

ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังสะพานคลองซับตะเคียน ด้วยการพ่นมอร์ตาร์และการดึงลวดอัดแรง Efficiency of Strengthening the Sab Takian Canal Bridge Using Shotcrete and Post-Tensioning

เมธวัฒน์ คล้ายสุบรรณ^{1*} กิตติภูมิ รอดสิน¹ สาระ กันยาหลง² ภาณุกร มหาสิลากุล² ภาธร เนืองพิช² และ ธานินทร์ นิยมสินธุ์²

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร

ศูนย์วิจัยพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง (CESD), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จ.กรุงเทพมหานคร

² ศูนย์สร้างและบูรณะสะพานที่ 3 (ปทุมธานี) สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง

*Corresponding author; E-mail address: s6703062810010@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

สะพานคลองซับตะเคียน ทล. 2247 จงโก-ลำสมพุง กม. 11+521 มีปริมาณการจราจรของรถบรรทุกหนักจากการขนส่งสินค้าจำนวนมาก ทำให้สะพานเกิดความเสื่อมสภาพจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน ทางกรมทางหลวงจึงได้ดำเนินการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการขยายขนาดหน้าตัดของสะพาน (RC-Jacketing) ของส่วนของโครงสร้างรับแรงอัด (Compression Zone) โดยการเสริมความหนาใต้พื้นสะพานด้วยการพ่นมอร์ตาร์ (Shotcrete) และ เพิ่มลวดอัดแรงในส่วนโครงสร้างรับแรงดึง (External Post-Tensioning) บริเวณใต้คานรองรับสะพาน เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานคลองซับตะเคียน ทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยวิธีการดังกล่าว โดยการประเมินสัดส่วนความปลอดภัย (Rating Factor, RF) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR เพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนความปลอดภัยก่อนและหลังการเสริมกำลัง โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกช่วงสะพานที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสมือนจริง โดยในการทดสอบจะทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน การแอ่นตัว และความเครียดของสะพาน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพานด้วยการวิเคราะห์หระเบียวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (Finite Element Analysis, FEA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนความปลอดภัยก่อนและหลังมีการเสริมกำลัง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีเสริมความหนาของโครงสร้างส่วนรับแรงอัดและการดึงลวดอัดแรงภายนอกในส่วนโครงสร้างรับแรงดึง สามารถเพิ่มค่าสัดส่วนความปลอดภัยได้นอกจากนี้ค่าความเครียดและค่าการแอ่นตัวบริเวณโครงสร้างพื้นคอนกรีตและคานคอนกรีตโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การขยายขนาดหน้าตัดของสะพาน, การพ่นคอนกรีต, การดึงลวดอัดแรงภายนอก, สัดส่วนความปลอดภัย

Abstract

The Sab Takian Canal Bridge on Highway 2247 (Chongko-Lam Som Phung), located at km 11+521, experiences heavy traffic from freight transport, leading to deterioration over its long period of service. To address this issue, the Department of Highways has undertaken structural reinforcement by expanding the bridge's cross-sectional area (RC-Jacketing) in the compression zone. This involves thickening the underside of the bridge deck using shotcrete and reinforcing the tensile zone with external post-tensioning wires installed beneath the supporting beams. These measures aim to enhance the bridge's load-bearing capacity. This research aims to evaluate the load-carrying efficiency of the Sab Takian Canal Bridge before and after the reinforcement by assessing the safety rating factor (RF) according to AASHTO LRFR standards. The study involves selecting an appropriate bridge segment for a simulated live load test. During the test, sensors are installed to measure vibration, deflection, and strain. The data collected are then used to refine a three-dimensional finite element analysis (FEA) model of the bridge. The safety rating factors (RF) before and after reinforcement are compared to determine the effectiveness of the methods applied. The findings reveal that the reinforcement techniques thickening the compression zone and applying external post-tensioning in the tensile zone significantly improve the safety rating factor. Additionally, reductions in strain and deflection values in the concrete deck and beams demonstrate that these reinforcement methods effectively enhance the bridge's load-bearing capacity.

Keywords: RC-Jacketing, shotcrete, external post-tensioning, rating factor

1. บทนำ

สืบเนื่องจาก สะพาน ทล.2247 จงโก-ลำสมพุง กม.10+500 มีการใช้งานมาเป็นเวลานาน และบริเวณใกล้เคียงมีโรงงานจำนวนมาก จึงทำให้

สะพานเป็นเส้นทางสัญจรของรถบรรทุกหนัก เป็นสาเหตุที่ทำให้สะพานมีการเกิดการเสื่อมสภาพ ทางกรมทางหลวงจึงมีความประสงค์ในการทำการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของโครงสร้างก่อนการเสริมกำลังโครงสร้าง และการตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพของสะพานภายหลังการเสริมกำลังโครงสร้าง ตามโครงการทดสอบวิเคราะห์และประเมินกำลังรับน้ำหนักสะพาน ทล.2247 จงโก-ลำสมปุง ตอนที่ 1 กม. 10+089 [1] โดยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge preload test) ก่อนการเสริมกำลังโครงสร้าง เพื่อใช้ประเมินสภาพ และวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงของสะพาน ตามสภาพการใช้งานจริงที่เป็นปัจจุบันก่อนที่จะทำการก่อนการเสริมกำลังโครงสร้าง โดยการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge load test) ของคานสะพานทั้งหมด 2 ช่วง คานโดยทดสอบกำลังรับน้ำหนักคาน ในการทดสอบจะมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดการแอ่นตัวของสะพานทั้งหมด 8 ตำแหน่ง มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเครียดทั้งหมด 26 ตำแหน่ง และมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นไหว จำนวน 4 ตำแหน่ง อันมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานจริงตามมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการขยายขนาดหน้าตัดของสะพาน (RC-Jacketing) ของส่วนของโครงสร้างรับแรงอัด (Compression Zone) โดยการเสริมความหนาใต้พื้น สะพานด้วยการพ่นมอร์ตาร์ (Shotcrete) [2],[3],[4] และ เพิ่มลวดอัดแรงในส่วนโครงสร้างรับแรงดึง (External Post-Tensioning) [5],[6],[7] บริเวณใต้คานรองรับสะพาน เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพาน

ผลของการทดสอบ ถูกนำมาประเมินสัดส่วนความปลอดภัย ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR [8] และเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเสริม

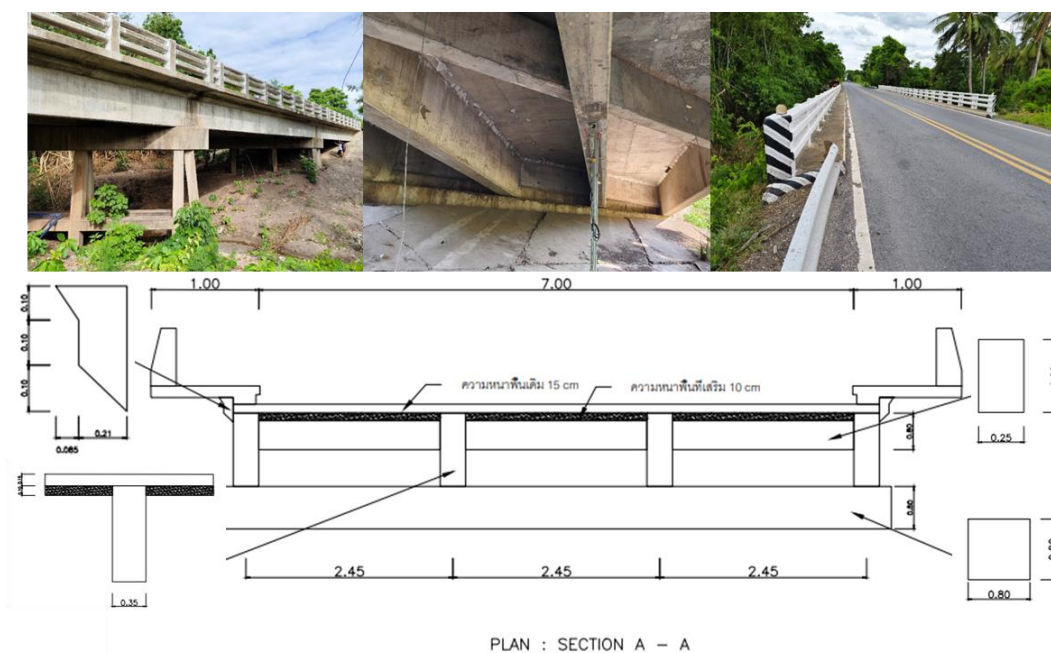
กำลังโครงสร้าง ข้อมูลจากการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนความปลอดภัยที่ได้จะบ่งบอกถึงระดับความมั่นคงแข็งแรงของสะพานที่เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ใช้งานสะพาน

2. สะพานทดสอบและการเสริมกำลัง

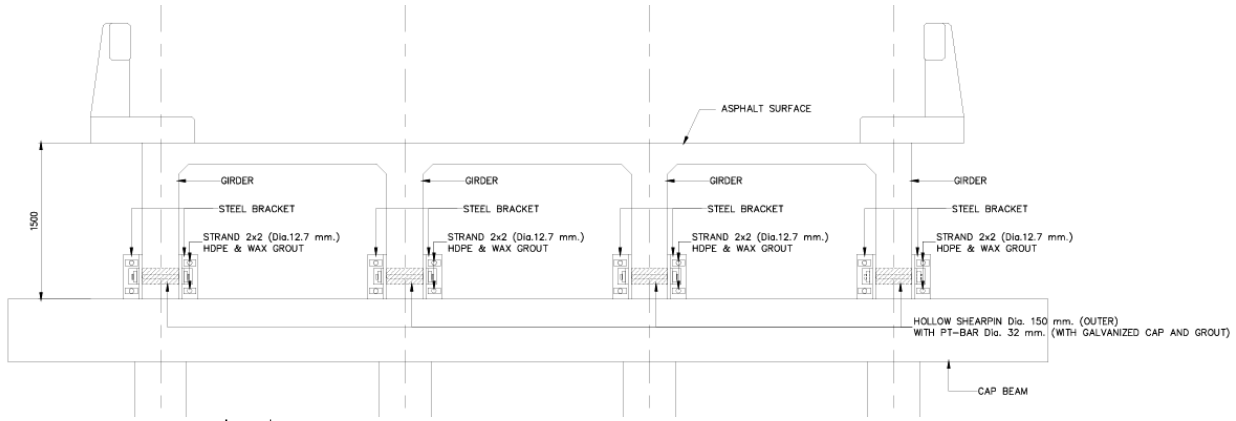
ในการการตรวจวัดสะพานคลองซับตะเคียน ตำบลซับตะเคียน อำเภอบางบาล จังหวัด ลพบุรี เป็นสะพาน Concrete T-Girder โดยช่วงที่ทำการตรวจวัดพฤติกรรมจะมีความยาวระหว่างจุดรองรับโดยเฉลี่ยประมาณ 15 เมตร และมีความกว้างโดยเฉลี่ยประมาณ 7.00 เมตร แสดงดังรูปที่ 1 และมีการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานด้วยการขยายหน้าตัดของสะพาน(RC-Jacketing) ของส่วนของโครงสร้างรับแรงอัด (Compression Zone) โดยการเสริมความหนาใต้พื้นสะพานด้วยการพ่นมอร์ตาร์(Shotcrete) และ เพิ่มลวดอัดแรงในส่วนโครงสร้างรับแรงดึง (External Post-Tensioning) บริเวณใต้โครงสร้างคานรองรับสะพาน

2.1 การพ่นมอร์ตาร์ (Shotcrete)

คือวิธีการก่อสร้างที่ใช้การส่งคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ในลักษณะพลาสติกผ่านท่อส่งด้วยแรงดันสูง แล้วพ่นออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงไปยังพื้นผิวเป้าหมาย โดยไม่ต้องใช้แบบหล่อ (formwork) ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างพื้นเก่าเนื่องจากงานตั้งแบบเพื่อหล่อพื้นในโครงสร้างที่สร้างเสร็จแล้วสามารถทำได้ยากและยังมีค่าใช้จ่ายที่สูง โดยมีการเสริมกำลังด้วยความหนา 15 cm และมีกำลังอัดอยู่ที่ 300 ksc



รูปที่ 1 สะพานที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 2 เพิ่มลวดอัดแรงในส่วนโครงสร้างรับแรงดึง (External Post-Tensioning) บริเวณใต้คานรองรับสะพาน

2.2 การเพิ่มลวดอัดแรงภายนอก (External Post-Tensioning)

คือวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตโดยการติดตั้งลวดหรือเคเบิลอัดแรง (tendons) ภายนอกชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยไม่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต แต่จะยึดด้วยระบบสมอ (anchorages) และอุปกรณ์รองรับ (saddles หรือ deviators) เพื่อถ่ายแรงอัดกลับเข้าสู่โครงสร้าง โดยมีรายละเอียดของการเสริมกำลังแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดเสริมกำลังด้วยการเพิ่มลวดอัดแรงในโครงสร้างรับแรงดึง

เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดอัดแรง	7 x 12.7 mm
กำลังดึงสูงสุด	1860 MPa
แรงดึงที่ใช้ในการดึงลวด	579.6 kN

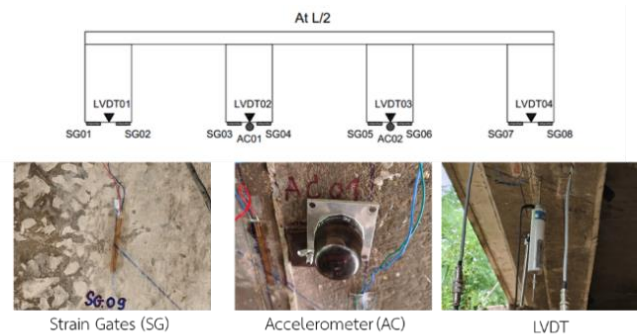
3. วิธีการวิจัย

ในการประเมินประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของสะพานคลอง ขับตะเคียนและแบ่งย่อยเป็นกระบวนการโดยจะมีการทดสอบสะพาน เพื่อให้ได้ผลของพฤติกรรมของสะพานที่เกิดขึ้นในสภาวะปัจจุบันเพื่อนำผลที่ได้จากการตรวจวัดไปแบบแก้แบบจำลองของสะพานเพื่อวิเคราะห์สัดส่วนความปลอดภัยก่อนและหลังการเสริมกำลัง

3.1 การทดสอบสะพาน (Load test)

ในขั้นตอนนี้จะทำการติดตั้งเซนเซอร์ Accelerometer เพื่อตรวจวัดการสั่นสะเทือน เซนเซอร์ LVDT เพื่อตรวจวัดการแอ่นตัว และเซนเซอร์ strain gates เพื่อตรวจวัดความเครียดของโครงสร้างคานรองรับสะพาน โดยอุปกรณ์สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล (Data logger) เป็นผลิตภัณฑ์ของ Kyowa รุ่น UCAM-550A และเซนเซอร์ทุกชนิด เป็นผลิตภัณฑ์ของ Kyowa

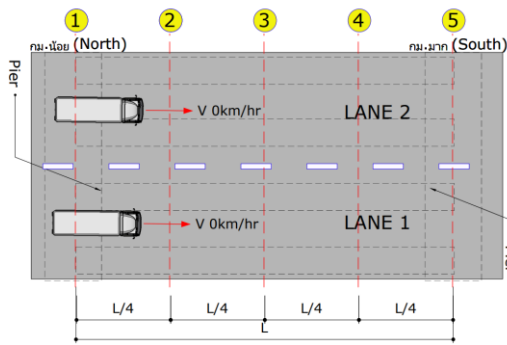
อุปกรณ์ตรวจวัดจะติดตั้งในระยะกึ่งกลางของคาน โดยแต่ละคานจะมีการติดตั้ง Accelerometer 1 ตำแหน่ง LVDT 1 ตำแหน่ง strain gates 2 ตำแหน่ง ในทุกคานรองรับ 2 ช่วงสะพาน ทั้งหมด 20 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

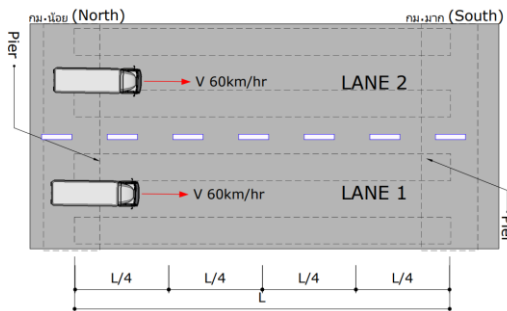
เพื่อตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคานสะพานจำนวน 2 ช่วงสะพาน มีความยาวระหว่างจุดรองรับโดยเฉลี่ยประมาณ 15.00 เมตร และมีความกว้างโดยเฉลี่ยประมาณ 7.00 เมตร ด้วยรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก 25 ตัน วิธีการทดสอบและตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ

1. การทดสอบในสภาวะสถิต (Static Test) เป็นการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกทดสอบที่มีน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 2 คัน โดยรถบรรทุกทดสอบจะจอดหยุดนิ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยน้ำหนักบรรทุกทุกดังกล่าวอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection) และค่าความเครียด (Strain) ของโครงสร้างในขณะที่มีน้ำหนักทดสอบกระทำที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยในการทดสอบจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดระยะแอ่นตัวจำนวน 8 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดจำนวน 16 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดจะติดตั้งในระยะกึ่งกลางของคาน โดยแต่ละคานจะมีการติดตั้ง LVDT 1 ตำแหน่ง strain gates 2 ตำแหน่ง ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงในส่วนต่างๆของโครงสร้าง



รูปที่ 4 ตัวอย่างการทดสอบแบบสถิตย์

- การทดสอบในสภาวะพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกทดสอบที่มีน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 2 คัน เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน จากนั้นจะทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของคานสะพาน เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) และค่าความหน่วง (Damping Ratios) โดยอาศัยค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดความเร่ง จำนวน 4 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดจะติดตั้งในระยั้งกลางของคาน โดยแต่ละคานจะมีการติดตั้ง Accelerometer 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 5 ตัวอย่างการทดสอบแบบพลวัต

3.2 การปรับแก้แบบจำลองของสะพานด้วยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (Finite Element Analysis, FEA)

ในการสร้างแบบจำลองของสะพานโดยใช้โปรแกรม CSI Bridge เนื่องจากสะพานมีพฤติกรรมที่ค่อนข้างซับซ้อน การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพาน ที่ปรึกษาเลือกใช้แบบจำลอง Finite Element Analysis (FEA) โดยระเบียบวิธี Finite Element Analysis เป็นวิธีสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี Numerical Method และเป็นวิธีเชิงการประมาณ (Approximate Method) การวิเคราะห์โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน จะต้องจำลองโครงสร้างในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีรูปร่างและคุณลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด วิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method & Analysis)

3.3 การประเมินหาสัดส่วนความปลอดภัย

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาปรับแก้แบบจำลองของสะพานที่มีหน้าตัดสะพานเสมือนกับหน้าตัดสะพานจริง เพื่อให้แบบจำลองของโครงสร้างสะพานมีความสอดคล้องกับสภาวะในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานในสภาวะปัจจุบันมากที่สุด โดยจะเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างการทดสอบสะพานกับการปรับแก้แบบจำลองให้ค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดโดยจะคำนึงถึงค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) และค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำแบบจำลองไปประเมินหาสัดส่วนความปลอดภัย (Rating Factor, RF) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR ดังแสดงในสมการที่ (1)

สำหรับสมการ เพื่อใช้ในการประเมิน ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR จะใช้ค่าของ Rating Factor (RF) เพื่อใช้ในการพิจารณา ว่า สะพานมีความแข็งแรงเพียงพอหรือไม่ หรือมีความจำเป็นต้องเสริมกำลัง โดยสมการของ Rating Factor (RF) ตาม มาตรฐาน AASHTO LRFR ในกรณีที่ค่า RF มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1 หมายความว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาได้อย่างปลอดภัย

$$RF = \frac{[C - (\gamma_{DC} \cdot DC) - \gamma_{DW} \cdot DW + \gamma_p \cdot P]}{\gamma_{LL} \cdot LL \cdot (1 + IM)} \quad (1)$$

$$C = \phi_c \cdot \phi_s \cdot \phi_n \cdot M_n$$

$$\phi_c = 0.85 \quad \text{poor, BMS Condition 4}$$

$$\phi_s = 1.00 \quad \text{Slab Bridge}$$

$$\phi_n = 0.9 \quad \text{Bending}$$

น้ำหนักบรรทุกทุกคันที่

$$\gamma_{DC} = 1.25$$

น้ำหนักบรรทุกทุกคันที่ปรับแต่งผิวจราจร และแบร์รี่เอ็กกันต

ผู้ออกแบบกำหนดให้ใช้ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

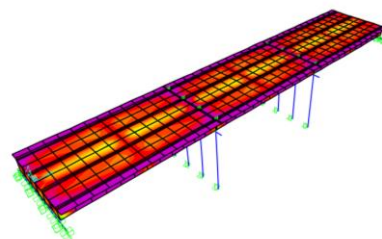
$$\gamma_{DW} = 1.5$$

น้ำหนักบรรทุกทุกคัน

$$\gamma_{LL} = 1.45$$

(Operating Factor, If Inventory Using Factor 1.75)

$$IM = 33\%$$

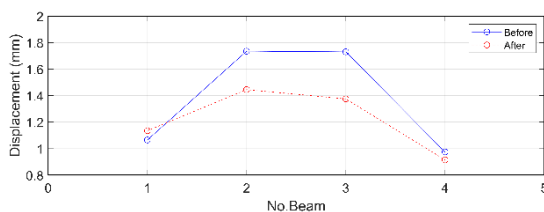


รูปที่ 6 ตัวอย่างแบบจำลองโครงสร้างของสะพาน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบสะพาน

เนื่องจากในระยะแรกที่มีการทดสอบสะพานหลังมีการเสริมกำลังด้วยการพ่นมอร์ตาร์เพียงอย่างเดียวพบว่ากำลังค่าความเครียด และ ค่าการแอ่นตัวของสะพานโดยรวมไม่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเสริมกำลังในบริเวณการรับแรงอัดของสะพานไม่ค่อยมีผลกับจากรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานอย่างมีนัยสำคัญ แต่สามารถช่วยในการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากค่าได้พบว่าความแตกต่างระหว่างคานที่มีการแอ่นตัวมากที่สุดกับคานที่มีการแอ่นตัวน้อยที่สุดลดลงจาก 0.76 เป็น 0.53 ในน้ำหนักบรรทุกที่เท่าเดิม แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าการแอ่นตัวก่อนและหลังมีการเสริมกำลัง

4.2 ผลการปรับแก้แบบจำลอง

การปรับแก้แบบจำลองเพื่อให้ค่าอัตราส่วนระหว่างการทดสอบสะพานกับแบบจำลองมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ที่ตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 9.705 Hz ส่วนในแบบจำลองมีค่า 9.793 Hz มีอัตราส่วน 0.9910 และมีการแอ่นตัว (Deflection) ที่ตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 1.445 mm ส่วนในแบบจำลอง มีค่า 1.467 mm มีอัตราส่วน 0.9850 แสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนระหว่างการทดสอบสะพานกับแบบจำลอง

CALIBRATE	MEASURED	FEA	MEASURED: FEA
natural frequency	9.7055	9.79324	0.9910
Displacement	1.445	1.467	0.9850

4.3 ผลการประเมินหาสัดส่วนความปลอดภัย

การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน โดยวิธีที่กำหนดตามมาตรฐาน AASHTO LRFR โดยข้อกำหนดในมาตรฐานดังกล่าวจะนำมาประเมินกับสะพานตามสภาพที่ตรวจวัดได้ในปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบกับ ขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ หรือ การประเมินในระดับ Inventory Level และ Operating พบว่าก่อนมีการเสริมกำลังมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.719 และ 2.228 ตามลำดับ และหลังมีการเสริมกำลังครบทั้ง 2 วิธี พบว่าค่าสัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.013 และ 2.610 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนความปลอดภัย (Rating Factor, RF)

รายการคำนวณ	Rating Factor ก่อนเสริมกำลัง	Rating Factor หลังเสริมกำลัง
RF(Inventory)	1.719	2.013
RF(Operating)	2.228	2.610

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพของกำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานคลองชะติเย็น ตำบลชะติเย็น อำเภอชัยบาดาล จังหวัด ลพบุรี เป็นสะพาน Concrete T-Girder สามารถสรุปประสิทธิภาพของการเสริมกำลังทั้ง 2 รูปแบบได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วยการพ่นมอร์ตาร์ (Shotcrete) สามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทแรงระหว่างคานได้มากถึงร้อยละ 30 ในความหนา 15 เซนติเมตร แต่สามารถเพิ่มกำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยและไม่สอดคล้องกัน นอกจากนั้นยังทำให้โครงสร้างโดยรวมหนักขึ้นอีกด้วย การเสริมกำลังด้วยการพ่นคอนกรีตเพียงอย่างเดียวจึงยังไม่สามารถเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของโครงสร้างได้
2. การเพิ่มลวดอัดแรงในส่วนโครงสร้างรับแรงดึง (External Post-Tensioning) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญซึ่งสามารถเพิ่มค่าสัดส่วนความปลอดภัยของสะพานแบบ Operating จาก 2.228 เป็น 2.610 และแบบ Inventory จาก 1.719 เป็น 2.013 ซึ่งเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 17 ก่อนมีการเสริมกำลัง แสดงให้เห็นว่าคานรองรับสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้อย่างเห็นได้ชัด และเพิ่มความมั่นใจในความปลอดภัยต่อผู้ใช้สะพานได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจาก ศูนย์สร้างและบูรณะสะพานที่ 3 (ปทุมธานี) สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง และขอขอบคุณ รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน สำหรับคำแนะนำในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง (2024). รายงานงานทดสอบวิเคราะห์และประเมินกำลังรับน้ำหนักสะพาน ทล.2247 จงโก-ลำสมพุง ตอนที่ 1 กม. 10+089 ก่อนและหลังการเสริมกำลัง
- [2] Yun, K., Choi, S., Ha, T., Song, C., Hossain, M.S., Panov, V., and Kim, Y. (2023). Field application of hydro-demolition and dry-mix shotcrete for repairing the understructure of bridge deck. *Second International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Constructed Infrastructure Facilities*, Honolulu, HI, USA, 16–19 August.

- [3] Luan, J.; Chen, X.; Ji, T.; Bai, Y.; and Yu, X. (2024). Mechanical behavior and energy dissipation of sandstone–shotcrete under monotonic and cyclic triaxial loading. **International Journal of Geomechanics**, 24(4): 04024028.
- [4] Sun, S.; Tian, H.; Zhang, Z.; Diao, Z.; Deng, L.; Yang, X.; and Li, C. (2024). Tensile deformability of shotcrete in tunnel primary support: A case study. **Buildings**, 14(9): 2993. <https://doi.org/10.3390/buildings14092993>
- [5] Ariyawardena, N.D. and Ghali, A. (2002). Design of precast prestressed concrete members using external prestressing. **PCI Journal**, March–April, 84–94.
- [6] Agredo Chavez, A.; Gonzalez-Libreros, J.; Wang, C.; Capacci, L.; Biondini, F.; Elfgren, L.; and Sas, G. (2024). Assessment of residual prestress in existing concrete bridges: The Kalix bridge. **Engineering Structures**, 311: 118194.
- [7] Sträter, N.; Clauß, F.; Ahrens, M.A.; and Mark, P. (2024). Detection of tendon breaks in prestressed concrete structures using coda wave interferometry. **Structural Concrete**, 2024: 1–14.
- [8] WSDOT. (2024). Rating equation for LRFR method. **WSDOT Bridge Design Manual M 23-50.23**, Chapter 13: Bridge Load Rating, p. 13-2, Equation (13.1.1A-1).