	= 32 cm
d_f	= 35 cm
c	= 14.53 cm

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (4.5)$$

โดยที่

f_{fe} คือ ความเค้นประสิทธิผล (MPa)

E_f คือ มอดุลัสความยืดหยุ่นของเส้นใย (MPa)

ε_{fe} คือ ความเครียดประสิทธิผลของเส้นใย



ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดของสะพาน

รายการคำนวณ	ก่อนเสริม	หลังเสริม
การเสริมกำลัง	CFRP	CFRP
กำลังรับโมเมนต์ดัด (kN-m)	4,421	5,351

5. การประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน

การประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพานสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของโครงสร้างหลัก ประกอบด้วย โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) โดยโครงสร้างส่วนบนได้ทำการประเมินในรูปของค่า Rating Factor (RF) ตามมาตรฐาน Load and Resistance Factor Rating (LRFR) ของ AASHTO และโครงสร้างส่วนล่างทำการประเมินในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลัง (Capacity) และภาระ (Demand) ในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างหรือที่เรียกว่า C/D Ratio (Capacity/Demand Ratio) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) เท่านั้น เนื่องจากเป็นการเสริมกำลังที่ได้ท้องพื้นสะพาน โดยจะประเมินความปลอดภัยจากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ทารด้วยน้ำหนักบรรทุกที่อยู่บนสะพานโดยใช้สมการตาม 5.1 [15] โดยมาตรฐานของ AASHTO (LRFD) ได้จำแนก ระดับ ของ การประเมินความปลอดภัยออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่

ระดับ Inventory เป็นการประเมินในระดับขั้นตอนการออกแบบที่สะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจร HL-93 ตามอายุที่ออกแบบไว้ได้อย่างปลอดภัย และระดับ Operation เป็นการประเมินในระดับการใช้งานภายใต้รูปแบบของน้ำหนักบรรทุกจร HL-93

$$RF = \frac{[\phi M_n - (\gamma_{DC} \cdot M_{DL}) - \gamma_{DW} \cdot M_{DW}]}{\gamma_{LL} \cdot (M_{LL} + IM_{LL})} \quad (5.1)$$

โดยที่

$$\phi = 0.9$$

$$\gamma_{DC} = 1.25$$

$$\gamma_{DW} = 1.50$$

$$\gamma_{LL(INV)} = 1.75$$

$$\gamma_{LL(OPE)} = 1.35$$

M_{DL} คือ โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ($kN \cdot m$)

M_n คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดก่อนเสริมกำลังด้วย CFRP ($kN \cdot m$)

M_{DW} คือ โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของผิวจราจรและ Barrier ($kN \cdot m$)

M_{LL} คือ โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกจร ($kN \cdot m$)

$$I = 0.33$$

ค่าตัวแปรที่ใช้ในการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพานโดยนำมาจากการคำนวณการรับโมเมนต์ดัดของสะพานทั้งก่อนและหลังเสริมโดยได้สรุปไว้ในตารางที่ 7



ตารางที่ 7 สรุปค่าตัวแปรที่ใช้ในการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน

Moment	ปริมาณ
M_n ก่อนเสริมกำลัง	= 4,421 kN-m
M_n หลังเสริมกำลัง	= 5,351 kN-m
M_{DL}	= 1,177 kN-m
M_{DW}	= 98 kN-m
M_{LL}	= 893.45 kN-m

ในตารางที่ 8 เป็นตารางแสดงค่า Rating Factor ที่ระดับ Inventory และระดับ Operation ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่า RF มากกว่า 1 แสดงให้ทราบถึง โครงสร้างสะพานส่วนบนมีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกจรที่ทำการทดสอบได้อย่างปลอดภัย

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบเพื่อประเมินความสามารถของสะพานในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานก่อนและหลังการเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (CFRP) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (CFRP) สามารถทำให้ระดับค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางแผ่นใต้พื้นสะพานโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนสามารถช่วยในการลดระดับความเครียดใต้ท้องพื้นสะพานที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรได้

ตารางที่ 8 ค่า Rating factor ของโมเมนต์ดัดในโครงสร้างสะพานส่วนบน ช่วงความยาวสะพาน 10 เมตร

ระดับ	ก่อนเสริม	หลังเสริม
	CFRP	CFRP
Inventory	1.14	1.54
Operation	1.47	1.99

2. หลังเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ ค่าการแอ่นตัวบริเวณกึ่งกลางสะพานโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน สามารถช่วยในการลดระดับการแอ่นตัวของแผ่นพื้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรได้

3. หลังจากรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน (Unloading) พบว่ามีการคืนตัวเมื่อพิจารณาค่าความเครียดและรวมถึงค่าการแอ่นตัวของสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกไม่พบการคงค้างของค่าการตอบสนองที่แสดงถึงการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) โดยโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบโดยรวมมีการตอบสนองอยู่ในช่วง Elastic

4. จากการเสริมกำลังด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนเสริมโพลีเมอร์ (CFRP) ทำให้สะพานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเพิ่มร้อยละ 21.05

5. จากการประเมินขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานโดยวิธี LRFR ค่า Rating Factor (RF) ทั้งระดับ Inventory และระดับ Operation มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า สะพานยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยไม่เกิดการวิบัติ และสามารถใช้สะพานได้อย่างปลอดภัย



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Yindeesuk, V. Nusuwan, W. Kongkaew and R. Kumpoopong, Application of assessment of the ability to withstand the live load of bridge structures by the Load and resistance factor rating (LRFR) method in applying for permission for vehicles with over-axle weight and size beyond specified limits, Civil Engineering Magazine, Engineering Institute of Thailand, Bangkok, Thailand, 2012.
- [2] W. Amornprasitpol, R. Kamphuphong, A. Monthir and A. Sawatphanit, In-situ investigation of distribution factors and impact factors for enhancing design of box beam and plank girder bridges with continuous deck slab, The National Convention on Civil Engineering (NCCE 25), Proceeding, 2020, 1-10.
- [3] Department of Rural Roads, Project to inspect and evaluate the capability of the bridge in the route RY.3031 crossroads TL.331 - TL.3191 and route TL.36 - TL.331, Pluak Daeng District, Rayong province, Department of Rural Roads, Thailand, 2020.
- [4] E. Lantsoght, C. Veen, A. Boer and D.A. Hordijk, State-of-the-art on load testing of concrete bridges, Engineering Structures, 2017, 150, 231-241.
- [5] D. Hester, J. Brownjohn, M. Bocian and Y. Xu, Low-cost bridge load test: Calculating bridge displacement from acceleration for load assessment calculations, Engineering Structures, 2017, 143, 358-374.
- [6] V. Ha Nguyen, S. Schommer, S. Maas and A. Zurbes, Static load testing with temperature compensation for structural health monitoring of bridges, Engineering Structures, 2016, 127, 700-718.
- [7] E.O.L. Lantsoght, C. van der Veen, A. de Boer and D.A. Hordijk, State-of-the-art on load testing of concrete bridges, Engineering Structures, 2017, 150, 231-241.
- [8] P. Lu, Z. Xu, Y. Chen and Y. Zhou, Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model, Engineering Structures, 2020, 214, 1-12.
- [9] A. Bayraktar, T. Turker, J. Tadla, A. Kursun and A. Erdis, Static and dynamic field load testing of the long span Nissibi cable-stayed bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 94, 136-157.
- [10] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA, 2008.



- [11] L.C. Hollaway, and H.N. Garden, An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fiber composite plates used to strengthen reinforced concrete beams, *Composite Structures*, 1998, 42, 175-188.
- [12] L. Lam and J.G. Teng, Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete, *Construction and Building Materials*, 2003, 17, 471-489.
- [13] S. Byung-Jik, L. Sang-Youl, J. Hyo-Seon, Long-term performance of a fiber-reinforced polymer slab bridge superstructure-field load test and ratings, *Composites: Part B*, 2013, 45, 644-656.
- [14] N. Graisor, and P. Chotickai, Behavior of concrete bridges strengthened with CFRP, Thesis, Kasetsart University, Thailand, 2012.
- [15] T. Pinkaew and M. Chanintonleela, Bridge design, June Publishing, Bangkok, Thailand, 2015.