



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

EVALUATION OF STRUCTURAL PERFORMANCE IN DECHATIWONG BRIDGE

การประเมินพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของสะพานเดชาติวงศ์

เกริกไกร ปริญาพล¹ ราชวัลลภ กัมพูพงศ์² สมวุฒิ อภัยรัตน์² ศุภศิษฐ์ ศรีวรานันท์^{3*} ณัฐเมศวร์ วุฒิวรรณศักดิ์³ อรประภา อุบแก้ว⁴
วงศ์วิสุทธิ์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์⁵ พรชัย ศิลารมย์² สราวุธ ทรงศิริไธ²

¹ สาขาวิชาการตลาดและการจัดการโลจิสติกส์, คณะวิทยาการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

² กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology

⁵ บริษัท ทำใหม่คอนกรีต จำกัด

ARTICLE INFO:

Received: Nov. 15, 2023

Received Revised Form: Nov. 30, 2023

Accepted: Dec. 8, 2023

ABSTRACT :

Dechatiwong Bridge crossing Chao Phraya River is located at Nakhon Sawan province. It has been in service since 1950, reaching over 74 years. Visual inspection results revealed that main structural components were deteriorated, igniting concern for its safety. The assessment found that the structural capacity of the bridge's substructures was still sufficient. Thus, the bridge restoration for superstructure was proceeded using AASHTO-LRFD.

Strengthening plans were separated into 2 main approaches: 1) arch spans and 2) approaching spans. For the arch spans, the strengthening included: enlarge cross section of arch girders and cover with steel plates; strengthen joints on arch girders with gusset plates; add a vertical steel rod between two existing inclined hanger rods; enlarge cross section of tie girders, install post-tension tendons along the longitudinal direction and cover with steel plates; brace two tie girders on both sides (left-right) with transverse rods installing turnbuckles; replace old bearings with new spherical bearings. For the approach spans, the strengthening included: enlarge cross section of tie girders and cover with steel plates; brace two tie girders on both sides (left-right) with transverse rods installing turnbuckle; strengthen with a diagonal PT bar at the section near support to increase shear capacity. In addition, decks in arch spans and approach spans were reinforced by attaching steel plate at the bottom. Despite several strengthening measures will be applied to enhance structural capacity, the analysis of safety index that considered variation of deteriorated material strength did not allow full trailers and semi-trailers on bridge to increase safety and prolong bridge life.

*Corresponding Author,

Email address: supasit.sriv@ku.ac.th

KEYWORDS : Structural assessment, Arch bridge, Reinforced concrete, Strengthening

บทคัดย่อ :

สะพานเดชาติวงศ์ เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา ก่อนเข้าสู่จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งเปิดให้บริการในปี พ.ศ. 2493 จนถึงปัจจุบัน (พ.ศ. 2567) สะพานมีอายุครบ 74 ปี จากผลการตรวจสอบความเสื่อมสภาพด้วยสายตาพบว่า ชิ้นส่วนหลักของโครงสร้างมีความเสื่อมสภาพรุนแรง มีสภาพไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบบูรณะและเสริมกำลังสะพาน โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASSHTO LRFD ผลการประเมินพบว่า โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ยังคงสามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้อย่างปลอดภัย แต่โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) มีความสามารถไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องบูรณะและเสริมกำลัง

แผนการบูรณะสะพานจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนที่เป็นช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) และ 2) ส่วนที่เป็นช่วงสะพานเชิงลาด (Approach Span) โดยจะทำการบูรณะส่วนที่เป็นช่วงสะพานโค้ง ด้วยการขยายหน้าตัดคานโค้งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และปิดโดยรอบด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งจะติดตั้งแผ่นเหล็กประกบที่ตำแหน่งฝั่งลวดซิงบนคานโค้ง พร้อมทั้งเพิ่มลวดซิงในแนวตั้งระหว่างลวดซิงที่มีอยู่เดิมในแนวเอียง ทำการขยายหน้าตัดคานหลักคอนกรีตให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ฝั่งลวดอัดแรงตามแนวยาวของคานตามยาว และปิดโดยรอบด้วยแผ่นเหล็ก นอกจากนี้จะยึดคานตามยาวทั้ง 2 ฝั่ง (ซ้ายและขวา) ด้วยเส้นลวดตามแนวขวางที่ติดตั้งเกลียวเร่ง (Turnbuckle) ทำการยกและเปลี่ยนจุดรองรับสะพานใหม่เป็น Spherical Bearing ทั้งหมด ส่วนการบูรณะช่วงสะพานเชิงลาด จะทำการขยายหน้าตัดคานตามยาวให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและปิดโดยรอบด้วยแผ่นเหล็ก ทำการยึดคานตามยาวทั้ง 2 ฝั่ง ด้วยเส้นลวดตามขวางที่ติดตั้งเกลียวเร่ง (Turnbuckle) ทำการเสริมเหล็ก PT Bars ในแนวทแยงที่หน้าตัดคานตามยาวใกล้จุดรองรับเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงเฉือน นอกจากนี้จะเสริมกำลังพื้นสะพานทั้งหมดโดยใช้แผ่นเหล็กปิดใต้ท้องสะพานทั้งช่วงสะพานเชิงลาดและช่วงสะพานโค้ง ถึงแม้โครงสร้างจะถูกออกแบบบูรณะให้มีความสามารถสูงขึ้นมาก แต่ผลการวิเคราะห์ดัชนีความปลอดภัยที่พิจารณาความแปรปรวนของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เสื่อมสภาพไปมาก จึงยังคงแนะนำห้ามรถบรรทุกทุกพ่วงหรือรถบรรทุกกึ่งพ่วงใช้งานสะพาน ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยและเป็นการยืดอายุการใช้งาน

คำสำคัญ: การประเมินโครงสร้าง, สะพานโค้ง, คอนกรีตเสริมเหล็ก, การเสริมกำลัง

1. บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาจัดทำแนวทางการบูรณะสะพานประวัติศาสตร์ของกรมทางหลวงที่ก่อสร้างก่อนปี พ.ศ. 2500 เพื่อศึกษาและจัดทำแนวทางการบูรณะสะพานประวัติศาสตร์ซึ่งมีอายุครบ 70 ปี โดยสะพานดังกล่าวนี้ยังเป็นหลักฐานความสำเร็จทางวิศวกรรมของประเทศ ด้วยโครงสร้างคานโค้งที่ส่งงานแบบ Bowstring ซึ่งอาศัยพื้นสะพานในการดึงรับแรงหลักที่กระทำต่อม่อสะพาน [1-3] ทำให้สามารถก่อสร้างสะพานขนาดใหญ่ข้ามแม่น้ำที่ดินฐานรากไม่แข็งแรงได้สำเร็จ ก่อนที่จะมีการนำเทคโนโลยีลวดอัดแรงและเสาเข็มเจาะมาใช้ ยังเป็นความภาคภูมิใจให้กับกรมทางหลวง และทำให้กรมทางหลวงเป็นที่ยอมรับในวงการวิศวกรรมระดับนานาชาติ อย่างไรก็ตามแม้ในปัจจุบันสะพานดังกล่าวนี้ยังคงมีความสำคัญอย่างมากต่อการคมนาคมทางถนนของประเทศ เป็นสะพานที่ตั้งอยู่บนทางหลวงสายหลัก เข้าและออกจากตัวจังหวัดที่มีการจราจรหนาแน่น แต่ได้ถูกจำกัดการใช้งาน เนื่องจากมีสภาพที่ทรุดโทรมตามการใช้งานที่ผ่าน ดังนั้น หากทำการบูรณะ ให้มีสภาพพร้อมใช้งานตลอดเวลา

นอกจากจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้ทางแล้ว ยังจะสามารถช่วยระบายรถเข้าและออกจากตัวจังหวัด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจของประเทศได้เป็นอันมาก อีกทั้งยังเป็นการอนุรักษ์และเพิ่มคุณค่าการใช้ประโยชน์สะพานที่เป็นหลักฐานความสำเร็จทางวิศวกรรมให้อยู่คู่ประเทศไทยต่อไป

ขอบเขตการดำเนินงานประกอบด้วยการจัดทำคาร์ระดับและมิติสะพาน การจัดทำรายละเอียดความเสื่อมสภาพของสะพานตามแนวทางของกรมทางหลวง [4] การสำรวจโครงสร้างไดน้ำ การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพาน การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน การออกแบบบูรณะสะพาน การจัดทำแบบรายละเอียดการบูรณะสะพานเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานไทยและมาตรฐานสากล โดยในการสร้างแบบจำลองและออกแบบโครงสร้างสะพานจะยึดตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [5]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

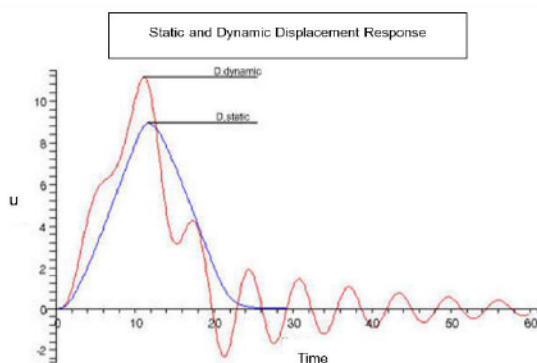
2.1 ตัวประกอบแรงกระแทก (Impact Factor)

เป็นค่าตัวประกอบที่ใช้คูณกับแรงกระทำของรถบรรทุกที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแบบสถิต เพื่อพิจารณาผลกระทบจากแรงกระแทกและการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งผ่าน ค่าตัวประกอบแรงกระแทกสามารถคำนวณได้โดย สมการที่ 1

$$I = \frac{R_{Dym}}{R_{Sta}} \quad (1)$$

โดยที่ R_{Dym} คือค่าสูงสุดของผลการตอบสนองแบบพลวัต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา, R_{Sta} คือค่าสูงสุดของผลการตอบสนองแบบสถิต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจวัดแบบสถิตได้ จะทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Dynamic Load Test ผ่านกระบวนการกรองความถี่แบบ Low Pass Filter เพื่อแยกส่วน Pseudo-Static ออกมาจาก Dynamic Response โดยส่วนที่เป็น Pseudo-Static นี้จะเปรียบเสมือนผลการตอบสนองของโครงสร้างแบบสถิต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ซึ่งไม่รวมผลกระทบจากการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยจะใช้ค่าสูงสุดของ Pseudo-Static สำหรับค่า R_{Sta} เพื่อใช้คำนวณในสมการ

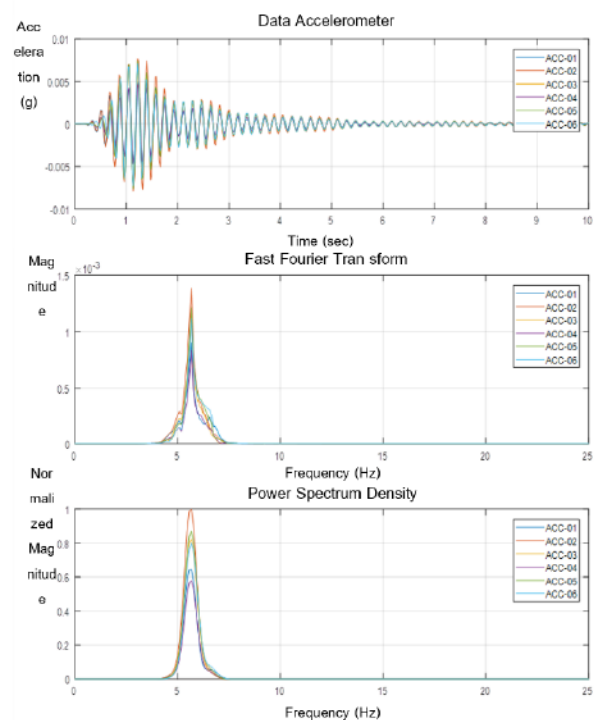


รูปที่ 1 ค่าการตอบสนองของโครงสร้างแบบ Pseudo Static และแบบ Dynamic

2.2 ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

ค่าความถี่ธรรมชาติเป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน สามารถตรวจวัดได้จากการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free Vibration) ถ้าสะพานได้รับแรงกระทำจากภายนอกที่มีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ สะพานจะมีการตอบสนองแบบสั่นพ้อง (Resonance) โดยระดับการตอบสนองจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งวิบัติ

การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ สามารถทำได้โดยนำข้อมูลการสั่นไหวที่บันทึกในรูปแบบ Time-History (เช่น ประวัติข้อมูลความเร่ง) มาวิเคราะห์ดังตัวอย่างใน รูปที่ 1 จากนั้นทำการแปลงข้อมูลด้วยวิธี Fourier Transform ให้อยู่ในรูปของ Frequency Domain สุดท้ายจะพิจารณาค่าความถี่ที่มีขนาดค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุดเป็นค่าความถี่หลักหรือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลการตรวจวัดสะพาน

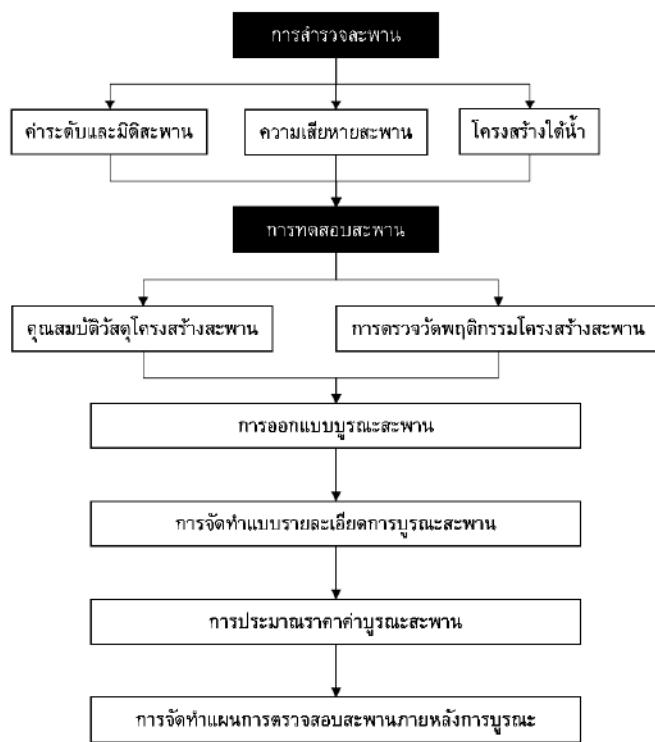
2.3 รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shapes)

เป็นลักษณะจำเพาะของการเสียรูปแบบพลวัตของแต่ละสะพาน โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นได้หลายโหมด แต่โหมดที่สำคัญจะเป็นโหมดแรก ๆ (มีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ) ส่วนโหมดท้าย ๆ (ซึ่งมีค่าความถี่สูง) จะเป็นการสั่นสะเทือน หรือ Noise และจะมี

ความสำคัญน้อยกว่าโหมดแรก ๆ การหารูปปร่างการสั่นไหวจำเป็นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ให้กระจายและครอบคลุมช่วงสะพานที่พิจารณา โดยตำแหน่งที่ติดตั้งต้องเป็นตำแหน่งที่อ่อนไหว (Sensitive) ต่อค่าความถี่ธรรมชาติ และควรสามารถสั่นไหวได้หลายโหมด การสร้าง Mode Shape จะสร้างตามค่าความถี่ธรรมชาติที่เลือก โดยใช้ค่า Amplitude ของแต่ละตำแหน่งอุปกรณ์เป็นตัวแทนการพล็อตค่าการแอ่นตัว และใช้ Phase ของ Accelerometer ในการกำหนดทิศทางของการแอ่นตัวว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม

3. ขั้นตอนการสำรวจและตรวจสอบ

ขั้นตอนการดำเนินงานสำรวจและตรวจสอบเป็นไปตาม รูปที่ 3

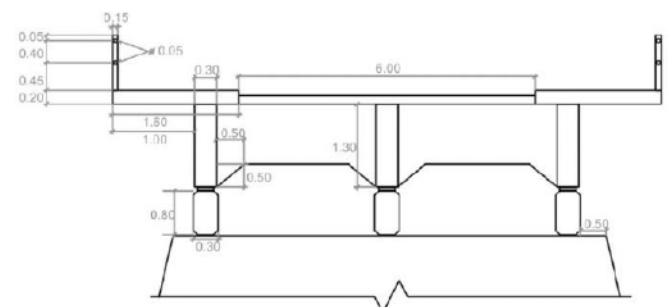


รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

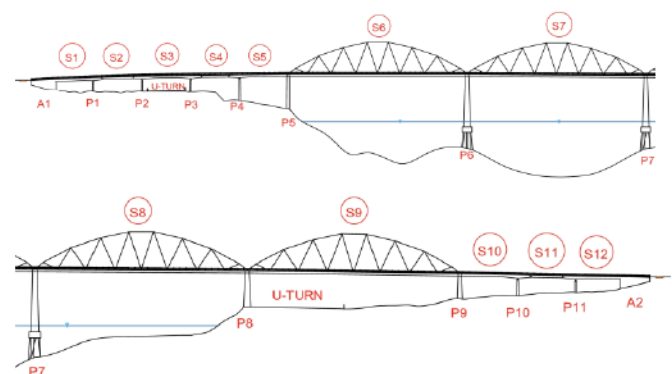
3.1 การจัดทำค่าระดับและมิติของโครงสร้าง

การดำเนินงานในส่วนแรกเป็นการสำรวจค่าระดับหลังสะพาน และการตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพาน เพื่อให้ได้รูปร่างพื้นสะพานเดชาตวิวงศ์แบบ 3 มิติ ที่สามารถอธิบายตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นสะพานได้ทั้งค่าระดับทางราบและทางตั้ง ทำให้สามารถแสดงรูปร่างของสะพานทั้งตามแนวยาวและแนวตัดขวาง อีกทั้งยังสามารถแสดงถึงการเอียงตัวของสะพานในแต่ละหน้าตัดได้ ซึ่งตำแหน่งเหล่านี้เป็นตำแหน่งหลักที่สามารถใช้

ตรวจสอบการทรุดตัวหรือเอียงตัวของโครงสร้างสะพานในอนาคตได้ จากการสำรวจหน้าตัดโครงสร้างแสดงใน รูปที่ 4 และลักษณะโครงสร้างสะพานโดยรวมใน รูปที่ 5 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าสะพานประกอบด้วย 12 ช่วงสะพาน แบ่งเป็นช่วงสะพานเชิงลาด (Approach Span) ฝั่งกรุงเทพฯ 5 ช่วง (S1-S5) ช่วงสะพานคานโค้ง (Arch Span) 4 ช่วง (S6-S9) และช่วงสะพานเชิงลาดฝั่งนครสวรรค์อีก 3 ช่วง (S10 – S12) มีตอม่อตบริม (Abutment) 2 ตอม่อ (A1 และ A2) และตอม่อตบกลาง (Pier) อีก 11 ตอม่อ (P1-P11) โดยเมื่อพิจารณาโครงสร้างแล้วลักษณะโครงสร้างส่วนบนสามารถจำแนกออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ สะพานช่วงยื่น 1 ฝั่ง (Span with 1 Overhang) สะพานช่วงยื่น 2 ฝั่ง (Span with 2 Overhang) สะพานแบบแขวน (Suspended Span on Overhang) และสะพานโค้ง (Arch Span) แสดงดัง ตารางที่ 1



รูปที่ 4 มิติหน้าตัดสะพาน (หน่วย: เมตร)



รูปที่ 5 โครงสร้างสะพาน

ตารางที่ 1 ลักษณะโครงสร้างส่วนบนของสะพาน

ลักษณะโครงสร้าง	ช่วงสะพาน
Span with 1 Overhang	S5 และ S10
Span with 2 Overhang	S1, S3 และ S12
Suspended Span on Overhang	S2, S4, และ S11
Arch Span	S6, S7, S8, และ S9

3.2 การสำรวจความเสื่อมสภาพ

โครงการนี้ใช้วิธีการตรวจสอบหลักตามแนวทางของระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System, BMMS) สำนักก่อสร้างสะพาน เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับสะพานเดชาติวงศ์ พร้อมทั้งประเมินระดับสภาพการใช้งานของแต่ละชิ้นส่วนสะพาน

จากการสำรวจตำแหน่งความเสื่อมสภาพแยกตามประเภทชิ้นส่วนพบว่าชิ้นส่วนที่มีจำนวนความเสื่อมสภาพมากที่สุด คือ ทางเท้า (128 ตำแหน่ง) รองลงมา คือ กำแพงตอม่อ (32 ตำแหน่ง) ชิ้นส่วนที่มีสภาพการใช้งาน (Condition Rating, CR) ต่ำที่สุด คือ ทางเท้า (ระดับวิบัติ) นอกจากนี้ยังมีอีก 4 ชิ้นส่วน ที่มีสภาพการใช้งานระดับวิกฤติ (CR=1) ได้แก่ พื้นสะพาน ไตอะแฟรม คานตามยาว และอุปกรณ์รองคาน (Bearing) จากการสำรวจในภาพรวมของสะพานพบว่าการเสื่อมสภาพและปริมาณชำรุดที่ค่อนข้างมาก พบคอนกรีตหลุดล่อนและมองเห็นเหล็กเสริมในหลาย ๆ บริเวณที่เป็น พื้นสะพาน ไตอะแฟรม และคานตามยาว บ่งบอกถึงระดับสนิมในเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นค่อนข้างมากแล้ว ผิวคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเลยแตกและหลุดล่อนออกมาก นอกจากนี้ คานตามยาว (Girder) ในช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) มีรอยแตกดัดหลายเส้นขนานกัน จากท้องคานถึงพื้นสะพาน บ่งบอกว่าช่วงสะพานโค้งไม่สามารถรับแรงดัดจากน้ำหนักบรรทุกจรได้เพียงพอ ส่วนบริเวณตอม่อตบริม (Abutment) และตอม่อกลางน้ำ (Pier) มีการเสื่อมสภาพหลายตำแหน่งแต่ยังไม่รุนแรงมากนัก

เมื่อพิจารณาการประเมินความเสื่อมสภาพในภาพรวมเชิงตัวเลข ผลการประเมินพบว่าสะพานมีค่า Weighted Critical Damage Rating (WCDD) = 3.68 (จากคะแนนเต็ม 5) หรือแปลงให้อยู่ในรูป Weighted Critical Condition Rating (WCCR) = 5 - 3.68 = 1.32 ซึ่งอยู่ระหว่าง ระดับวิกฤติ (CR=1) และระดับ

ชำรุด (CR=2) กล่าวโดยรวมสะพานเดชาติวงศ์มีการเสื่อมสภาพมาก ค่อนข้างจะวิกฤติ ควรได้รับการซ่อมบำรุงและเสริมกำลัง

3.3 การสำรวจโครงสร้างใต้น้ำ

การสำรวจโครงสร้างส่วนที่อยู่ใต้น้ำได้ใช้เครื่อง Sonar Scan ทำให้สามารถมองเห็นลักษณะท้องน้ำตามแนวสะพานและสภาพโครงสร้างตอม่อส่วนที่อยู่ใต้น้ำได้ ผลการสำรวจพบว่าร่องน้ำลึกจะอยู่ในช่วงสะพาน S6 ระหว่างตอม่อ P5 และ P6 โดยมีความลึกอยู่ที่ 8.60 เมตร สภาพดินบริเวณรอบตอม่อไม่มีการกัดเซาะ ตัวอย่างภาพการสำรวจแสดงดัง รูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการสำรวจระดับร่องน้ำ

3.4 คุณสมบัติวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพานในโครงการนี้ มีรวมทั้งสิ้น 4 รายการ ประกอบด้วย (1) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (3) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และ (4) การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

ผลการทดสอบวัสดุโครงสร้างสะพานพบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดคอนกรีตของชิ้นส่วนทางเท้า คานตามยาว คานขอย ไตอะแฟรม ตอม่อตบกลาง และตอม่อตบริม มีค่าเท่ากับ 14.8, 13.3, 14.5, 12.2, 16.7 และ 7.3 MPa ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ตามหลักสถิติพบว่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนทางเท้า คานตามยาว คานขอย ไตอะแฟรม ตอม่อตบกลาง และตอม่อตบริม กำลังรับแรงอัดคอนกรีตของชิ้นส่วนสะพานที่ทดสอบมีโอกาสต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมือ (14.5 MPa) เท่ากับ 47.8, 58.5, 50.0, 67.0, 34.7, 98.2 % ตามลำดับ แสดงว่าปัจจุบันกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตส่วนใหญ่ต่ำกว่ามาตรฐานคอนกรีตผสมมือที่ใช้ก่อสร้างสะพานในสมัยก่อน

สำหรับผลการตรวจวัดค่าความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นในชิ้นส่วนทางเท้า คานตามยาว คานขอย ไตอะแฟรม กำแพงตอม่อ

ต่อมอดับริม และพื้นสะพาน พบว่า มีโอกาสที่ความลึกคาร์บอนชั้นจะเกิดลึกถึงชั้นเหล็กเสริมเท่ากับ 23.3, 16, 9.8, 31.8, 17.2, 13.6, 22.7 % ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าปัจจุบันทุกชั้นส่วนล้วนมีโอกาสที่จะเกิดสนิมได้ทั้งสิ้น

ผลการทดสอบเหล็กเสริม ในแบบก่อสร้างสะพานเดชาดิวงศ์ไม่พบการระบุข้อกำหนดของเหล็กเสริม ดังนั้นจึงสมมติว่าการใช้เหล็กเสริมเหมือนสะพานรุ่นเก่าของกรมทางหลวง โดยที่เหล็กข้ออ้อยนิยมใช้เกรด SD30 และเหล็กกลมนิยมใช้เกรด SR24 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Tensile Strength) ไม่น้อยกว่า 295 MPa และ 235 MPa ตามลำดับ จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กข้ออ้อยและเหล็กกลมพบว่ามีโอกาสต่ำกว่ามาตรฐานเหล็ก SD30 และ SR24 อยู่ 6.7% และ 36.2% ตามลำดับ แสดงว่าปัจจุบันเหล็กกลมจำนวนไม่น้อยมีกำลังต่ำกว่ามาตรฐาน

4. การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้าง

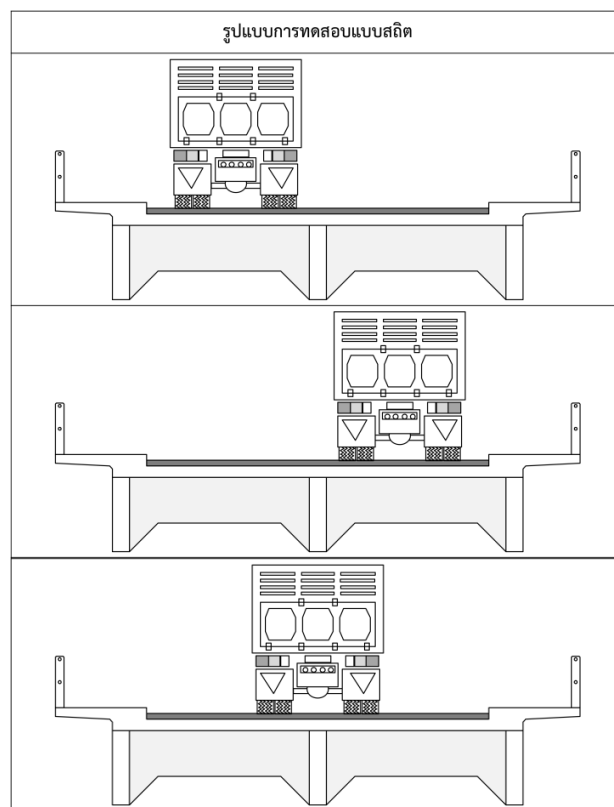
4.1 การทดสอบสะพานแบบสถิต (Static Load Test)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร จากการตรวจสอบสภาพโครงสร้างในปัจจุบันพบว่ามีความเสื่อมสภาพหลายตำแหน่ง ดังนั้นการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานจึงใช้รถบรรทุกสิบล้อจำนวน 2 คัน โดยเป็นรถบรรทุกเปล่า 10 ตัน 1 คัน และรถบรรทุกขนวัสดุ 18 ตัน 1 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม เพื่อหลีกเลี่ยงความเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพาน

สำหรับการทดสอบแต่ละครั้ง น้ำหนักทดสอบทั้ง 2 ประเภท ได้แก่รถบรรทุกเปล่า และรถบรรทุกน้ำหนักที่กล่าวข้างต้น จะถูกแบ่งการเดินรถ (Load patterns) ออกเป็น 3 บริเวณที่แตกต่างกัน ได้แก่ บริเวณกึ่งกลางคานด้านซ้าย กึ่งกลางคานด้านขวา และกึ่งกลางสะพาน ตามลำดับดัง **รูปที่ 7**

ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาจอดนิ่งอยู่กับที่ โดยให้ระยะกึ่งกลางของชุดเพลาลงตรงกับตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดัง **รูปที่ 8** ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการหยุดรถ จะบันทึกผลการตอบสนองของโครงสร้าง เช่น ค่าความเครียด (Strain) ค่าการแอ่นตัว (Deflection) โดยจะนำข้อมูลจากการตรวจวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ มา

วิเคราะห์และแสดงให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ต่าง ๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับตำแหน่งของรถบรรทุก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวแนวดิ่งกับตำแหน่งของรถบรรทุก เป็นต้น นอกจากนี้ผลการตอบสนองที่ได้จากตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำกับสะพาน สามารถนำไปใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพานให้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับโครงสร้างจริงมากที่สุด



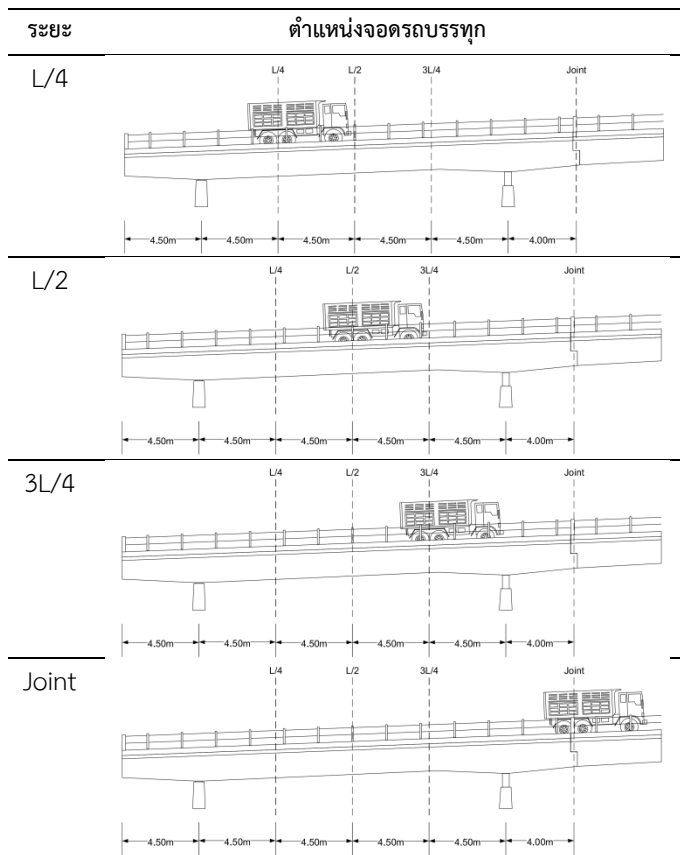
รูปที่ 7 รูปแบบการทดสอบแบบสถิตด้วยรถบรรทุกเปล่าและรถบรรทุกน้ำหนัก

4.2 การทดสอบสะพานแบบพลวัต (Dynamic Load Test)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกน้ำหนักมาวิ่งผ่านบนสะพานด้วยความเร็วต่างกัน โดยแบ่งทดสอบด้วยรถบรรทุกน้ำหนัก วิ่งด้วยความเร็วคงที่ 20, 30, และ 50 กิโลเมตร/ชั่วโมงตามลำดับ

ในแต่ละความเร็วที่วิ่งทดสอบบนสะพาน จะทำการตรวจวัดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของสะพานด้าน

ต่าง ๆ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) รูปร่างการสั่นไหวในโหมดต่าง ๆ (Mode Shape) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratios) และตัวประกอบแรงกระแทก (Impact Factor) โดยค่าความถี่ธรรมชาติที่ตรวจวัดได้มีความหมายทางกายภาพ คือ ถ้าสะพานได้รับแรงกระทำเป็นจังหวะเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ สะพานจะเกิดการสั่นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Resonance) จนกระทั่งวิบัติ โดยค่าความถี่ธรรมชาติสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ Eigen Value ของ Global Stiffness Matrix และ Global Mass Matrix



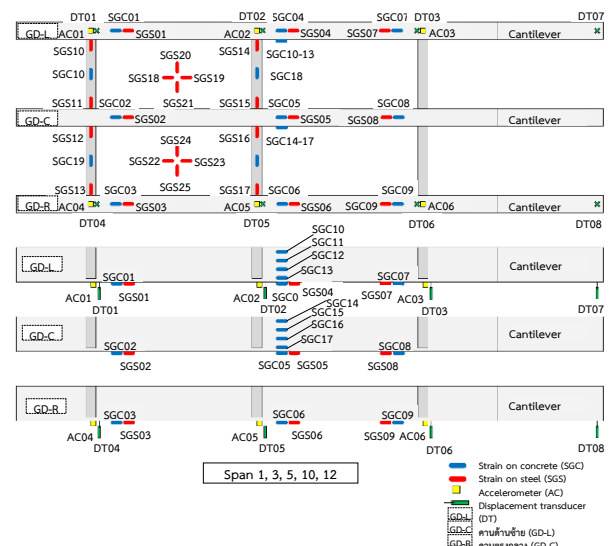
รูปที่ 8 การทดสอบสะพานแบบสถิติโดยการให้รถบรรทุกจอดที่ตำแหน่งต่างๆ

ดังนั้น ค่าความถี่ธรรมชาติ จึงเป็นค่าที่บ่งบอกถึง Global Stiffness Matrix และ Global Mass Matrix ของสะพาน ที่อยู่ในรูปของ Scalar ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมทริกซ์ที่มีตัวเลขเป็นจำนวนมาก การที่มวลของสะพานไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจึงบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสติฟเนสของสะพาน หากสะพานมีสภาพชำรุด สติฟเนสจึงมีแนวโน้มที่จะอ่อนลง หากสะพานได้รับการเสริมกำลัง สติฟเนสมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความถี่

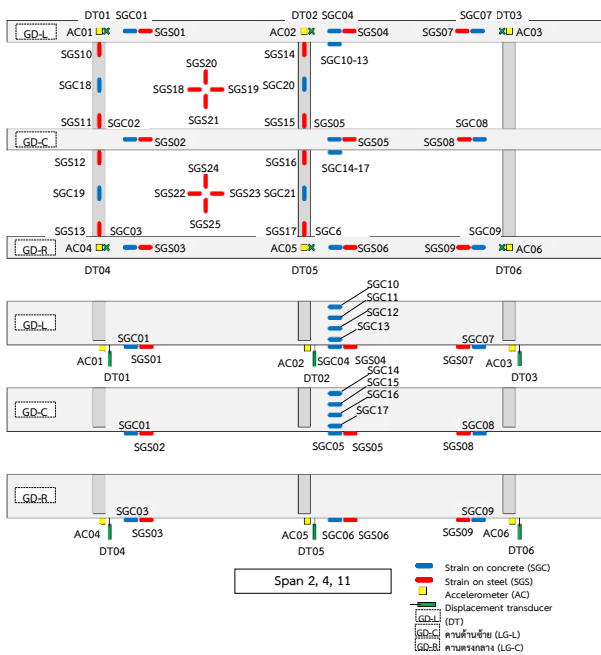
ธรรมชาติและโหมดการสั่นไหวจึงนิยมใช้เป็นพารามิเตอร์หลักในการคาร์ริเบตแบบจำลองสะพานให้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของสะพานในแต่ละช่วงอายุการใช้งาน

4.3 การติดตั้งและความสำคัญของอุปกรณ์ตรวจวัด

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและแบบพลวัต ประกอบไปด้วย (1) อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีต (Strain Gauge for Concrete) (2) อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวเหล็ก (Strain Gauge for Steel) (3) อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) และ (4) อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) โดยสามารถจำแนกตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตามพฤติกรรมของโครงสร้าง ออกเป็น 3 กลุ่มดังรูปที่ 9 ถึง รูปที่ 11

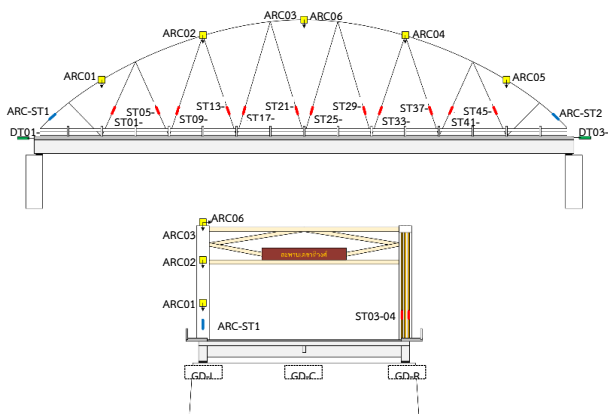


รูปที่ 9 กลุ่มที่ 1 : Approach with cantilever โครงสร้างแบบ Span with 1 Overhang และ Span with 2 Overhang

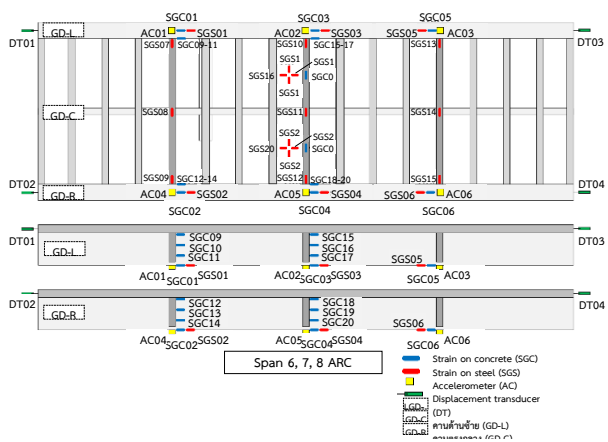


รูปที่ 10 กลุ่มที่ 2 : Suspended Approach

โครงสร้างแบบ Suspended Span on Overhang



n) Arch Span (ด้านบน)



ข) Arch Span (ด้านล่าง)

รูปที่ 11 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดกลุ่มที่ 3 : Arch Span

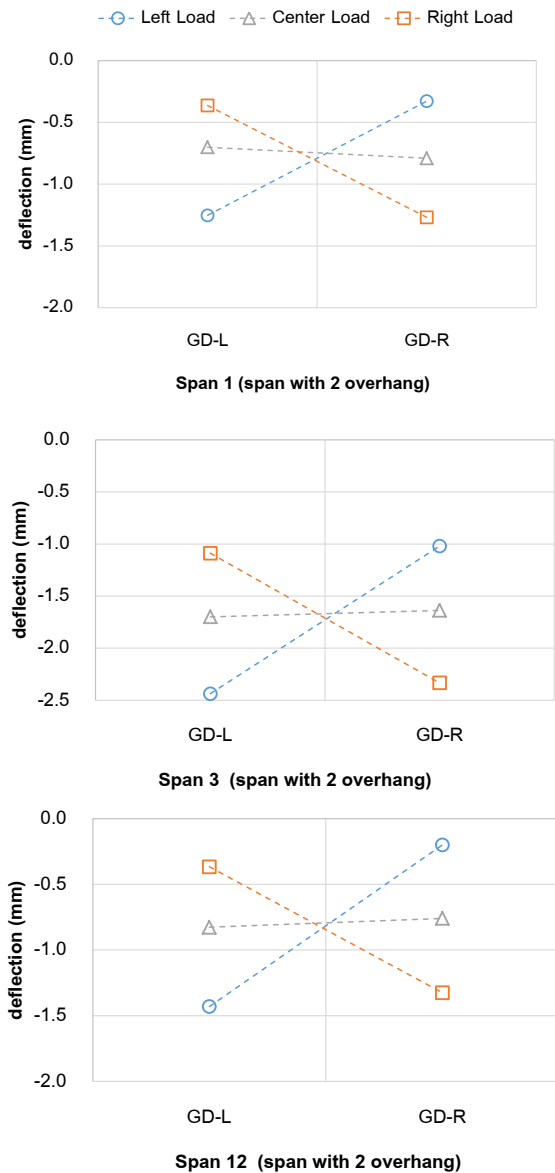
5. อภิปรายผลการทดสอบพฤติกรรมสะพาน

5.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมสะพานแบบสถิติ

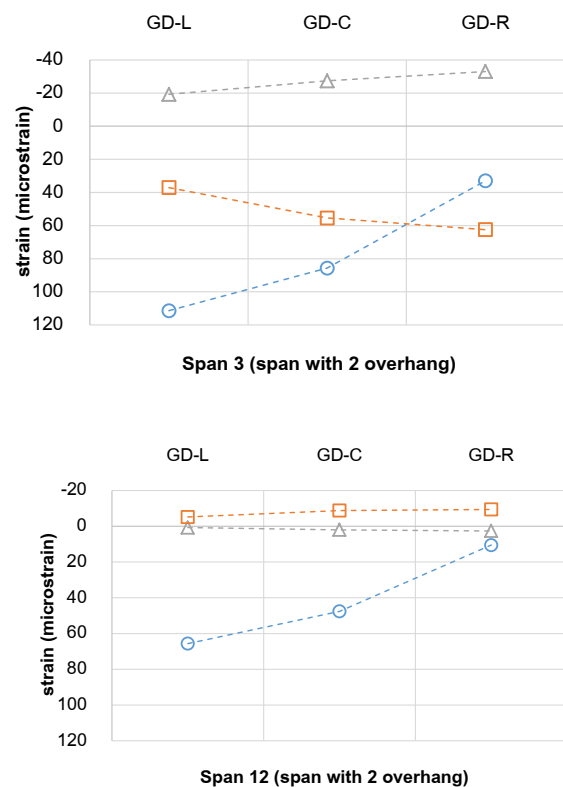
การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้แรงกระทำแบบสถิติมี 2 รูปแบบหลัก โดยที่บริเวณช่วงเชิงลาด (Approach Span, S1-S5 และ S10-S12) สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวและอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดได้ แต่บริเวณช่วงสะพานหลักที่เป็นคานโค้ง (Arch Span, S6-S9) ติดตั้งได้เพียงอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดเท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงข้ามแม่น้ำ ดังนั้นในบริเวณเชิงลาดจะเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวและค่าความเครียด ส่วนบริเวณสะพานหลักจะเปรียบเทียบเฉพาะค่าความเครียด

ผลการตรวจวัดโครงสร้างสะพานที่มีส่วนยื่น 1 ฝั่งโครงสร้างสะพานที่มีส่วนยื่น 2 ฝั่ง และสะพานแบบแขวนพบว่า มีผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวสอดคล้องกับตำแหน่งรถบรรทุกที่กระทำ โดยหารถบรรทุกจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะแอ่นตัวมากกว่า คานด้านขวา และหารถบรรทุกจอดด้านขวา คานด้านขวาจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านซ้าย โดยพฤติกรรมการแอ่นตัวของช่วงสะพานต่าง ๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน ยกเว้นกลุ่ม Span with 2 Overhang ที่ช่วงสะพาน S3 มีพฤติกรรมอ่อนกว่าช่วงสะพาน S1 และ S12 ค่อนข้างมาก พิจารณาได้จาก รูปที่ 12 โดยจากภาพจะพบว่าผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานด้านซ้ายและคานด้านขวา (GD-L และ GD-R) ของสะพานกลุ่ม Span with 2 Overhang จะเห็นว่าเมื่อรถบรรทุกน้ำหนัก 18 ตัน จอดด้านซ้าย คานด้านซ้าย (GD-L) จะแอ่นตัวประมาณ 1.3 - 2.45 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวา (GD-R) จะแอ่นตัวประมาณ 1.3 - 2.4 มม. และหากนำรถบรรทุกไปจอดไว้ตรงกลาง คานด้านซ้ายและด้านขวา (GD-L และ GD-R) จะแอ่นตัวประมาณ 0.7 - 1.7 มม. โดยภาพรวมช่วงสะพาน S1 และ S12 มีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน และช่วงสะพาน S3 มีพฤติกรรมอ่อนกว่าช่วงสะพาน S1 และ S12 รูปที่ 13 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางคานด้านซ้าย คานตรงกลาง และคานด้านขวา (GD-L, GD-C และ GD-R) ของสะพานกลุ่ม Span with 2 Overhang พฤติกรรมโดยภาพรวมจะสอดคล้องกับการแอ่นตัว นั่นคือเมื่อนำรถบรรทุกไปจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะเกิดความเครียดมาก หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวาจะเกิดความเครียดมาก

อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในการวัดความเครียดดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเชื่อมสภาพและแตกร้าว ค่าที่ตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ถึงแม้การทดสอบจะหลีกเลี่ยงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดคร่อมรอยแตก ซึ่งอาจจะทำให้ค่าที่อ่านได้มีความแปรปรวนสูง ดังนั้นข้อมูลความเครียดอาจใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์ต่อไป



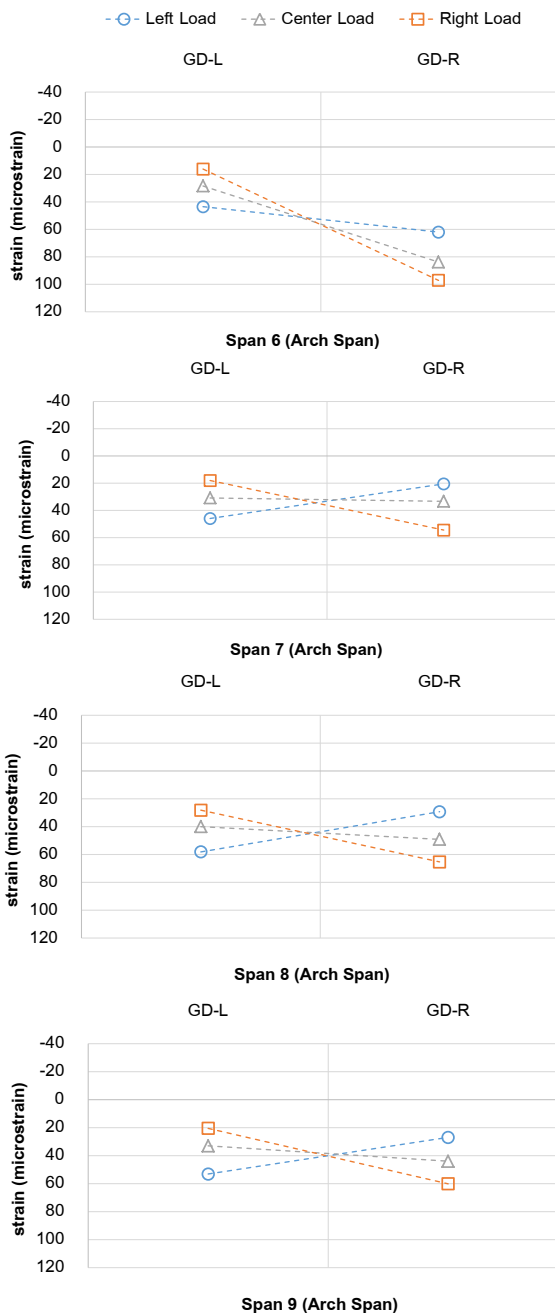
รูปที่ 12 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงสะพานลักษณะโครงสร้างแบบ Span with 2 Overhang



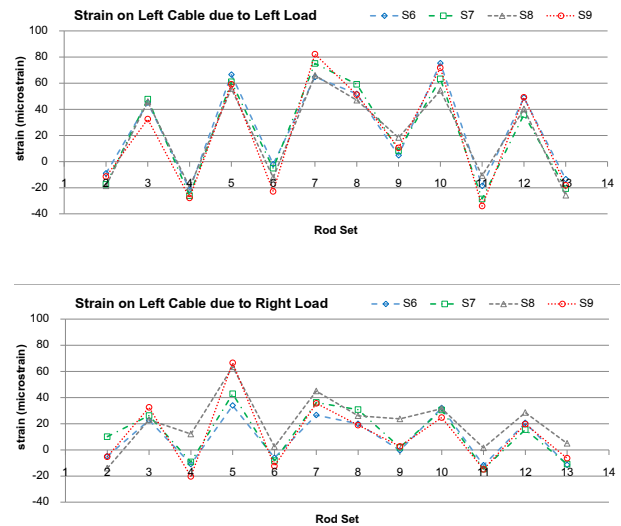
รูปที่ 13 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางช่วงสะพานลักษณะโครงสร้างแบบ Span with 2 Overhang

ผลการตรวจวัดความเครียดในลวดซึ่ง (Steel Rod) ของสะพาน Arch Span แสดงดัง รูปที่ 14 โดยลวดซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ฝั่ง คือ ด้านซ้ายและด้านขวา ในแต่ละตำแหน่งของลวดซึ่งจะมี 3 เส้นย่อย โดยจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดจำนวน 2 ตัว ตรวจวัดในเส้นที่ 1 และเส้นที่ 3 และหาค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของลวดซึ่งในแต่ละตำแหน่ง จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าช่วงสะพานทั้ง 4 (S6-S9) มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านซ้าย ลวดซึ่งฝั่งซ้ายจะยืดมากกว่าลวดซึ่งฝั่งขวา หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา ลวดซึ่งฝั่งขวาจะยืดมากกว่าลวดซึ่งฝั่งซ้าย พฤติกรรมการรับแรงของลวดซึ่งจากน้ำหนักบรรทุกจรที่กึ่งกลางคานจะประกอบด้วย 2 หลักการ คือ แรงดึงที่จะทำให้คานหลักแยกออกจากคานโค้ง และการถ่ายแรงภายในโครงถักจากกึ่งกลางคานไปสู่จุดรองรับซึ่งจะทำให้เกิด Tension Cord และ Compression Cord ซึ่งผลรวมของแรงทั้งสองหลักการนี้ทำให้ลวดซึ่งบางส่วนรับแรงดึงสลับกับบางส่วนรับแรงอัด โดยค่าแรงอัดที่ตรวจวัดได้ คือ ค่าแรงดึงในลวดซึ่งที่ลดลงเนื่องจากอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกจร หากพิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพาน

ด้วย ผลรวมของแรงในลวดซึ่งทั้งหมดยังคงอยู่ภายใต้แรงดึง แสดง
ดัง รูปที่ 15



รูปที่ 14 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางช่วงสะพานลักษณะโครงสร้าง
แบบ Arch Span



รูปที่ 15 ตัวอย่างค่าความเครียดที่ Steel Rod

5.2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบแบบพลวัต

ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) เป็นค่าจำเพาะของสะพานแต่ละตัว (Unique Characteristic) สะพานอาจถูกก่อสร้างด้วยมาตรฐานเดียวกัน แต่ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานก็อาจแตกต่างกันได้ ค่าความถี่ธรรมชาติอาจถูกนำมาใช้เป็นค่าที่บ่งบอกสติฟเนสในภาพรวม (Global Stiffness) ถ้าโครงสร้างมีสติฟเนสสูง ค่าความถี่ธรรมชาติจะสูงตามไปด้วย สะพานตัวเดียวกัน หากสติฟเนสลดลงจากการเสื่อมสภาพ ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลงตามไปด้วย หรือถ้ามีการปรับปรุงให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น (สติฟเนสสูงขึ้น) ค่าความถี่ธรรมชาติก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในแต่ละช่วงอายุสะพาน อาจมีการตรวจสอบค่าความถี่ธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการปรับแก้แบบจำลองสะพานให้มีสติฟเนสในภาพรวมใกล้เคียงกับสะพานจริง ณ ช่วงเวลานั้น เพื่อใช้แบบจำลองที่ปรับแก้แล้ว ประเมินการกระจายแรงภายในโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์ 4 กลุ่มช่วงสะพาน ได้แก่ Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang และ Arch Span พบว่ามีค่าเฉลี่ยความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.90, 4.87, 5.24, และ 3.80 Hz ตามลำดับ

ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) เป็นคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการสลายพลังงานการสั่นไหว ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง โดยทั่วไปหากโครงสร้างมีชิ้นส่วนที่สามารถขยับตัวได้มาก หรือมีส่วนประกอบของวัสดุที่ช่วยสลายพลังงาน หรือมีรอยแตกร้าว ค่าอัตราส่วนความหน่วงก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความหน่วง

โดยทั่วไปเป็นค่าที่ความแปรปรวนค่อนข้างสูง ผลการวิเคราะห์ 4 กลุ่มช่วงสะพาน ได้แก่ Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang และ Arch Span พบว่ามีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 3.88, 2.28, 5.10, และ 5.09 % ตามลำดับ

ตัวประกอบแรงกระแทก (Impact Factor, IM) เป็นค่าที่บ่งบอกว่าการสั่นไหวจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกทำให้เกิดแรงกระทำสูงกว่าสภาพรถบรรทุกที่จอดอยู่นิ่ง (แบบสถิต) เท่าไร ผลการตรวจวัดของช่วงสะพานต่าง ๆ พบว่า IM มีค่าในช่วง 1.07 – 1.26 ซึ่งยังไม่เกินค่า IM = 1.33 ที่ AASHTO LRFD เพื่อใช้ในการออกแบบ

6. การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์

ในการสร้างแบบจำลองและออกแบบโครงสร้างสะพานยึดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [5] เป็นหลัก ยกเว้นในกรณีที่ต้องการขยายโครงสร้างเดิม โดยวิธีต่อเชื่อมโครงสร้าง ก็จะทำให้การออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน และขนาดน้ำหนักตามโครงสร้างเดิม ส่วนการออกแบบของค้ำอาคาร (Member) จะใช้มาตรฐานการออกแบบของประเทศสหรัฐอเมริกา และไทย โดยจะนำเสนอในบทนี้ในรายละเอียดต่อไป

6.1 ข้อกำหนดการออกแบบสะพานประเภท Tie Arch Bridge

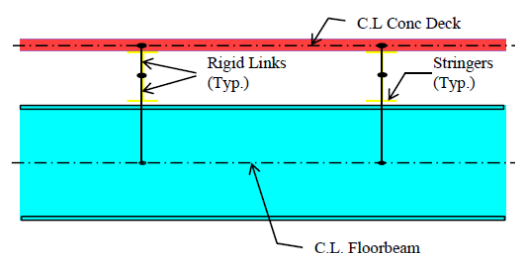
ในการออกแบบปรับปรุงสะพานประเภท Arch ที่พิจารณาในโครงการนี้ พิจารณาเพิ่มเติมจากข้อกำหนดตาม AASHTO LRFD ดังนี้

- 1) การพิจารณาความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของสะพาน Tie Arch ต่อการสั่นไหวของรถยนต์ (Traffic Influenced Bridge Dynamics)
- 2) การพิจารณาความถี่ธรรมชาติของสะพาน Tied Arch ต่อแรงลมที่กระทำด้านข้างของสะพาน (Wind Influenced Bridge Dynamic)
- 3) ความแข็งแรงของส่วนประกอบของสะพาน Tie Arch ต่อแรงกระทำ และผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO LRFD [6] หรือ HL – 93
- 4) การพิจารณาการปรับแรงใน Cable ที่เหมาะสมของสะพาน

6.2 หลักการสร้างแบบจำลองของสะพาน Tie Arch

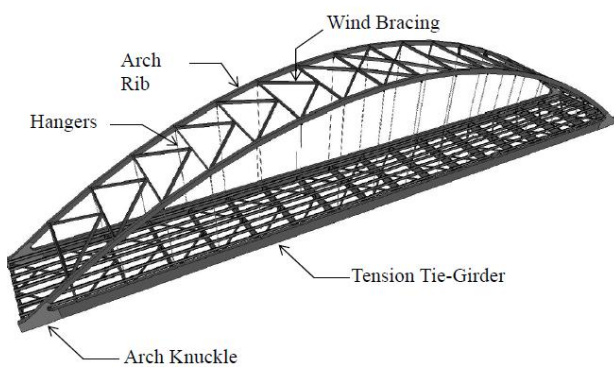
เนื่องจากสะพานประเภท Tie Arch มีพฤติกรรมที่ค่อนข้างซับซ้อน การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานใช้แบบจำลอง Finite Element Model (FEM) โดยระเบียบวิธี Finite Element Analysis (FEA) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนอง และพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน (Bridge Response) ได้แก่ การแอ่นตัว (Deflection) การบิด (Torsion) ความเค้น (Stress) การเคลื่อนตัวตามยาวของสะพาน ความถี่ที่เกิดจากการสั่นไหว ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของโครงสร้างสะพาน และ ลักษณะการสั่นไหวอิสระ

ในขั้นแรกของการสร้างแบบจำลอง การกำหนดชนิดของ Element เป็นสิ่งสำคัญมาก การเลือกใช้ชนิดของชิ้นส่วนนั้นอาจจะเลือกใช้ Element ในสองมิติหรือสามมิติ และเลือกใช้ชนิดของชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างจริงที่จะทำการวิเคราะห์ โดยที่ชนิดของชิ้นส่วนจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ตัวอย่างเช่น ใช้ Shell Element และ Frame Element สำหรับ Tie Girder หรือ Arch Rib ของสะพาน ใช้ Shell Element สำหรับพื้นสะพาน (Deck) หรือใช้ Frame Element สำหรับ Rigid Link / Bracing Beam ในการวิเคราะห์จะต้องคำนึงถึงรูปแบบการส่งผ่านแรง ตามความเหมาะสมของ Element แต่ละแบบ ในโครงการนี้จึงได้แบ่งการเลือกใช้ Element แบบจำลอง Finite Element สำหรับสะพานที่ทดสอบออกเป็น 5 รูปแบบ ดังนี้ (1) Cable Element (2) Rigid Link Element ใช้ในการต่อส่วนที่ต้องการให้มีพฤติกรรมแบบแข็งแรง (3) Frame Element จำลอง Tie Girder ของช่วงความยาวหลัก และ Arch Rib (4) Shell Element จำลองส่วนของพื้นของสะพาน และ (5) Spring เพื่อจำลองพฤติกรรมของ Bearing และ Expansion Joint ตัวอย่างแสดงดัง **รูปที่ 16**

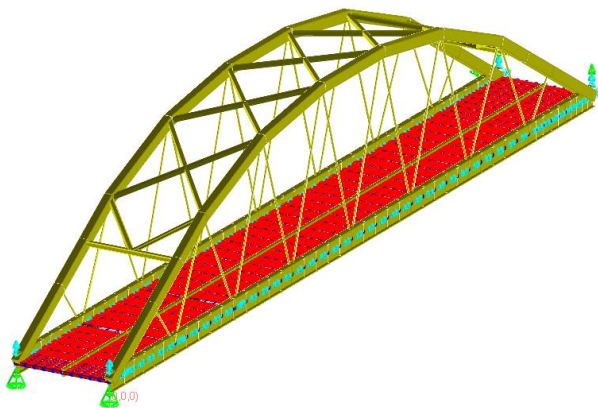


รูปที่ 16 ตัวอย่าง Element ประเภทต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element ของสะพาน

โดยในการสร้างแบบจำลองข้างต้น มีหลักการเลือกประเภทของ Element เพื่อจำลองพฤติกรรมของ Tie Arch Bridge ได้แก่ ในส่วนของ Hangers หรือ Cable ของ Tie Arch จะถูกจำลองให้สามารถรับแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักของพื้นสะพานและผลของแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรต่างๆ ส่วนของ Arch Rib จะถูกจำลองให้สามารถถ่ายแรงอัดที่เกิดจากการรองรับแรงดึงจาก Hanger ลงไปยังฐานรองรับ และ Arch Tie ที่เกิดแรงดึงเพื่อเกิดสมดุลแรงตามแนวราบ แบบขยายชิ้นส่วนโครงสร้างในช่วง Arch Span และภาพแบบจำลอง Finite Element ของสะพาน แสดงดังรูปที่ 17 และ รูปที่ 18 ตามลำดับ



รูปที่ 17 แบบขยายชิ้นส่วนโครงสร้างในช่วงสะพาน Arch Span



รูปที่ 18 แบบจำลองของสะพาน

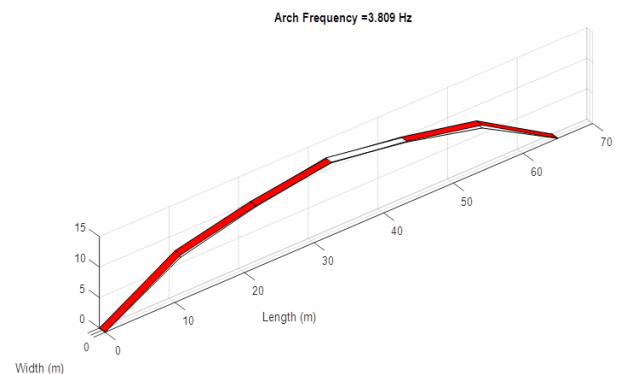
6.3 หลักวิเคราะห์แบบจำลองโดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้าง

ภายหลังจากการสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แล้ว ในขั้นตอนต่อไปได้ดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพานดังกล่าว โดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างที่ได้ดำเนินการในภาคสนาม เพื่อให้ผลของอายุของคอนกรีต ขั้นตอน

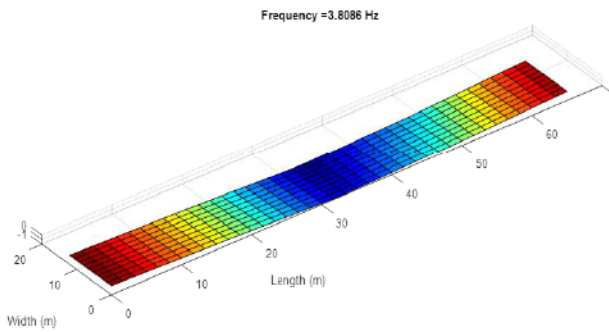
การดึงลวด Cable Hanger รวมทั้งลำดับการติดตั้งส่วนของ Tie Girder และการหล่อพื้น RC Deck จนสมบูรณ์เป็นคานสะพานได้นำมารวมในแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ในขั้นตอนของการปรับแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น สำหรับวิธีการในการพิจารณาผลของลำดับการก่อสร้างได้ทำภายใต้วิธีการวิเคราะห์แบบ Nonlinear Construction Stage Analysis ซึ่งลำดับการก่อสร้างที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ ก่อสร้างโครงสร้างส่วนล่าง หล่อคาน Arch Rib ติดตั้งคาน Tie Arch และ คานรองรับพื้นสะพานบน Temporary Formwork ทำการดึงลวด Hanger ดำเนินการหล่อพื้นสะพาน และติดตั้ง Barrier และผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต (Asphaltic wearing surface) จากนั้นจึงวิเคราะห์สะพานภายหลังการก่อสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ใช้ทดสอบในโครงการนี้

6.4 การปรับค่าแบบจำลองของสะพาน (FE Calibration with Test Results)

เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเนื่องจากแบบจำลองของสะพานมีความถูกต้อง แบบจำลองตามยาวของสะพานโดยวิธี Finite Element ได้นำมาปรับค่าของ Natural Frequency ให้สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้ในสะพาน (รูปที่ 19) โดยในการปรับค่าของแบบจำลองได้พิจารณา กำลังวัสดุ ขั้นตอนการก่อสร้าง แบบจำลองวัสดุเทียบกับเวลา เงื่อนไขของฐานรองรับของแบบจำลอง เป็นต้น ซึ่งหลังจากการปรับค่าของแบบจำลองสะพานนั้น ค่าของ Natural Frequency อยู่ในช่วง 4.3 - 4.7 Hz โดยค่าของ Mode Shape เป็นการสั่นไหวในแนวดิ่ง (Vertical Translation in z direction) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ให้ค่าของ Natural Frequency เท่ากับ 4.63 Hz และมี Mode Shape เป็น Vertical Translation



ก) Bending 3.8 Hz (Arch Rib)



ข) Bending 3.8 Hz (Deck)

รูปที่ 19 ตัวอย่างผลการทดสอบสะพาน

จากการปรับแก้แบบจำลองข้างต้นแบบจำลองของสะพานทำให้ค่าแรงภายในชิ้นส่วนต่างๆของสะพานมีความใกล้เคียงกับสภาวะปัจจุบันของตัวสะพาน ดังนั้นแรงภายในเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบหรือตรวจสอบโครงสร้างตามมาตรฐาน AASHTO และข้อกำหนดพิเศษอื่นๆ เพื่อใช้ในการประเมินสมรรถภาพของสะพานก่อนดำเนินการออกแบบปรับปรุงต่อไป

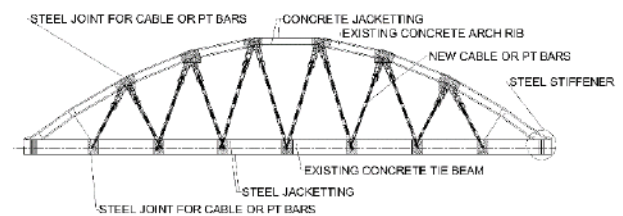
7. หลักการออกแบบบูรณะสะพาน

แนวทางการออกแบบบูรณะโครงสร้างสะพาน ได้จำแนกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ สะพานช่วง Main Span (Tied Arch Bridge) และ สะพานช่วง Approach Span โดยสำหรับสะพานช่วง Arch Bridge การออกแบบพิจารณาหลากหลายปัจจัย ได้แก่ การปรับปรุงและเสริมกำลังส่วนประกอบของสะพาน Arch Bridge ให้รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) [6] หรือในระดับ HL - 93 การปรับปรุงค่าการสั่นของโครงสร้างให้เหมาะสมกับการสั่นเนื่องจากยานพาหนะ และการปรับปรุงค่าการสั่นของโครงสร้างให้เหมาะสมกับการสั่นไหวเนื่องจากแรงลมด้านข้าง สำหรับสะพานช่วง Approach Span จะพิจารณาเฉพาะการรองรับน้ำหนักบรรทุกให้เป็นไปตามมาตรฐาน

7.1 สะพานช่วง Main Span (Tied Arch Bridge)

จากสภาพของส่วนประกอบโครงสร้างที่เสื่อมสภาพค่อนข้างมาก รูปที่ 20 แสดงแนวทางเลือกการออกแบบเสริมกำลัง Arch Rib พื้นสะพาน และ Hanger เนื่องจากความเสื่อมสภาพบริเวณ Arch Rib เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ประกอบด้วยลักษณะรับแรงของโครงสร้างที่มีโอกาสเกิดแรงดัดได้ การขยายหน้าตัดคานสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้ดี อีกทั้งเพื่อให้โครงสร้างมีความสวยงามและมีลักษณะดั้งเดิมจึงเสนอวิธีการ Concrete Jacketing

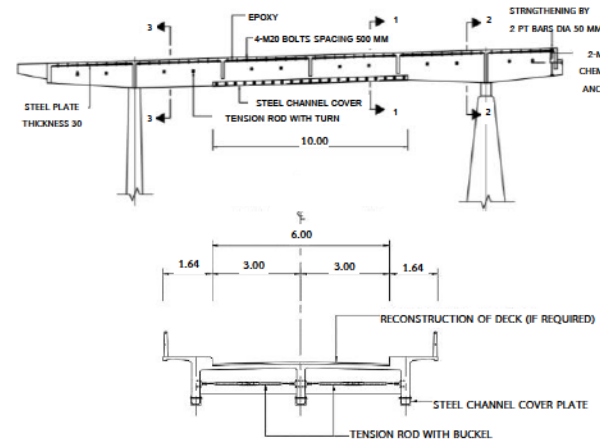
สำหรับ Arch Rib และใช้ Deck Replacement สำหรับพื้นสะพาน สำหรับ Tie Girder เนื่องจากโครงสร้างมีความเสื่อมสภาพมาก จึงเหมาะสมที่จะทำการเสริมกำลังด้วยระบบลวดอัดแรง ซึ่งใช้ร่วมกับ Concrete Jacking เพื่อลดโอกาสการเกิดการแตกร้าวของ Tie Girder ในอนาคต และยังลดการเกิดแรงแนวนอน (Horizontal Load) ที่ฐานรองรับ



รูปที่ 20 ตัวอย่างการปรับปรุงเสริมกำลังของสะพานช่วง Main Span (Tied Arch Bridge)

7.2 สะพานช่วง Approach Span

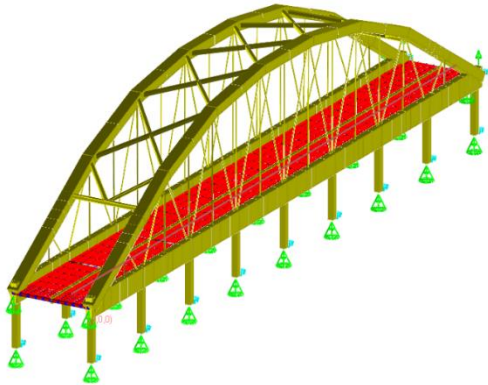
พื้นสะพานของช่วง Approach Span ได้นำเสนอให้ใช้ Deck Replacement และวิธี Steel Plate Strengthening สำหรับคาน I - Girder ดังแสดงในรูปที่ 21



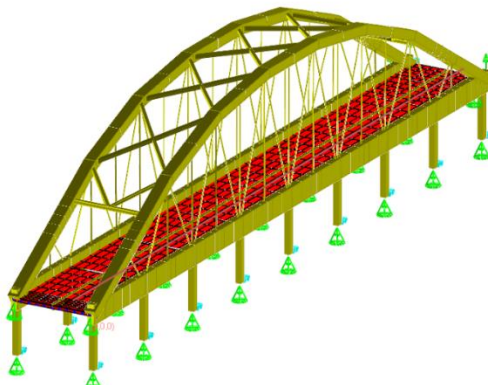
รูปที่ 21 ตัวอย่างการปรับปรุงเสริมกำลังของสะพาน

โดยการวิเคราะห์ขั้นตอนการเสริมกำลังของสะพานตามแนวทางที่ไดกล่าวข้างต้นนั้น ได้ทำการจำลองโครงสร้างตามลำดับขั้นตอนการเสริมกำลัง และวิเคราะห์ด้วย Nonlinear Construction Stage สำหรับหลักการการเสริมกำลังนั้นโครงสร้างสะพานจะไม่มี การตัดถูกเปลี่ยน Hanger เดิมระหว่างการเสริมกำลัง โดยขั้นตอนการเสริมกำลังประกอบไปด้วยการดำเนินการ Concrete Jacketing บริเวณ Arch Rib และ Tie Girder จากนั้น

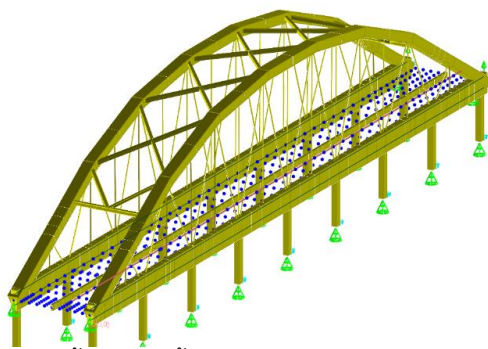
ดำเนินการติดตั้ง Hanger เพิ่มเติมเพื่อช่วยรับแรง เมื่อทำการติดตั้งส่วนเสริมกำลังเรียบร้อยแล้วจึงจะทำการเปลี่ยน Bearings ของสะพานใหม่ บูผิวจราจรใหม่และเปลี่ยน Expansion Joint แสดงขั้นตอนบางส่วนใน รูปที่ 22 ถึง รูปที่ 25



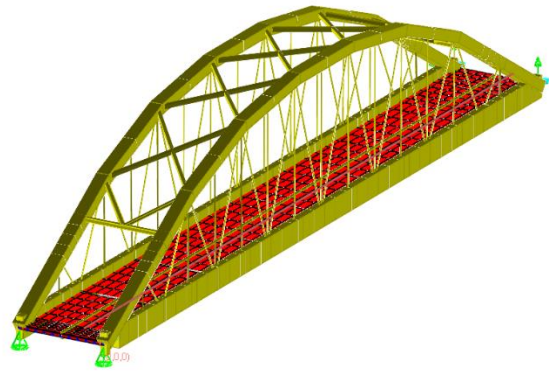
รูปที่ 22 การจำลองการใช้นั่งร้านยกสะพานเดิมระหว่างการก่อสร้าง



รูปที่ 23 ขั้นตอนติดตั้ง Hanger ใหม่



รูปที่ 24 ขั้นตอนติดตั้ง ดึงลวดอัดแรงในคาน Tie Girder



รูปที่ 25 ขั้นตอนการรื้อถอนนั่งร้านและถ่ายน้ำหนักลง Bearing ใหม่

8. ผลการออกแบบบูรณะสะพาน

8.1 ผลการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อเสริมกำลัง

จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Finite Element สามารถให้ค่าแรงภายในชิ้นส่วนต่างๆ โดยค่าของแรงรวมตาม Load Combination สามารถนำไปออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของสะพานได้ โดยการบูรณะส่วนที่เป็นช่วงสะพานโค้ง ประกอบด้วย การขยายหน้าตัดคานโค้งให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและปิดโดยรอบด้วยแผ่นเหล็ก การติดตั้งแผ่นเหล็กประกบที่ตำแหน่งฝังลวดซึ่งบนคานโค้ง พร้อมทั้งเพิ่มลวดซึ่งในแนวตั้งระหว่างลวดซึ่งที่มีอยู่เดิมในแนวเอียง การขยายหน้าตัดคานตามยาวให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำการฝังลวดอัดแรงตามแนวยาวของคานตามยาว และปิดโดยรอบด้วยแผ่นเหล็ก นอกจากนี้จะทำการยึดคานตามยาวทั้ง 2 ฝั่ง (ซ้ายและขวา) ด้วยเส้นลวดตามแนวขวางที่ติดตั้งเกลียวเร่ง (Turnbuckle) ทำการยกและเปลี่ยนจุดรองรับสะพานใหม่เป็น Spherical Bearing ทั้งหมด ส่วนการบูรณะช่วงสะพานเชิงลาด ประกอบด้วย การขยายหน้าตัดคานตามยาวให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและปิดโดยรอบด้วยแผ่นเหล็ก การยึดคานตามยาวทั้ง 2 ฝั่ง ด้วยเส้นลวดตามขวางที่ติดตั้งเกลียวเร่ง (Turnbuckle) การเสริมเหล็ก PT Bar ในแนวทแยงที่หน้าตัดคานตามยาวใกล้จุดรองรับเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงเฉือน นอกจากนี้จะเสริมกำลังพื้นสะพานทั้งหมดโดยใช้แผ่นเหล็กปิดใต้ท้องสะพานทั้งส่วนที่เป็นช่วงสะพานเชิงลาดและช่วงสะพานโค้ง

8.2 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมวิกฤติกับค่าการสั่นของสะพาน (ภายหลังการบูรณะ)

สำหรับการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมวิกฤติที่อาจส่งผลต่อการสั่นไหวของสะพานใน Mode การสั่นไหวด้านข้างและการสั่น

ไหวของสะพานในโหมด Torsion ทำการประมาณค่าของความเร็วลมวิกฤติ (Critical Wind Speed) จากข้อแนะนำของ AASHTO พบว่าก่อนการบูรณะ Critical Wind Speed เท่ากับ 81 km/hr และ หลังการบูรณะค่าของ Critical Wind Speed เท่ากับ 97.92 km/hr

โดยเมื่อนำค่าของความเร็วลมที่ใช้ออกแบบในประเทศไทย ตาม มยพ. 1311 [7] มาเปรียบเทียบกับ พิจารณาค่าของ V_{50} หรือ Reference Wind Speed ที่ความสูง 10 เมตร และมีค่า Return Period ประมาณ 50 ปี มีค่าเท่ากับ 25 เมตรต่อวินาที หรือ 90 km/hr ดังนั้น ค่าของความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบ มีค่าน้อยกว่าค่า Critical Wind Speed ภายหลังการบูรณะ เนื่องจาก ภายหลังการเสริมกำลัง ค่าของ Natural Frequency จะสูงขึ้นทำให้เกิดความความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น

9. สรุปผล

โครงการศึกษาจัดทำแนวทางการบูรณะสะพานประวัติศาสตร์ของกรมทางหลวงที่ก่อสร้างก่อนปีพ.ศ. 2500 ขึ้นเพื่อศึกษาและจัดทำแนวทางการบูรณะสะพานประวัติศาสตร์ซึ่งมีอายุครบ 70 ปี โดยผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

การดำเนินงานในส่วนแรกเป็นการสำรวจค่าระดับหลังสะพาน และการตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพาน เพื่อนำไปใช้สำหรับออกแบบการทดสอบโครงสร้างและสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสะพาน ประกอบด้วย 12 ช่วงสะพาน สามารถจำแนกลักษณะโครงสร้างด้านบนออกเป็น 4 ลักษณะ ได้แก่ Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang และ Arch Span

ผลการตรวจสอบความเสื่อมสภาพด้วยสายตา (Visual Inspection) พบว่าชิ้นส่วนที่มีจำนวนความเสื่อมสภาพมากที่สุดคือ ทางเท้า รองลงมา คือกำแพงตอม่อ ผลการประเมินสภาพการใช้งานโดยรวมด้วยสายตาตามระบบ BMMS พบว่า Weighted Critical Condition Rating (WCCR) มีค่าเท่ากับ 1.32 ซึ่งค่าทางตัวเลขใกล้เคียงกับระดับวิกฤติ ($CR=1$) บ่งบอกว่า สะพานเดชาติวงศ์มีชิ้นส่วนสำคัญที่มีความเสื่อมสภาพรุนแรง สภาพค่อนข้างวิกฤติ ควรเร่งซ่อมบำรุงและเสริมกำลัง

ผลการทดสอบวัสดุโครงสร้างสะพานพบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดคอนกรีตของชิ้นส่วนสะพานที่ทดสอบมีโอกาสต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมือ (14.5 MPa) สำหรับผลการตรวจวัดค่าความถี่การเกิดคาร์บอนขึ้นในชิ้นส่วนสะพานพบว่าทุกชิ้นส่วนล้วนมีโอกาสที่จะเกิดสนิมได้ทั้งสิ้น ผลการทดสอบเหล็กเสริม พบว่ากำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กข้ออ้อยและเหล็กกลมมีโอกาสดำกว่ามาตรฐานเหล็ก SD30 และ SR24 อยู่ 6.7% และ 36.2% ตามลำดับ แสดงว่าปัจจุบันเหล็กกลมจำนวนไม่น้อยมีกำลังต่ำกว่ามาตรฐาน

ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพาน การทดสอบแบบสถิต พบว่า ผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวสอดคล้องกับตำแหน่งรถบรรทุกที่กระทำ หากรถบรรทุกจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านขวา หากรถบรรทุกจอดด้านขวา คานด้านขวาจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านซ้าย โดยพฤติกรรมการแอ่นตัวของช่วงสะพานต่างๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน ยกเว้นกลุ่ม Span with 2 Overhang ที่ช่วงสะพาน S3 อ่อนกว่าช่วงสะพาน S1 และ S12 ค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าการตรวจวัดพฤติกรรม การรับน้ำหนักโดยใช้ค่าความเครียด ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีตที่แตกร้าวและเสื่อมสภาพมากมีแนวโน้มที่จะให้ผลคลาดเคลื่อน ส่วนผลการทดสอบแบบพลวัต พบว่ากลุ่มช่วงสะพาน Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang และ Arch Span มีค่าความถี่ธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ 3.90, 4.87, 5.24, และ 3.80 Hz ตามลำดับ ค่าตัวประกอบแรงกระแทก (Impact Factor, IM) ของทุกกลุ่มโครงสร้างมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.07 – 1.26 ซึ่งยังไม่เกินค่า $IM = 1.33$ ที่ ASSHTO LRFD เพื่อใช้ในการออกแบบ

การออกแบบบูรณะสะพานใช้มาตรฐาน ASSHTO LRFD โดยการปรับปรุงสะพานจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) และส่วนที่เป็นช่วงสะพานเชิงลาด (Approach Span) โดยการออกแบบพิจารณา การปรับปรุงและเสริมกำลังส่วนประกอบของสะพาน Arch Bridge ให้รองรับน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO LRFD (2007) หรือในระดับ HL-93 และการปรับปรุงค่าการสั่นของโครงสร้างให้เหมาะสมกับการสั่นเนื่องจากยานพาหนะ โดยในการออกแบบได้

นำผลที่ได้แบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อเสริมกำลัง

อย่างไรก็ตามถึงแม้โครงสร้างจะถูกออกแบบบูรณะให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงขึ้นมาก แต่ผลการวิเคราะห์หัดขึ้นีความปลอดภัยที่พิจารณาความแปรปรวนของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เสื่อมสภาพไปมาก แนะนำห้ามรถบรรทุกพ่วงหรือรถบรรทุกทุกทั้งพ่วงใช้งานสะพาน ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยและเป็นการยืดอายุการใช้งาน

10. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง และสำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม รวมทั้งบุคลากรกรมทางหลวงที่เกี่ยวข้องที่ช่วยให้การสนับสนุน และให้ความอนุเคราะห์เพื่อให้คณะผู้วิจัยได้เข้าไปตรวจสอบสภาพสะพาน รวมสนับสนุนทั้งข้อมูลต่างๆเพื่อให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

11. แหล่งอ้างอิง

- [1] Li, Y., Zhao, J., Bao, L., Dong, L., & Wang, Q., 2021. Numerical and theoretical analysis of spatial shear lag effect in through wide box bowstring arch bridge main girder, *Structures*, Vol. 33, pp. 141-151.
- [2] Feng, Q., Wei, P., Lou, J., Cai, J., & Xu, R., 2022. Analytical solution for quick decision of tied-arch bridge parameters at early-design stage based on Hellinger-Reissner variational method, *Structures*, Vol. 44, pp. 1443-1453.
- [3] De Luca, A., Guidi, L. G., & Matildi, G., 2023. “La Martella” Split Bowstring Arch Bridge Across Gravina Creek: From Design to Construction, *Structural Engineering International*, Vol. 33, No.1, pp. 52-63.
- [4] กรมทางหลวง, 2555. *คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน สำนักก่อสร้างสะพาน ระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน*
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010. *LRFD Bridge Design Specifications, 5th edition*.
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007. *LRFD Bridge Specifications, 4th edition*.
- [7] กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, 2550. *มยผ. 1311 – 50 มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร*.