

การประเมินประสิทธิภาพกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานเหล็กข้ามคลองคูบอน Evaluation of Load Carrying Capacity of Steel Bridge across Khu Bon Canal.

นครินทร์ ขาญณรงค์¹ กิตติภูมิ รอดสิน^{2*} พรชัย ศิลารมย์³ ธนัช ศรีพัฒน์อินทร์³ วชิรวิทย์ สวัสดิ์นันท³ บัญชา เจริญธัญญ์³
และ ณัฐชัย ชัยวิเศษ³

^{1,2} ศูนย์วิจัยพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง (CESD), ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร

³ แขวงทางหลวงกรุงเทพ, กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: kittipoom.r@cit.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินประสิทธิภาพกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานเหล็กข้ามคลองคูบอน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งาน ณ ปัจจุบัน โดยสะพานข้ามคลองคูบอนเป็นสะพานโครงสร้างเหล็กชนิด I-Girder โดยมีจำนวนคาน I-Girder จำนวน 6 คานเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร สะพานมีความยาวรวม 20.00 เมตร กว้าง 6.00 เมตร การทดสอบจะทำการนำรถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน จำนวน 1 คันมาวิ่งผ่านสะพาน โดยการทดสอบจะมีทั้งหมด 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 จะเป็นการทดสอบแบบสถิตย์ โดยจะให้รถบรรทุกดังกล่าวมาทำการหยุดตามตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้คานทดสอบเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ และรูปแบบที่ 2 การทดสอบแบบพลศาสตร์ โดยการให้รถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของสะพานมีค่าเท่ากับ 9.54 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐาน AASHTO ที่ 16.60 มิลลิเมตร และค่าความเครียดดึง (Tension Strain) ที่ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางความยาวคาน I-Girder ตามแนวยาวของสะพานโครงสร้างเหล็ก ภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 228 ไมโครสเตรน ซึ่งต่ำกว่าค่าความเครียดสำหรับการออกแบบสะพานที่สภาวะใช้งานที่ 732 ไมโครสเตรน ตามมาตรฐานการออกแบบ American Institute of Steel Construction (AISC). ผลการทดสอบได้นำไปปรับแก้แบบจำลองและประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย จากการผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างสะพานเหล็กมีความแข็งแรงและอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้ตามที่ออกแบบตามมาตรฐาน ASSHTO Bridge LRFD Design Specifications

คำสำคัญ: โครงสร้างสะพานเหล็ก, การทดสอบสะพาน, อัตราส่วนความปลอดภัย

Abstract

The main objective of this research is to evaluation of Load Carrying Capacity of steel bridge across khubon canal, providing insights into its current safety for usage. The bridge is a single-span steel I-Girder structure with a total length of 20.00 m. and a width of 6.00 m. The evaluation involves testing the bridge using a single truck 10 wheel, the tests are divided into two methods. The first method is the Static Load Test, where a weighing 25 tons will stop at positions to induce maximum bending moments in the test beams under the applied load. The second method is the Dynamic Load Test, where a truck will traverse the bridge at a speed of 20 km/h to evaluate its dynamic response. The results indicate that the deflection at the midpoint of the bridge beam measures 9.54 mm, which is below the allowable deflection value of 16.60 mm specified by the AASHTO standards. The maximum tensile strain, measured at the midpoint of the I-Girder beam along the longitudinal axis, under the influence of the bending moment is 228 microstrain. This value is significantly lower than the tensile strain limit of 732 microstrain specified for bridge design under service conditions according to the American Institute of Steel Construction (AISC). These results have been utilized to refine the structural model and assess the safety rating factor, It was found that the safety. The test results revealed that the Steel Bridge load carrying capacity in steel bridge structure and a safety factor as designed according to the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications..

Keywords: Prestress rubber pads; Beam Vibration; Damping Ratio

1. บทนำ

สะพานเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญต่อระบบคมนาคมขนส่ง โดยเฉพาะการเชื่อมโยงพื้นที่ทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ด้วยเหตุนี้ ความมั่นคงและความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานจึงเป็นสิ่งที่ต้องได้รับการประเมินอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงก่อนเปิดใช้งานจริงหรือหลังการใช้งานเป็นระยะเวลานาน [1], [2] การทดสอบการรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Load Testing) เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้เพื่อประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำจริง โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ การทดสอบแบบสถิต (Static Load Test) ซึ่งมุ่งเน้นวัดการโก่งตัวและความเครียด และการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ซึ่งวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ความถี่ธรรมชาติ และค่าความเร่งของโครงสร้าง [3], [4] วิธีการประเมินที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วยการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method – FEM) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลเชิงวิเคราะห์ ช่วยให้สามารถวินิจฉัยปัญหาของโครงสร้าง และปรับปรุงแบบจำลองให้สะท้อนพฤติกรรมจริงได้ดียิ่งขึ้น [5],

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เน้นศึกษารูปแบบโครงสร้างต่าง ๆ เช่น สะพานเหล็กที่มีการเชื่อมและยึดด้วยสลักเกลียว [6] หรือโครงสร้างสะพานที่ใช้กลยุทธิ์ควบคุมการสั่นสะเทือน [7], [8] ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพและยืดอายุการใช้งานของสะพานในระยะยาวตามมาตรฐานการออกแบบและประเมิน เช่น American Institute of Steel Construction (AISC). [9] และมาตรฐานการสั่นสะเทือนอย่าง DIN 4150-3 [10] และ AASHTO LRFD [11], ถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สภาพใช้งานจริงและจำลอง เพื่อให้การประเมินเป็นไปตามหลักวิศวกรรมที่ยอมรับในระดับสากล

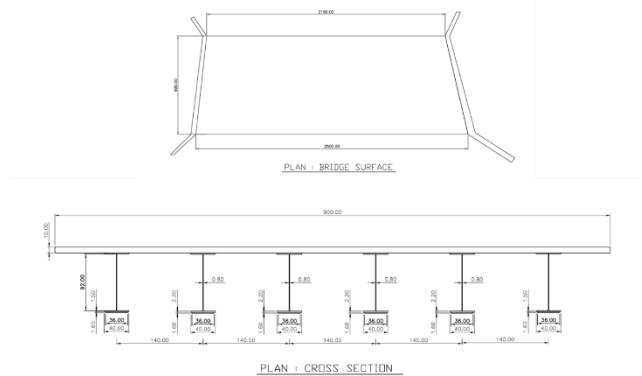
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 ตัวอย่างสะพานที่ทำการทดสอบ

ในการทดสอบโครงสร้างสะพานได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยสะพานข้ามคลองคูบอนเป็นสะพานโครงสร้างเหล็กชนิด I-Girder โดยมีจำนวนคาน I-Girder จำนวน 6 คานเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร สะพานมีความยาวรวม 20.00 เมตร กว้าง 6.00 เมตร แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างคานที่ใช้ทำการทดสอบ

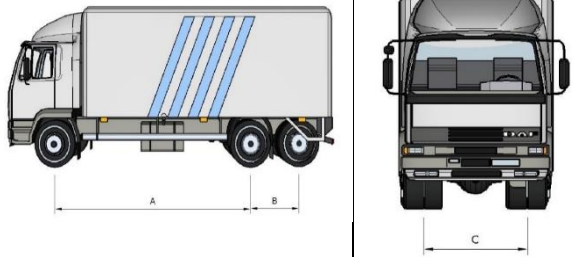


รูปที่ 2 รายละเอียดหน้าตัดคานและการเสริมเหล็ก

2.1.1 น้ำหนักและขนาดมิติรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานจะใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน จำนวน 1 คันกำหนดค่าตามมาตรฐานของ AASHTO LRFD(HL-93) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบสะพานในปัจจุบันมาวิ่งผ่านสะพานมาทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของสะพานได้แสดงดังตารางที่ 1

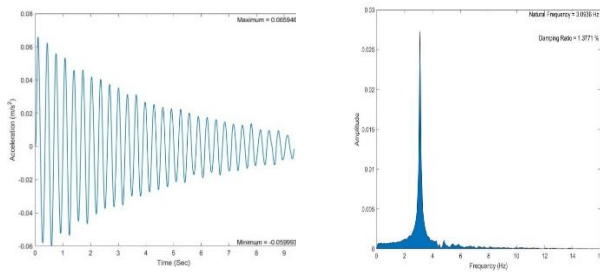
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

รถบรรทุกทดสอบ	
น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	24.970
ระยะเพลาที 1 ถึง 2 (A, เมตร)	4
ความกว้างฐานล้อ (B, เมตร)	1.33
ความกว้างฐานล้อ (C, เมตร)	1.95
	

2.2 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของสะพาน

2.2.1 การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง (Natural Frequency)

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะทำการนำข้อมูลการตรวจวัดความเร่งการสั่นไหวในช่วงของการสั่นอิสระ (Free Vibration) มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Fourier Transform เพื่อแปลงข้อมูลในรูปของความถี่

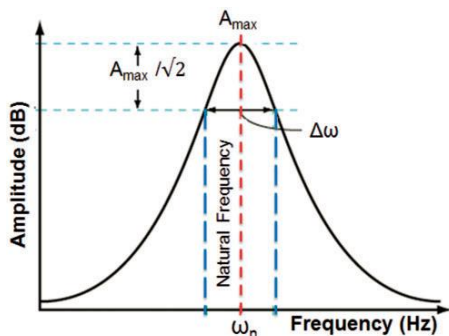


(ก) ความสัมพันธ์ความเร่งกับเวลา
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับความถี่ของการสั่นผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ

รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ

เมื่อได้ผลการทดสอบของช่วงการสั่นอย่างอิสระ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 3 และใช้ Fourier Transform เพื่อแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของความถี่ (Frequency Domain) จากนั้นจะทำการพิจารณาค่าความถี่ที่มีขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุดเป็นค่าความถี่หลักของการสั่นแบบอิสระหรือค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

2.2.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio)



รูปที่ 4 การคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วงโดยวิธี Half-power bandwidth

โดยที่ช่วงความถี่ (bandwidth, ω) หาได้จากจุดสูงสุดของแอมพลิจูด ($A_{max}/\sqrt{2}$) จากนั้นคำนวณหาผลต่างของความถี่ ($\Delta\omega$) และวัดลงมาจากจุดสูงสุดจะได้ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency, ω_n) ดังรูปที่ 4 จึงคำนวณหาอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio, ζ) จากผลการทดสอบสามารถคำนวณได้ดังแสดงสมการที่ (1)

$$\zeta = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n} \quad (1)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนความหน่วง

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ

ω คือ ช่วงความถี่

2.3 มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน

2.3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบระดับการสั่นสะเทือนที่มีผลกระทบต่อโครงสร้าง

จากกำหนดมาตรฐาน DIN 4150 (มาตรฐานของเยอรมันสำหรับการป้องกันผลกระทบของการสั่นสะเทือนต่อสิ่งปลูกสร้าง) กำหนดค่า ค่าความเร่งสูงสุด (Peak Particle Velocity: PPV) เพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างจะไม่ได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือน โดยค่าที่กำหนดใน DIN 4150 ขึ้นอยู่กับประเภทของโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง ซึ่งมาตรฐานนี้ไม่ได้กำหนดค่าความเร่ง (Acceleration) โดยตรงแต่จะเน้นไปที่ PPV ดังนั้นสมการที่ใช้แปลงค่าจาก PPV (Peak Particle Velocity) ไปเป็นความเร่งสูงสุด Acceleration (m/s^2) สามารถใช้ได้โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่าง PPV และความเร่งที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของการสั่นสะเทือน (f) โดยค่าความเร่งจะมีสมการพื้นฐาน f ดังนี้:

แทนค่าในสมการ:

$$a = k \cdot PPV \quad (2)$$

$$a = 2\pi \cdot f \cdot PPV \quad (3)$$

โดยที่ a คือ อัตราส่วนความหน่วง

PPV คือ ค่าความเร่งสูงสุด

f คือ ช่วงความถี่

2.3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบระดับค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ

จากกำหนดมาตรฐานการตรวจวัดการแอ่นตัวของสะพานโดยพิจารณาใช้มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสะพานและโครงสร้างต่างๆ ได้แก่ มาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specification [11]

โดยการเสียรูปที่มากเกินไปของพื้นสะพาน ซึ่งรวมถึงการแอ่นตัว (Deflection) ควรได้รับการพิจารณาสำหรับสะพานพื้น (Metal Grid Decks) และสะพานที่ทำจากวัสดุอื่นๆ เช่น คอนกรีตและโลหะ สำหรับระบบพื้นสะพานเหล่านี้ การแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งาน (Live Load) บวกกับแรงกระทำแบบไดนามิก (Dynamic Load Allowance) ต้องไม่เกินเกณฑ์ดังต่อไปนี้:

L/800 สำหรับพื้นสะพานที่ไม่มีการจราจรคนเดินเท้า

L/1,000 สำหรับพื้นสะพานที่มีการจราจรคนเดินเท้าจำกัด

L/1,200 สำหรับพื้นสะพานที่มีการจราจรคนเดินเท้าจำนวนมาก

โดยที่:

L = ความยาวช่วงสะพาน วัดจากกึ่งกลางของส่วนรองรับด้านหนึ่งถึงอีกด้านหนึ่ง

2.3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบระดับค่าความเครียดที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ

จากกำหนดมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กตาม American Institute of Steel Construction (AISC) ด้วยวิธี Allowable Stress Design (ASD) โดยมีการกำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง (Reduction Factor) ที่

ใช้วิธี ASD เพื่อลดความสามารถในการรับแรงของวัสดุจากค่ากำลังสูงสุด (Ultimate Strength) ลงมาสู่ค่าที่ปลอดภัยสำหรับการใช้งานในระยะยาว ดังนั้นขีดจำกัดของระดับความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเหล็กที่ยอมให้จึงไม่ควรเกินค่าที่ระบุไว้ตอนออกแบบ

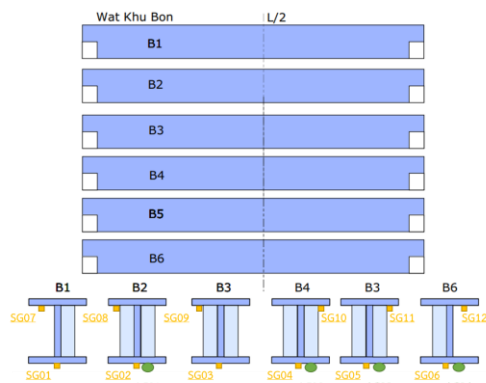
วิธี ASD จะพิจารณาค่า Allowable Stress โดยนำค่ากำลังดึงหรือกำลังรับแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate Stress, F_u) หรือกำลังที่จุดคราก (Yield Stress, F_y) ทหารด้วยตัวคูณความปลอดภัยคือ 1.67 ดังสมการ

$$\text{Allowable Stress} = \frac{\text{Yield Stress}(F_y)}{1.67} \quad (4)$$

2.4 แนวทางการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน

2.4.1 กำหนดตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน

ในการตรวจวัดสะพานข้ามคลองคูบอน กรุงเทพมหานคร เป็นสะพาน โครงสร้างเหล็กชนิด I-Girder ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดนั้นจะ อยู่บริเวณด้านล่างกึ่งกลางของคานสะพานได้แสดงดังรูปที่ 7 โดยในการ ติดตั้ง จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดบริเวณกึ่งกลางคานจำนวน 6 คาน โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัด 3 ประเภท ได้แก่ วัดค่าความเครียด (Strain Gauge) การเอียงตัว(Tilt Meter) และความเร่ง (Accelerometer)



รูปที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบสะพาน

จากนั้นจะทำการวัดขนาดและมิติสะพานสำหรับการนำอุปกรณ์ ตรวจวัดสะพานติดตั้งเข้ากับคานของโครงสร้างสะพานดังรูปที่ 8



(ก) การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด

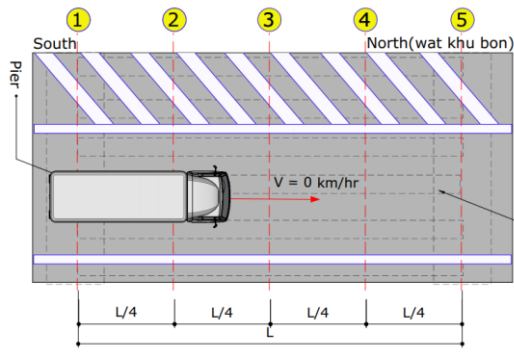


(ข) การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการเสียรูปเชิงมุม

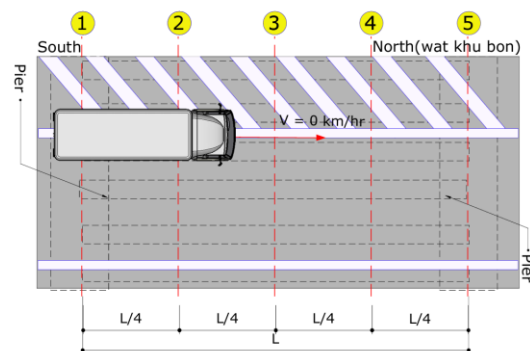
รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบสะพาน

2.5 ขั้นตอนการทดสอบ

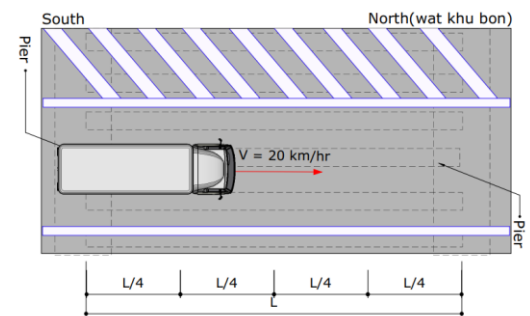
การตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสะพานจะทำการ ทดสอบแบบ Static Load Test และแบบ Dynamic Load Test เพื่อ จำลองพฤติกรรมการใช้งานจริงของสะพาน โดยการทดสอบแบบ Static Load Test จะกระทำต่อโครงสร้างโดยจะให้น้ำหนักบรรทุกที่มีน้ำหนักประมาณ 25 ตันต่อคัน มาทำการทดสอบเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ และหยุดตามตำแหน่ง ต่างๆ เพื่อให้คานทดสอบเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทดสอบ หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นจึงเริ่มทำการทดสอบแบบ Dynamic Load Test โดยการให้รถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ผ่านสะพานด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับและใช้เซนเซอร์วัดค่าความเครียด (Strain Gauge) การเอียงตัว(Tilt Meter) และความเร่ง (Accelerometer) เพื่อ นำมาหาอัตราส่วนความหน่วง และความถี่ธรรมชาติ ของคานโดยการนำมา ติดบริเวณ L/2 ของความยาวคาน โดยการทดสอบจะทำการทั้งหมด 2 รูปแบบ Static Load Test และแบบ Dynamic Load Test แบ่งเป็น 4 กรณี โดย กรณีที่ 1 คือจะทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างโดยจะใช้ รถบรรทุก จำนวน 1 คัน โดยมีน้ำหนักคันละประมาณ 25 ตัน ในเส้นทาง ช่องจราจรที่ 1 กรณีที่ 2 ทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างโดย จะใช้รถบรรทุก จำนวน 1 คัน โดยมีน้ำหนักคันละประมาณ 25 ตัน ในเส้นทางซ้าย ของช่องจราจร กรณีที่ 3 คือรถบรรทุกทดสอบจำนวน 1 คัน โดยมีน้ำหนัก ประมาณ 25 ตัน ในเส้นทางช่องจราจรที่ 1 ผ่านช่วงคานทดสอบเพื่อให้คาน เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดและวัดค่าระดับการสั่นไหว ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกและความเร็วทดสอบ โดยที่รถบรรทุกทดสอบจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และกรณีที่ 4 ใช้รถบรรทุกทดสอบจำนวน 1 คัน โดยมี น้ำหนักประมาณ 25 ตัน ในเส้นทางซ้ายของช่องจราจร ผ่านช่วงคาน ทดสอบเพื่อให้คานเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดและวัดค่าระดับการสั่นไหว ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกและความเร็วทดสอบ โดยที่รถบรรทุกทดสอบจะมีการ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



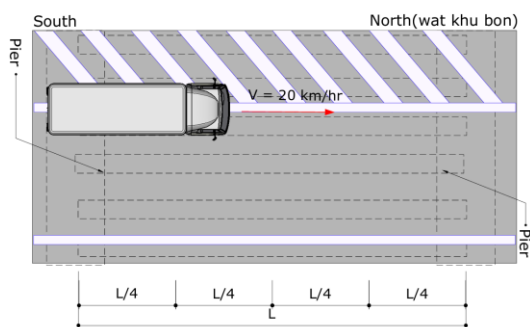
(ก) กรณีที่ 1 การทดสอบแบบสถิตย์โดยจะใช้รถบรรทุก จำนวน 1 คัน โดยมี น้ำหนักประมาณ 25 ตัน ในเส้นทางช่องจราจรที่ 1



(ข) กรณีที่ 2 การทดสอบแบบสถิตย์โดยจะใช้รถบรรทุก จำนวน 1 คัน โดยมี น้ำหนักประมาณ 25 ตัน ในเส้นทางซ้ายช่องจราจรที่ 1



(ค) กรณีที่ 3 การทดสอบแบบพลศาสตร์รถบรรทุกทดสอบจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในเส้นทางช่องจราจรที่ 1



(ง) กรณีที่ 4 การทดสอบแบบพลศาสตร์รถบรรทุกทดสอบจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในเส้นทางซ้ายช่องจราจรที่ 1



(จ) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักสะพานแบบสถิตย์



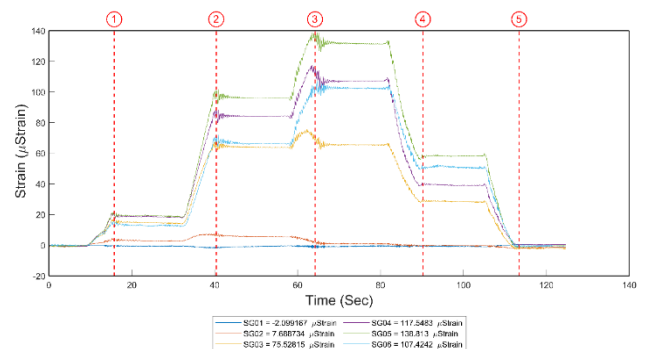
(ข) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักสะพานแบบพลศาสตร์
รูปที่ 9 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักสะพานทั้งหมด 4 กรณี

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบแบบสถิตย์

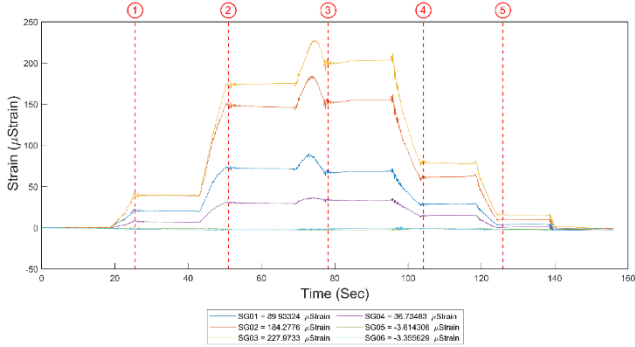
การทดสอบแบบสถิตย์จะใช้รถบรรทุกมีน้ำหนักประมาณ 25 ตัน ในเส้นทางช่องจราจร เพื่อให้คานโครงสร้างหลักเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทดสอบโดยที่รถบรรทุกที่ใช้ทดสอบจะหยุดตามตำแหน่งต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 11-14

3.1.1 ผลการทดสอบแบบสถิตย์ของสะพาน



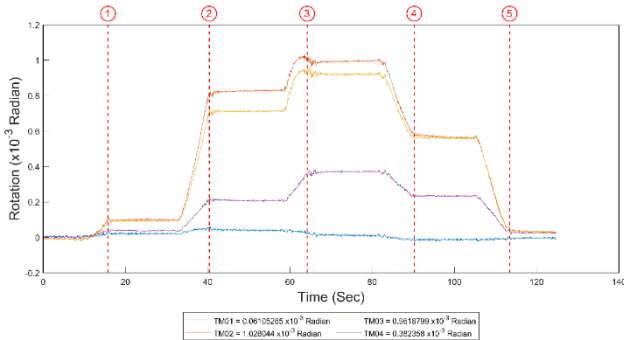
รูปที่ 10 ผลการทดสอบค่าความเครียดและตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุก Load case ที่ 1

3.1.2 ผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของคานหลังเสริมกำลังคานด้วย ชุดอุปกรณ์แฉกยาวพาราด์แรงจำนวน 1 ชุด



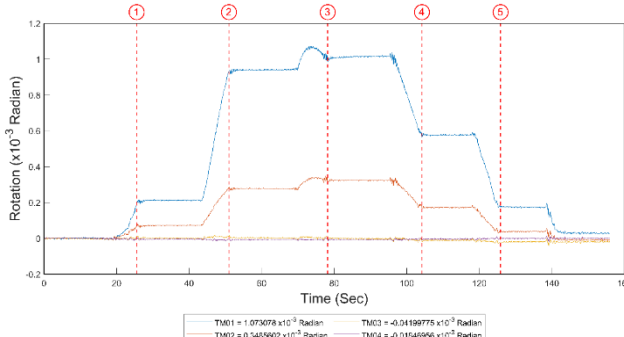
รูปที่ 11 ผลการทดสอบค่าความเครียดและตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุก Load case ที่ 2

3.1.3 ผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของคานหลังเสริมกำลังคานด้วย ชุดอุปกรณ์แฉกยาวพาราด์แรงจำนวน 3 ชุด



รูปที่ 12 ผลการทดสอบการแอ่นตัวและตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุก Load case ที่ 1

3.1.4 ผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของคานหลังเสริมกำลังคานด้วย ชุดอุปกรณ์แฉกยาวพาราด์แรงจำนวน 5 ชุด

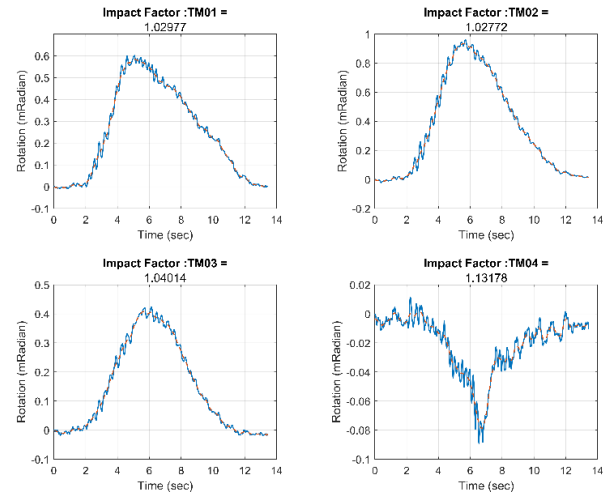


รูปที่ 13 ผลการทดสอบการแอ่นตัวและตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุก Load case ที่ 2

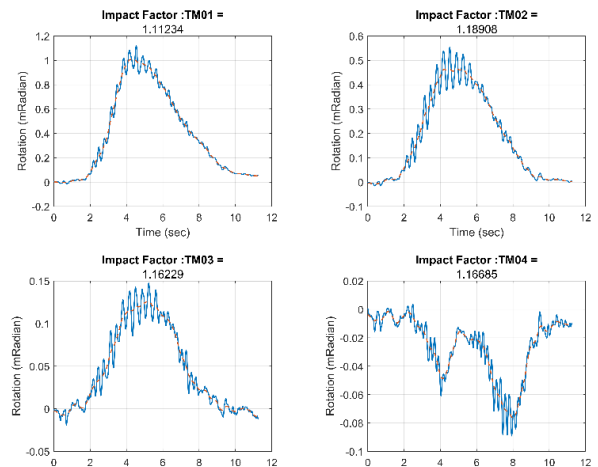
3.2 ผลการทดสอบแบบพลศาสตร์

การทดสอบและตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทดสอบแบบพลศาสตร์สามารถแสดงผลการตอบสนองที่เพิ่มขึ้นจาก

สถานะสถิตในรูปของ Impact Factor ของ AASHTO โดยพบว่าค่า Impact Factor มีค่าสูงสุด เท่ากับ 1.18980 ผลของการสั่นไหวทำให้การตอบสนองของสะพานเพิ่มขึ้นจากสถานะสถิตย์ตามมาตรฐาน ASSHTO (Impact Factor) ซึ่งต่ำกว่าค่าแฟคเตอร์แรงกระแทก IM =1.33 ที่ AASHTO LRFD เพื่อใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 14 ผลการทดสอบและตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุกทดสอบแบบพลศาสตร์ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง Load case ที่ 3



รูปที่ 15 ผลการทดสอบและตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้
น้ำหนักบรรทุกทุกทดสอบแบบพลศาสตร์ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง Load case ที่ 4

3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบสะพานกับมาตรฐานการทดสอบสะพาน

การทดสอบแบบสถิตย์ (Static Load Test) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทดสอบหาความเครียดและการเอียงตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 228 ไมโครสเตรน เมื่อเทียบกับมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC) ที่อนุญาตให้ไม่เกิน 732 ไมโครสเตรน และค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้นเท่ากับ 9.54 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ

มาตรฐาน ASSHTO ที่อนุญาตให้การแอ่นตัวของโครงสร้างไม่เกิน 16.6 มิลลิเมตร พบว่าผลการทดสอบไม่เกินค่ามาตรฐาน

การทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทดสอบหาค่าอัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติของสะพาน (I-Girder) จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Test) พบว่า สะพานคู่

ตารางที่ 2 ผลการตรวจวัดค่าความเครียดบริเวณกึ่งกลางคานโครงสร้างเหล็ก I - Girder ตามแนวยาวจากการทดสอบแบบสถิตศาสตร์

No.	Sensor	Description		Load Case 1 ($\mu strain$)	Load Case 2 ($\mu strain$)	ASD	สรุป
		Location	Girder No.				
1	SG01	L/2	1	-2	90	732	ผ่าน
2	SG02	L/2	2	8	184	732	ผ่าน
3	SG03	L/2	3	76	228	732	ผ่าน
4	SG04	L/2	4	118	37	732	ผ่าน
5	SG05	L/2	5	139	-4	732	ผ่าน
6	SG06	L/2	6	107	-3	732	ผ่าน

ตารางที่ 3 ผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวคานโครงสร้างเหล็ก I-Girder จากการแปลงค่าการเสียรูปเชิงมุม

No.	Sensor	Description		Load Case 1 (mm)	Load Case 2 (mm)	AASHTO L/1200 (mm)	สรุป
		Location	Girder No.				
1	TM01	L/4	2	0.53	9.54	16.6	ผ่าน
2	TM02	L/4	4	9.18	3.12	16.6	ผ่าน
3	TM03	L/4	5	8.56	-0.35	16.6	ผ่าน
4	TM04	L/4	6	3.38	-0.17	16.6	ผ่าน

ตารางที่ 4 อัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติของสะพานโครงสร้างเหล็ก I-Girder

Load Case	Min (m/s^2)	Max (m/s^2)	DIN 4150 (m/s^2)	สรุป	Natural Frequency (Hz)	Damping Ratio
3	-0.2110	0.2092	1.26	ผ่าน	4.063	3.579
4	-0.2087	0.2173	1.26	ผ่าน	4.188	2.827
				เฉลี่ย	4.125	3.203

4. สรุปผลการวิจัย

การทดสอบสะพานข้ามคลองคูบอน มีวัตถุประสงค์หลักประเมินประสิทธิภาพกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานเหล็กข้ามคลองคูบอน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งาน จากการคำนวณด้วยมาตรฐานดังนี้

4.1 การทดสอบแบบสถิตย์ (Static Load Test)

ค่าความเครียดและการเอียงตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 228 ไมโครสเตรน เมื่อเทียบกับมาตรฐาน American Institute of Steel Construction (AISC.) ที่อนุญาตให้ไม่เกิน 732 ไมโครสเตรน และค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างที่เกิดขึ้นเท่ากับ 9.54 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ

มาตรฐาน ASSHTO ที่อนุญาตให้การแอ่นตัวของโครงสร้างไม่เกิน 16.6 มิลลิเมตร พบว่าผลการทดสอบไม่เกินค่ามาตรฐาน

4.2 การทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load Test)

ค่าอัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติของสะพาน (I-Girder) จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Test) พบว่า สะพานคู่บอน (I-Girder) จะมีสัดส่วนความหน่วงโดยเฉลี่ยประมาณ 3.203% และความถี่ธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ 4.125 Hz และความถี่สูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.2173 m/s^2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน DIN 4150 อนุญาตให้ของโครงสร้างไม่เกิน 1.26 m/s^2 พบว่าผลการทดสอบไม่เกินค่ามาตรฐาน

จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าสะพานข้ามคลองคูบอนยังคงมีความปลอดภัยต่อการใช้งานสัญจรได้อย่างปกติ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจาก ขววงทางหลวง กรุงเทพมหานคร กรมทางหลวง และขอขอบคุณ รศ.ดร.กิตติภูมิ รอดสิน สำหรับคำแนะนำในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lu, P., Xu, Z., Chen, Y., and Zhou, Y. (2020). Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model. *Engineering Structures*, 214, 110641.
- [2] Bujňáková, P., Jošt, J., & Farbák, M. (2018). Load testing of Highway Bridge. *MATEC Web of Conferences*, 196, 02020.
- [3] Bhattacharya, B., & Chajes, M. J. (2004). *In-Service Load & Resistance Factor Rating Method for Bridges*. Conference Paper.
- [4] Morrill, J. L. (2016). *Live-Load Test and Finite-Element Model Analysis of a Steel Girder Bridge* Utah State University.
- [5] ณภัทร เมฆวรวิทย์, ณัฐธิดา ตันติจิรสกุล, ศุภณัฐ เจนไตรชาญ, และ อิศารัตน์ วิสุทธิ์เสวีวงศ์. (2565). การประเมินและวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานเดชาติวงศ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ. *โครงการวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*.
- [6] สมพงษ์ บุตรงาม. (2561). การศึกษากำลักรับน้ำหนักของสะพานเหล็กที่ใช้สลักเกลียวและการเชื่อมยึดชิ้นส่วน. *วารสารวิชาการวิศวกรรมโยธา*.
- [7] ปรินทร์ ส่องแสงศิริศักดิ์, ศิรภาพ เฉลิมเกียรติ, สิวานารถ อยู่ยูนาน, และ วัชร ฌ ระนอง. (2566). การศึกษาวิเคราะห์และออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพคานสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิด I-Girder. *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566
- [8] Khalil, A. H. H. (2002). *Towards a Vibration Limit State for Buildings and Bridges*. Ain Shams University.
- [9] Mertz, D., and Oliver, K. (2022). *Steel Bridge Design Handbook: Chapter 18 - Load Rating of Steel Bridges* American Institute of Steel Construction (AISC). (Publication No. B918-22).
- [10] DIN 4150-3. (1999). *Vibration in Buildings – Part 3: Effects on Structures*. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.
- [11] AASHTO. (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (8th Edition)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.