

ประสิทธิภาพการรับกำลังของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

The Load-Bearing Efficiency of Reinforced Concrete Bridge Structures Strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP)

ณัฐกร ปรีกษาก^{1,*} วิฑิต ปานสุข²

^{1,2} ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nattakorn.prueksakorn@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีความสนใจเพิ่มขึ้นในการเสริมความแข็งแรงและการฟื้นฟูโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสะพาน เนื่องจากการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม ทำให้ความต้องการทางคมนาคมขนส่งสูงขึ้น ตลอดจนสะพานหลายแห่งที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานแล้วต้องมีการปรับปรุงเสริมกำลังให้มีความมั่นคงแข็งแรง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสมือนจริงของสะพาน (Bridge load test) เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์ และพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างสะพานระหว่างก่อนและหลังการเสริมกำลัง ซึ่งจะใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และเส้นใยอะรามิด (AFRP) ในการเสริมประสิทธิภาพการรับกำลังของสะพาน สะพานที่เลือกใช้ในการทดสอบเป็นสะพานที่มีระบบแผ่นพื้นต้น (Plank Girder) และแผ่นพื้นบนคาน (Slab on Girder) เนื่องจากเป็นระบบสะพานส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทย มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดการแอ่นตัว ค่าความเครียด และค่าความเร่งการสั่นไหวของสะพาน ผลการเสริมกำลังโครงสร้างพบว่า การเสริมกำลังสามารถทำให้ค่าความเครียด และค่าการแอ่นตัวสะพานโดยรวมมีค่าลดลง ผลเชิงพลศาสตร์ ค่าความถี่ธรรมชาติสะพานให้ค่าใกล้เคียงเดิม แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิดในสะพาน มีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายและรับโมเมนต์ดัดที่สูงขึ้น และไม่กระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างสะพาน

คำสำคัญ: เส้นใยคาร์บอน (CFRP), เส้นใยอะรามิด (AFRP), โครงสร้างสะพาน

Abstract

Due to increasing economic and social development, there is a rising demand for transportation infrastructure. At the same time, many existing bridges have been in service for decades and now require strengthening and rehabilitation to ensure structural safety and performance. This study focuses on evaluating the load-carrying capacity of bridges through full-scale bridge load testing to determine their dynamic characteristics and structural responses before and after strengthening. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) materials are applied to enhance the structural

performance of the bridges. The selected bridge types are Plank Girder and Slab-on-Girder systems, which are commonly used in Thailand. Sensors such as displacement transducers, strain gauges, and accelerometers are installed to measure deflection, strain, and vibration responses. The results indicate that structural strengthening significantly reduces overall strain and deflection in the bridges. In terms of dynamic performance, the natural frequencies of the bridges remain nearly unchanged, suggesting that the strengthening does not negatively affect structural stability. The use of CFRP and AFRP sheets improves the distribution of bending moments and enhances the load-bearing capacity of the structures. These findings confirm the effectiveness of fiber-reinforced polymer materials in improving bridge performance without compromising their stability.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP), Bridge Structures

1. คำนำ

สะพานเป็นโครงสร้างสาธารณูปโภคที่สำคัญที่ใช้ในระบบคมนาคมขนส่งทางบก ที่มีความสำคัญทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมของประเทศ ด้วยความต้องการทางคมนาคมขนส่งที่สูงขึ้น ประกอบกับสะพานในประเทศหลายแห่งที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานแล้ว ทำให้ต้องมีการปรับปรุงหรือเสริมกำลังสะพาน ให้มีความมั่นคงแข็งแรงเพียงพอในการรับน้ำหนักอย่างปลอดภัย ซึ่งสะพานในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Slab Bridge) สะพานอัดแรงรูปแบบแผ่นพื้นต้น (Plank Girder) และสะพานแผ่นพื้นบนคาน (Slab on Girder) เป็นสะพานประเภทที่มีมากที่สุดในประเทศไทย

การเสริมกำลังรับน้ำหนักสะพานมีหลากหลายวิธี เช่น การขยายขนาดหน้าตัด (Section Enlargement) การประกอบวัสดุเสริมภายนอกด้วยแผ่นเหล็ก หรือวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นต้น โดยวิธีการปรับปรุงสะพานด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นวิธีที่มีศักยภาพ สะดวก ไม่กระทบการจราจร ไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มเติมน้ำหนักในสะพาน และทนทานต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบคาร์บอน (CFRP) และเส้นใยอะรามิด (AFRP) กับสะพานประเภท

แผ่นพื้นตัน (Plank Girder) และแผ่นพื้นบนคาน (Slab on Girder) โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้แรงกระทำแบบสถิต และแบบพลวัต เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์ และพฤติกรรม การตอบสนองของโครงสร้างสะพาน ระหว่างก่อนและหลังการเสริมกำลัง

2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา Ilze และ Ainars [1] ได้ทำการศึกษาค่า DAF (Dynamic Amplification Factor) ของสะพานในลัดเวียโดยพบว่าการออกแบบตามมาตรฐาน Eurocode และ SNIP codes ค่า DAF จะขึ้นอยู่กับความยาวของช่วงสะพาน แต่ผลการทดสอบจริงพบว่าค่าของ DAF ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความยาวของช่วงสะพานอย่างมีนัยยะ แต่พบว่าความเร็วและพื้นผิวทางที่ขรุขระมีผลต่อค่า DAF อย่างมีนัยยะ Burdet และ Corthay [2] ได้ทดสอบกำลังการรับน้ำหนักแบบสถิต และแบบพลวัตของสะพานในประเทศสวีเดนแลนด์ เพื่อดูพฤติกรรม ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness) และความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) เมธา และคณะ [3] ทำการศึกษาดัชนีแปรผันกำลังคอนกรีต และเหล็กเสริม ณ เวลาต่างๆ กิตติ มโนคุณ และคณะ [4] ศึกษาสะพานดอยหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม โดยได้รับการตรวจสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสมือนจริง พบว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์ (CFRP) ช่วยลดระดับความเครียดบนแผ่นพื้นและการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกได้

2.1 วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย

Fiber-Reinforced Plastic (FRP) หรือวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของเมทริกซ์โพลิเมอร์ ได้แก่ ไอโซพาลิกพอลิเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ หรืออีพอกซีเรซิน กับเส้นใยยาวต่อเนื่อง ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะรามิด ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีทั้งในด้านความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อน ความชื้น และน้ำหนักที่เบา รูปแบบผลิตภัณฑ์วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ที่นิยมใช้ในงานเสริมกำลังแบ่งตามความต้องการของโครงสร้างและลักษณะการใช้งาน ดังนี้ รูปแบบแผ่น (Sheet หรือ Plate) ติดตั้งง่ายเหมาะสำหรับการเสริมกำลังผิวหน้าของโครงสร้างเพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงดึงและเฉือน รูปแบบเป็นเส้น (Rod) เหมาะกับการฝังภายในโครงสร้างแทนเหล็กเส้นเพื่อเพิ่มกำลังแรงดึงภายในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เป็นเส้นใยประเภทอะรามิด(A) และคาร์บอน(C) รูปแบบแผ่น (Sheet) เพราะมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ติดตั้งง่ายเหมาะสำหรับการเสริมผิวโครงสร้างสะพาน โดยมีรายละเอียดวัสดุแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดอะรามิด (A) คาร์บอน (C)

Properties	unit	Carbon fiber strand sheet	Aramid fiber sheet
Nominal tensile strength	MPa	3400	2060
Modulus of elasticity	MPa	245000	118000
Ultimate strain	%	1.39	1.75
Used debonding strain	%	0.5	0.6
Design thickness	mm	0.333	0.43
Tensile strength per unit width	N/mm	1132.2	885.8

2.2 การออกแบบการเสริมกำลังด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใย

2.2.1 น้ำหนักบรรทุก

ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ในการวิเคราะห์ แผ่นพื้นสะพานจะพิจารณาเฉพาะเพลลาของรถบรรทุกออกแบบ (Design Truck) HS20-44 และเพลลาคู่ (Design Tandem)

2.2.2 แรงกระแทก (Impact Force)

ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรรยาเพื่อสำหรับผลจากแรงกระแทกที่อาจเกิดจากความไม่เรียบของถนน การสั่นสะเทือนของโครงสร้างและพลศาสตร์ของยานพาหนะดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า Impact Force ในกรณีต่างๆ

Component	IM
Deck Joints-All Limit States	75%
All Other Components	
-Fatigue and Fracture Limit State	15%
-All Other Limit States	33%

2.2.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ

ตามมาตรฐาน ASSHTO LRFD มีการวิเคราะห์และออกแบบตามเงื่อนไข ดังนี้

- วิเคราะห์โหลดสูงสุดในสถานการณ์ใช้งานปกติ
 $1.25(DC) + 1.5(DW) + 1.75(LL + IM_{33\%})$
- วิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างภายใต้การใช้งานจริง
 $DC + DW + (LL + IM_{33\%})$
- วิเคราะห์ความล้าวัสดุ
 $0.80(LL + IM_{15\%})$

โดย DC คือ น้ำหนักคอนกรีตเสริมเหล็ก

DW คือ น้ำหนักผิวจราจรแอสฟัลท์

LL คือ น้ำหนักบรรทุก

2.2.4 พิจารณาด้านความคงทน

ตามมาตรฐานของ AASHTO Guide Specification ได้กำหนดค่าตัวลดกำลังสำหรับ FRP ไว้ที่ประมาณ 0.85 เพื่อสะท้อนถึงผลกระทบของสถานะแวดล้อมและความไม่แน่นอนในการใช้งานจริง

2.2.5 พิจารณาด้านความเหนียว

ตามมาตรฐานของ AASHTO ได้กำหนดโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ต้องคงความสามารถในการเปลี่ยนรูป (ductility) ได้ในระดับที่ยอมรับได้หลังการเสริมกำลังโดยเหล็กเสริมในคอนกรีตสามารถยึดตัวจนถึงจุดครากก่อนที่จะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะถึงขีดจำกัดการยึดตัวสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\epsilon_{fp,y} \leq \frac{\epsilon_{frp,ult}}{2.5} \quad (1)$$

2.2.6 ข้อกำหนดสำหรับคุณสมบัติการยึดเกาะ

งานวิจัยนี้เลือกใช้กาวเรซิน FB-E8S เพื่อยึดเกาะและเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยอุณหภูมิที่แนะนำสำหรับการใช้งานต้องน้อยกว่า 65 องศาเซลเซียส

2.2.7 Influence line

เส้นอิทธิพลที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโหลดที่เคลื่อนที่ กับปริมาณตอบสนองที่ตำแหน่งหนึ่งในโครงสร้าง โดยสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สะพาน เพื่อให้ทราบว่าเมื่อโหลดกระทำ ณ ตำแหน่งใดจะส่งต่อปริมาณในตำแหน่งจุดที่สนใจอย่างไร ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$P_i = p_i \cdot U(x_i) \quad (2)$$

โดย P_i คือ แรงภายในหรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ จุดที่สนใจเมื่อมีโหลดอยู่ที่ตำแหน่ง x_i

p_i คือ ขนาดของโหลดที่กระทำ ณ ตำแหน่ง x_i

$U(x_i)$ คือ ค่าเส้นอิทธิพล (Influence Value) ณ ตำแหน่ง x_i ของปริมาณที่เรสนใจ

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน

2.3.1 อุปกรณ์วัดค่าการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุในเชิงเส้น โดยอาศัยการเคลื่อนตัวเข้า ออกของก้านตรวจวัด ที่สัมผัสกับวัตถุที่ต้องการทราบค่าการเคลื่อนที่ ค่าการอ่านตัวของโครงสร้าง

2.3.2 อุปกรณ์วัดค่าความเครียด (Strain Gage)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อตัวเซ็นเซอร์เกิดการยืดหรือหดตัว

2.3.3 อุปกรณ์วัดค่าความเร่ง (Accelerometer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการการสั่นไหวของโครงสร้าง เมื่ออุปกรณ์เกิดการสั่นไหวจะทำให้วงจรไฟฟ้าที่อยู่ภายในอุปกรณ์มีค่าความต้านทานหรือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เพื่อนำไปหาค่าความเร่งจากสัญญาณทางไฟฟ้า

3. ระเบียบวิธีการศึกษา

3.1 การศึกษาโครงสร้างสะพาน

โครงสร้างสะพานจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure) ประกอบไปด้วย พื้น สะพาน (Deck), คาน สะพาน (Girder), คานตามขวาง (Diaphragm) เป็นต้น โครงสร้างสะพานส่วนล่าง (Substructure) ประกอบไปด้วย ฐานราก, ตอม่อ, เสา เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจในส่วนโครงสร้างสะพานส่วนบนในส่วนของพื้นสะพานที่ทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

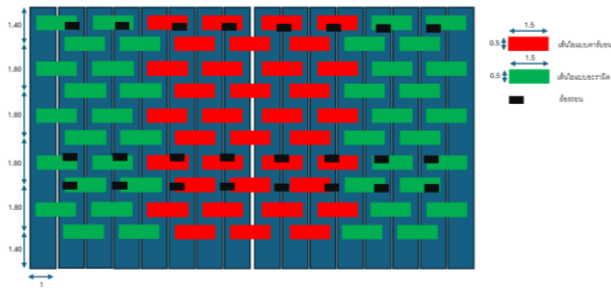
3.1.1 สะพานทดสอบชนิด Plank Girder

ระบบพื้นสะพานที่ทดสอบชนิด Plank Girder เป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงมีเทคนิคการอัดแรงแบบ Pre-tensioning โดยพื้น Plank ถูกวางเรียงขนานกันบนคานหัวเสา (Cap Beam) เพื่อให้การถ่ายแรงคล้ายลักษณะคานแบบง่าย (Simple beam) โดยมี Shear connection ทำงานร่วมกับคอนกรีตทับหน้าเพื่อให้เกิดการถ่ายแรงเฉือน

โดยระบบสะพาน Plank Girder ที่ทำการทดสอบมีรายละเอียดสะพานตามตารางที่ 3 ซึ่งจากการตรวจสอบเบื้องต้นของสะพานที่ทดสอบ พบว่าโครงสร้างคานคอนกรีตยังมีกำลังที่เพียงพอต่อการต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในทิศตามยาว แต่จุดต่อระหว่างคานสะพานในทิศตามขวางมีแนวโน้มเสื่อมสภาพ จึงมีการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และ AFRP ด้านใต้แผ่นพื้นในตำแหน่งจุดต่อระหว่างคานสะพานในทิศตามขวาง เพื่อลดการเคลื่อนตัวตามแนวขวาง และความเค้นในเหล็กเสริมบริเวณจุดต่อคานสะพานในทิศตามขวางดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 3 ข้อมูลพื้นฐานสะพาน Plank Girder

รูปแบบสะพาน	ระบบพื้นสะพาน Plank Girder ความยาวช่วงสะพาน 10 เมตร
จำนวนช่องจราจร	4 ช่องจราจร
จำนวนคานสะพาน (Plank Girder)	16 คาน
ความยาวช่วงสะพาน	10 เมตร
ความกว้างสะพาน	ประมาณ 15.84 เมตร
โครงสร้างผิวจราจร	แอสฟัลติกคอนกรีต
ก่อสร้างประมาณ (ปี)	2533



รูปที่ 1 ตำแหน่งการเสริมวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย
ของสะพาน Plank Girder

3.1.2 สะพานทดสอบชนิด Slab on Girder (I-Girder)

ระบบพื้นสะพานที่ทดสอบชนิด Slab on Girder (I-Girder) เป็นโครงสร้างที่พื้นสะพานทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกจากรถและน้ำหนักตัวเอง แล้วถ่ายลงสู่คานรูปตัว I (I-Girder) โดยคานจะรับแรงดัดและแรงเฉือนแล้วถ่ายลงสู่เสาเข็มหรือตอม่อต่อไป

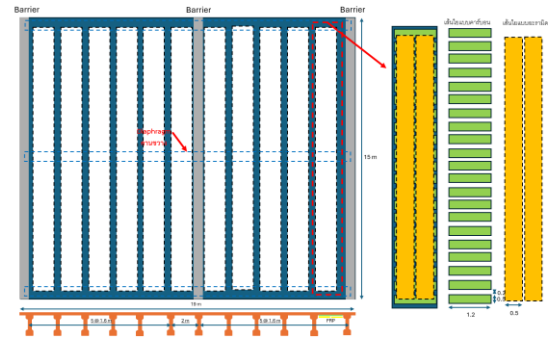
พื้นสะพานจะมีพฤติกรรมเหมือนแผ่นบางที่เป็นแผ่นที่ยาวมาก (Infinite Plate Strip) เมื่อพื้นรับแรงแผ่กระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Load) แผ่นพื้นจะมีพฤติกรรมการแอ่นเหมือนแผ่นพื้นทางเดียว แต่เมื่อพื้นรับแรงกระทำแบบจุด (Concentrated Load) แผ่นพื้นบางจะมีพฤติกรรมการแอ่นแบบสองทาง การทำงานพื้นสะพานจะทำงานร่วมกับคาน I-Girder ทำงานร่วมกันเป็น Composite Section โดยใช้สตั๊ดเหล็กเป็นตัวเชื่อมถ่ายแรงเฉือนระหว่างคานและพื้นคอนกรีต การทำงานร่วมกันนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งของโครงสร้าง ลดการแอ่นตัว

คานตามยาว (Diaphragm) ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพให้กับโครงสร้างสะพาน โดยทำหน้าที่ถ่ายเทและกระจายแรงข้ามระหว่างคาน I-Girder แต่ละตัว ช่วยป้องกันการบิดตัวหรือเสียรูปของคานหลัก

โดยสะพาน Slab on Girder (I-Girder) ที่ทำการทดสอบมีรายละเอียดสะพานตามตารางที่ 4 ซึ่งจะทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และ AFRP ด้านใต้แผ่นพื้นในตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดัดตามแนวขวางและแนวยาวตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

ตารางที่ 4 ข้อมูลพื้นฐานสะพาน Slab on Girder (I-Girder)

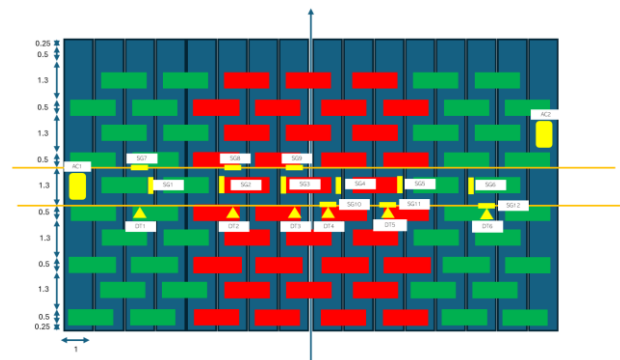
รูปแบบสะพาน	ระบบพื้นวางบนคาน ความยาวช่วงสะพาน 14 เมตร
จำนวนช่องจราจร	5 ช่องจราจร
จำนวนคานสะพาน (I Girder)	12 คาน
จำนวนช่องจราจร	5 ช่อง
ความกว้างสะพาน	ประมาณ 19.00 เมตร
โครงสร้างผิวจราจร	แอสฟัลติกคอนกรีต
ก่อสร้างประมาณ (ปี)	2516



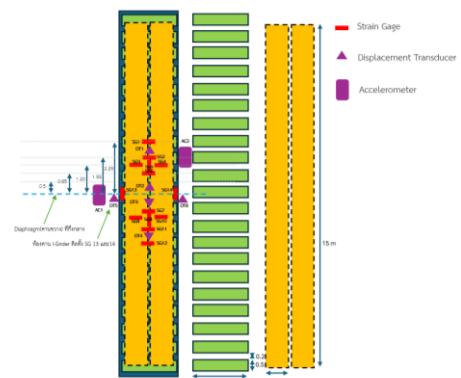
รูปที่ 2 ตำแหน่งการเสริมวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย
ของสะพาน Slab on Girder (I-Girder)

3.2 การทดสอบ

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างสะพานก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และ AFRP และได้มีการติดตั้ง Displacement Transducer (DT) เพื่อตรวจวัดการแอ่นตัว Strain Gage (SG) เพื่อตรวจวัดการยืดหดตัวที่ผิวท้องสะพาน Accelerometer (AC) เพื่อตรวจวัดการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับสะพานทดสอบระบบ Plank Girder และรูปที่ 4 สำหรับสะพานทดสอบระบบ Slab on Girder (I-Girder)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรม
ของโครงสร้างสะพาน Plank Girder



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรม
ของโครงสร้างสะพาน Slab on Girder (I-Girder)

การทดสอบจะใช้รถบรรทุก (10 ล้อ 3 เพลา) น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 25 ตันต่อคัน โดยแบ่งเป็นการทดสอบแบบสถิตเพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัว และค่าความเครียด และการทดสอบแบบพลวัตเพื่อตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และค่าสัมประสิทธิ์ขยายแรงแบบไดนามิก (DAF) โดยได้แบ่งกรณีการทดสอบให้เหมาะสมกับระบบสะพาน ดังนี้

ระบบสะพาน Plank Girder

การทดสอบแบบสถิต (Static Load Test)

กรณีที่ 1 วิ่งทีละคันต่อช่องจราจร จะวิ่งทุกช่องจราจร โดยหยุดในตำแหน่ง 0 L/4 L/2 3L/4 L

กรณีที่ 2 วิ่งเรียงหน้ากระดาน โดยจะวิ่งทีละ 2 คัน พร้อมกันใน 2 ช่องจราจร จะวิ่งทุกช่องจราจร โดยหยุดในตำแหน่ง 0 L/4 L/2 3L/4 L

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Load Test)

กรณีที่ 3 วิ่งเรียงหน้ากระดาน โดยจะวิ่งทีละ 2 คัน พร้อมกันด้วยความเร็ว 3 ระดับ ช้า, ปานกลาง, เร็ว ในช่องจราจรที่ 1 และ 2

กรณีที่ 4 วิ่งเรียงหน้ากระดาน โดยจะวิ่งทีละ 2 คัน พร้อมกันด้วยความเร็ว 3 ระดับ ช้า, ปานกลาง, เร็ว ในช่องจราจรที่ 2 และ 3

กรณีที่ 5 วิ่งเรียงหน้ากระดาน โดยจะวิ่งทีละ 2 คัน พร้อมกันด้วยความเร็ว 3 ระดับ ช้า, ปานกลาง, เร็ว ในช่องจราจรที่ 3 และ 4

ระบบสะพาน Slab on Girder (I-Girder)

การทดสอบแบบสถิต (Static Load Test)

กรณีที่ 1 รถวิ่งในช่องจราจรซ้ายสุดอยู่กลางช่วงอุปกรณ์ตรวจวัด หยุดในตำแหน่ง 0 L/4 L/2 3L/4 L

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Load Test)

กรณีที่ 2 รถวิ่งในช่องจราจรซ้ายสุดอยู่กลางช่วงอุปกรณ์ตรวจวัด วิ่งผ่านด้วยความเร็ว ช้า ปานกลาง เร็ว

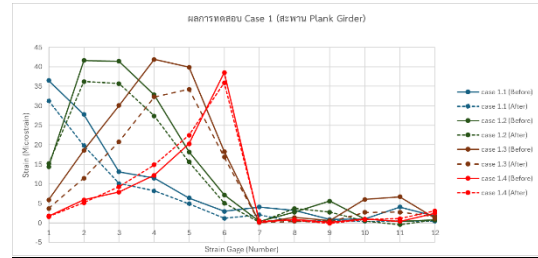
4. ผลการดำเนินการทดสอบ

4.1 ระบบพื้นสะพาน Plank Girder

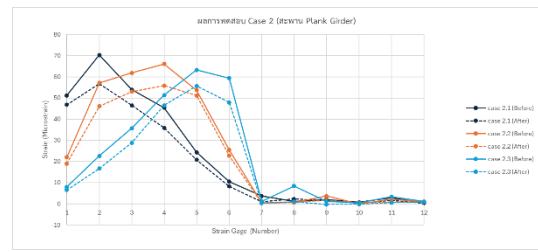
กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

การทดสอบพบว่า Strain Gage และ Displacement Transducer จะมีค่าสูงสุด เมื่อรถบรรทุกทดสอบอยู่ในตำแหน่ง L/2 และเมื่อนำค่าสูงสุดของแต่ละกรณีที่ทดสอบมาเปรียบดังแสดงรูปที่ 5 - 8 พบว่า

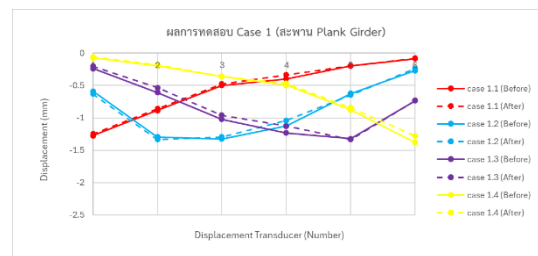
Strain Gage ตัวที่ 1-6 พบว่ามีค่าความเครียดที่สูงกว่า Strain Gage ตัวที่ 7-12 อย่างมีนัยยะ แสดงถึงสะพานจะมีการรับแรงตามแนวยาวเป็นส่วนใหญ่ และพบว่าก่อนและหลังการเสริมกำลังค่าความเครียด และค่าการแอ่นตัวมีแนวโน้มลดลงแสดงถึงประสิทธิภาพในการกระจายโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นหลังการเสริมกำลังบริเวณจุดต่อระหว่างคานสะพานในทิศทางขวาง



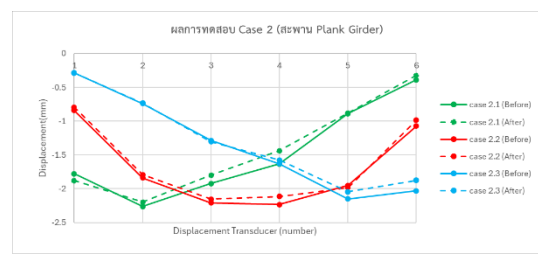
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในกรณีที่ 1 ของโครงสร้างสะพาน Plank Girder ก่อนและหลังเสริมกำลัง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในกรณีที่ 2 ของโครงสร้างสะพาน Plank Girder ก่อนและหลังเสริมกำลัง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวในกรณีที่ 1 ของโครงสร้างสะพาน Plank Girder ก่อนและหลังเสริมกำลัง



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวในกรณีที่ 2 ของโครงสร้างสะพาน Plank Girder ก่อนและหลังเสริมกำลัง
กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4

จากผลการทดสอบแบบพลวัตพบว่าค่า DAF และความถี่ธรรมชาติของสะพานระหว่างก่อนและหลังการเสริมกำลังมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และAFRP จะช่วยเพิ่ม stiffness ได้ในระดับหนึ่ง แต่ด้วยน้ำหนักที่เบาทำให้การเพิ่มของมวลโครงสร้างสะพานไม่มากนัก ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเน้นช่วยลดการแตกร้าว และเพิ่มความแข็งแรงในการรับแรงดัดมากกว่าการเพิ่ม stiffness

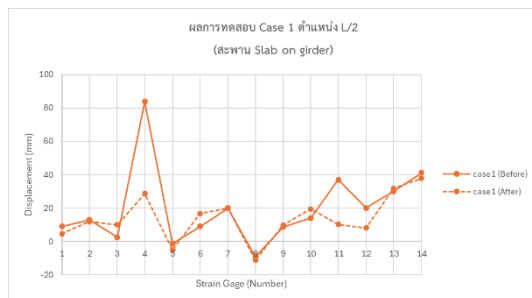
ในโครงสร้างโดยรวม ส่วนค่า DAF นั้นเป็นอัตราส่วนของการตอบสนองพลวัตต่อสถิต จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมของโครงสร้างที่สัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติและลักษณะของโหลดพลวัต

4.2 ระบบพื้นสะพาน Slab on Girder (I-Girder)

กรณีที่ 1

การทดสอบพบว่า Strain Gage ที่ติดตั้งตามแนวขวางใต้พื้นสะพานมีค่าเป็นบวกทุกตัว ในขณะที่ SG5 และ SG8 ที่ติดตั้งตามแนวยาวใต้พื้นสะพานมีค่าเป็นลบ คาดว่าเกิดจากบริเวณที่ติดตั้ง Strain Gage อยู่ใกล้คานขวาง (Diaphragm) บริเวณนั้นมีแรงกดอัดใต้แผ่นพื้นตามแนวยาวทำให้หดตัว ส่วนในแนวขวางวัสดุก็จะขยายตัวตามหลัก Poisson Effect โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมสะพานก่อนและหลังเสริมกำลังเมื่อน้ำหนักบรรทุกอยู่บริเวณ L/2 ดังแสดงรูปที่ 9 พบว่า Strain Gage มีค่าความเครียดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อน และหลังการเสริมกำลัง โดยใน SG4 และ SG11 พบว่าก่อนการเสริมกำลังค่าความเครียดมีค่าสูงมาก แต่หลังการเสริมกำลังพบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยยะ คาดว่าเกิดจากบริเวณที่ทำการติดตั้งอยู่ใกล้กับรอยแตกร้าว

ในส่วนค่าการแอ่นตัวพบว่าการเสริมกำลังค่าของการแอ่นตัวมีค่าใกล้เคียงเดิม คาดว่าเกิดจากการเสริมกำลังอาจไม่สัมพันธ์กับกลไกการรับแรงหลักของสะพาน ที่มีอาศัยพฤติกรรมการรับแรงของคาน I-girder เป็นหลัก



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความเครียดในกรณีที่ 1 เมื่อรถบรรทุกอยู่ตำแหน่ง L/2 ของโครงสร้างสะพาน Slab on Girder ก่อนและหลังเสริมกำลัง

กรณีที่ 2

จากผลการทดสอบแบบพลวัตระหว่างก่อนและหลังการเสริมกำลัง พบว่าในการทดสอบด้วยรถบรรทุกความเร็วต่ำและปานกลาง พบว่าค่า DAF ภายหลังการเสริมกำลังมีค่ามากกว่าก่อนการเสริมกำลัง ส่วนในการทดสอบด้วยรถบรรทุกความเร็วสูง พบว่าค่า DAF ภายหลังการเสริมกำลังมีค่าน้อยกว่าก่อนการเสริมกำลัง อันอาจเกิดจากสภาพพื้นผิวจราจรที่เปลี่ยนแปลงด้านความขรุขระ [1]

ความถี่ธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงเดิมเนื่องจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และ AFRP จะช่วยเพิ่ม stiffness แต่ด้วยน้ำหนักที่เบาทำให้การเพิ่มของมวลโครงสร้างสะพานไม่มากนักส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบก่อนและหลังการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และ AFRP เพื่อประเมินความสามารถของโครงสร้างสะพาน พบว่าในสะพาน Plank Girder และ Slab on Girder (I-Girder) นั้นทำให้ค่าความเครียด และค่าการแอ่นตัวโดยรวมลดลง แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย CFRP และ AFRP สามารถช่วยให้แผ่นพื้นสะพาน Plank Girder มีประสิทธิภาพในการกระจายโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนในสะพาน Slab on Girder มีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงดัดที่เพิ่มขึ้น โดยในส่วนของค่าความถี่ธรรมชาติระหว่างก่อน และหลังการเสริมกำลังนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่กระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างสะพาน นอกจากนี้ ผลการทดสอบพบว่าค่าความเครียด และค่าการแอ่นตัวของสะพานภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทดสอบมีการคืนตัวเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ออกจากสะพาน ไม่มีการคงค้างของการตอบสนองที่ทำให้เสียรูปอย่างถาวร แสดงให้เห็นว่าสะพานที่ทำการทดสอบมีการตอบสนองอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic)

6. ข้อเสนอแนะ

ควรทำการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับการทดสอบประสิทธิภาพของสะพานที่เสริมกำลัง เพื่อพัฒนาการออกแบบการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้มีประสิทธิภาพเป็นมาตรฐานงาน สะพานในประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิจัย ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ มาโดยตลอด จนงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ilze Paeglite, Ainars Paeglitis (2013). *The Dynamic Amplification Factor of the Bridges in Latvia*. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013
- [2] Olivier L. BURDET, Stéphane CORTHAY. Dynamic Load Testing of Swiss Bridges. Essais dynamiques des ponts Suisses Dynamische Versuche an Schweizer Brücken.
- [3] เมธา บรรจบโชคชัย และเอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ (2539) การศึกษาอัตรา การเสียกำลังของโครงสร้างสะพานกษัตริย์ศึก วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] กิตติ มโนคูน, กิตติภูมิ รอดสิน และปรัชญา ยอดดำรง (2565) การ ประเมินความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างสะพานดอนหอยหลอดเพื่อการ

ออกแบบเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมโพลิเมอร์. การประชุม
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27

- [5] ACI 440.2R. Guide for the Design and Construction of
Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete
Structures. American Concrete Institute.

- [6] มอก.2973 – 2562.พอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับงานโครงสร้าง
คอนกรีตไม่อัดแรง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม