



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

THE SEISMIC ASSESSMENT OF TWO REINFORCED CONCRETE BRIDGES

การประเมินโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เกริกไกร ปริญญาพล^{1*}, ภูรินทร์ สุขเกษม², ราชวัลลภ กัมพูพงศ์³, นายสุวิทย์ รอดภัย³, วุฒิชัย อมรประสิทธิ์ผล³, พรชัย ศิลารัมย์³, ธนัช ศรีพัฒน์อินทร์³, อรประภา อุบแก้ว⁴, วงศ์วิสุทธิ์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์⁵, สราวุธ ทรงศิริไโล³

^{1*} สาขาวิชาการตลาดและการจัดการโลจิสติกส์, คณะวิทยาการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³ กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม

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

⁵ บริษัท ทำใหม่คอนกรีต จำกัด

ARTICLE INFO:

Received: 18 November 2023

Received Revised Form: 2 December 2023

Accepted: 12 December 2023

ABSTRACT :

The purpose of this study is to evaluate the seismic resistance of two Bridges within the realm of ground shaking resulting from movement of Khlong Marui Faults. The evaluation was conducted numerically using time history analysis along with pushover analysis. Conditions of both bridges as well as their fundamental dynamic properties were field-examined and were used to validate the models. Analyses of both bridges excited by seven selected seismic waves representing an earthquake of magnitude of 5.9 to 6.0 Richter reveal that the top pier displacements of both bridges exceed their limiting capacities. It is recommended that the restrainers should be installed in both bridges to prevent possible damages. In particular, the piers of Second Bridge should also be strengthened.

KEYWORDS : Structural assessment, Reinforced concrete, Bridge, Strengthening

บทคัดย่อ :

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของสะพานสองแห่ง ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานของกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย โดยการวิเคราะห์จะใช้วิธีโครงสร้างแบบประวัติเวลา (Time-History Analysis) ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเส้นตรง (Pushover Analysis) นอกจากนี้ยังได้อาศัยข้อมูลการตรวจสอบสภาพการใช้งานของสะพาน การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต และการตรวจวัดการสั่นไหวเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของสะพานในภาคสนาม สำหรับใช้ในการปรับแก้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของสะพานให้สอดคล้องกับสภาพปัจจุบันมากที่สุด

*Corresponding Author,
Email address: kerkkrai.p@snru.ac.th

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของสะพานทั้ง 2 แห่ง ด้วยแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย จำนวน 7 ชุด ที่มีความรุนแรงขนาดประมาณ 5.9 – 6.0 ริคเตอร์ พบว่า ที่ยอดเสาตอม่อของทั้ง 2 สะพาน มีความต้องการในการเคลื่อนที่เกินขีดจำกัดของความสามารถในการเคลื่อนที่ของเสาตอม่อ ดังนั้น จึงแนะนำให้มีการติดตั้ง Restrainers สำหรับลดการเคลื่อนที่ของเสาตอม่อให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเกิดเหตุแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สะพานแห่งที่ 2 ควรทำการเสริมกำลังให้กับตอม่อสะพาน เพื่อให้มีความสามารถการต้านทานการเคลื่อนที่สูงขึ้น และเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้หากเกิดแผ่นดินไหวขนาดดังกล่าว

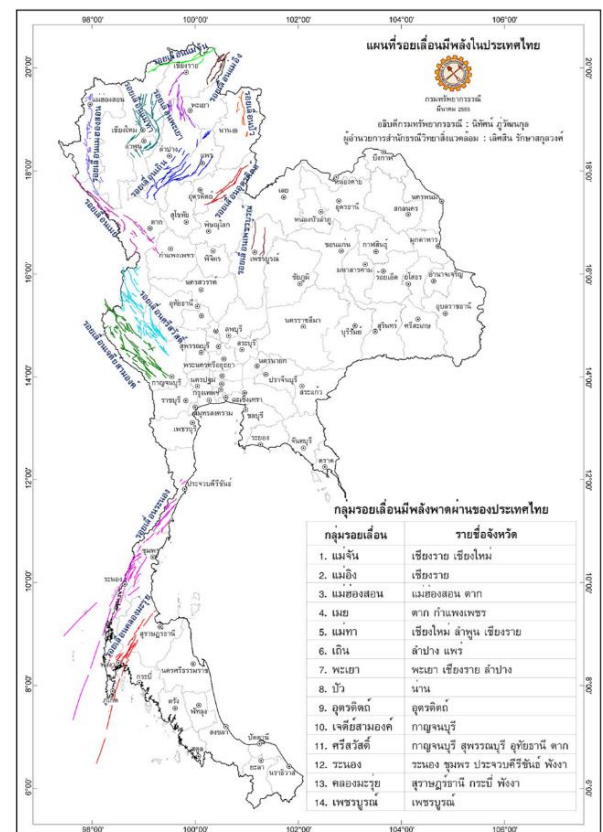
คำสำคัญ: การประเมินโครงสร้าง, คอนกรีตเสริมเหล็ก, สะพาน, การเสริมกำลัง

1. บทนำ

แรงแผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วสามารถสร้างความเสียหายต่อโครงสร้าง สะพาน อาคาร บ้านเรือน รวมทั้งทรัพย์สินและสร้างความสูญเสียต่อชีวิต โดยที่ผ่านมาได้มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ส่งผลให้สะพานมีการพังทลายมากมายในต่างประเทศ [7-9] สะพานทั้งสองแห่งตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ถูกจัดให้เป็นเขตเสี่ยงต่ำ ดังนั้นสะพานทั้งสองแห่งนี้จึงไม่ได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหวเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม สะพานดังกล่าวอยู่ห่างจากกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยซึ่งมีศูนย์กลางอยู่ที่อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี อยู่ไม่ไกลจากกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยไม่มากนัก ซึ่งกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยเป็น 1 ใน 14 รอยเลื่อนที่มีพลังในประเทศไทย (รูปที่ 1) และถือเป็นจุดอันตรายตามประกาศของกรมทรัพยากรธรณี ซึ่งหากปลดปล่อยพลังงานออกมาอาจทำความเสียหายให้กับสิ่งปลูกสร้างใกล้เคียงได้

ในอดีตได้มีบทความที่ศึกษาเกี่ยวกับแรงในรูปแบบต่างๆที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวซึ่งอาจส่งผลให้สะพานพังทลาย ได้แก่ การเคลื่อนของพื้นดินในแนวดิ่งอาจส่งผลให้เกิดโก่งตัวของเสาและตอม่อพังทลาย [10,11] การเคลื่อนตัวในแนวนอนส่งผลหลักต่อความเสียหายจากแรงเฉือนในเสาและตอม่อของสะพาน [12,13] และการสร้างแบบจำลองประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของสะพาน [14-17] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะประเมินความสามารถของโครงสร้างสะพานทั้งสองแห่ง โดยการประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวจะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานด้วยวิธีวิเคราะห์โครงสร้างตามประวัติเวลา (Time-History Analysis) ภายใต้การจำลองคลื่น

แผ่นดินไหวจากการปลดปล่อยพลังงานของกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย



รูปที่ 1 กลุ่มรอยเลื่อนมีพลัง (ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี, 2555)

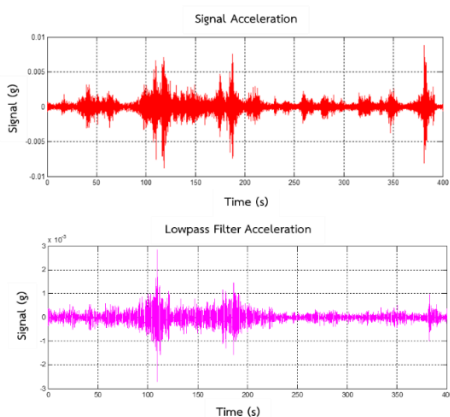
เพื่อให้การวิเคราะห์โครงสร้างมีความน่าเชื่อถือและสอดคล้องกับความเป็นจริง จึงได้ดำเนินการตรวจสอบสภาพโครงสร้างและตรวจวัดสะพานเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ โดยขอบเขตการดำเนินงานประกอบด้วย การตรวจสอบสภาพลักษณะทางกายภาพและสภาพความเสียหายของสะพาน ณ ปัจจุบัน

พร้อมทั้งทำการประเมินระดับสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานตามแนวทางของกรมทางหลวง [1] ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโครงสร้าง ตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพานเพื่อนำมาประกอบใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง จำลองคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อใช้ประเมินความสามารถของโครงสร้างสะพานในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [2,3] รวมถึงการเสนอแนะแนวทางป้องกันหรือลดความรุนแรงของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ทั้งนี้ จากผลการวิเคราะห์พบว่าบริเวณตอม่อและรอยต่อเพื่อขยายเป็นจุดที่เกิดการเคลื่อนตัวสูงสุด จึงถือเป็นจุดวิกฤตที่ควรได้รับการเสริมความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวในลำดับแรก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

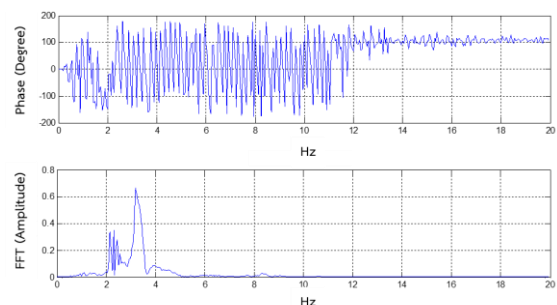
2.1 แนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นไหวของสะพาน

ผลการตรวจวัดการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free Vibration) ในภาคสนามจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และรูปแบบการสั่นไหวอิสระ (Mode Shape) โดยค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถหาได้จากการนำข้อมูลในช่วงการสั่นไหวแบบอิสระที่อยู่รูปแบบของประวัติเวลา (Time-History) มาแปลงให้เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปของความถี่ (Frequency Domain) ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ฟูเรียร์ (Fourier Transform) โดยจะพิจารณาค่าความถี่ที่มีขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุดเป็นค่าความถี่หลักหรือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง

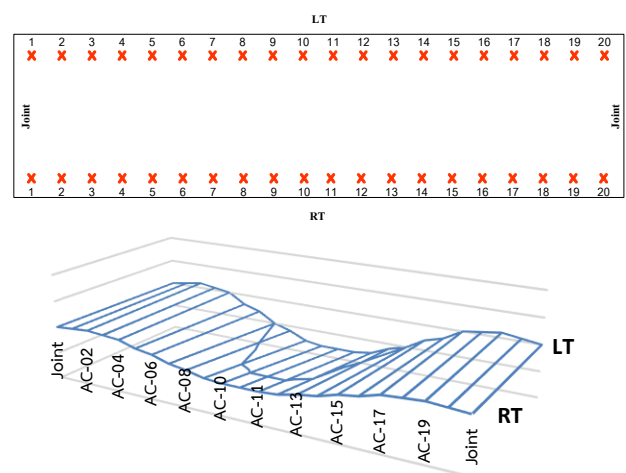


รูปที่ 2 ตัวอย่างผลสัญญาณการตรวจวัดการสั่นไหวและผลการกรองสัญญาณด้วยวิธี Lowpass Filter

โดยผลตรวจวัดภาคสนามในขั้นแรกจะถูกทำการกรองสัญญาณความถี่ด้วยวิธี Lowpass Filter ดังแสดงใน รูปที่ 2 เพื่อตัดความถี่สูงออกเนื่องจากสะพานเป็นโครงสร้างที่มีช่วงยาวดังนั้นคาบเวลาในการแกว่งจะสูง ส่งผลให้ค่าความถี่ของโครงสร้างจะมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยสัญญาณที่ผ่านกระบวนการ Lowpass Filter แล้วจะถูกวิเคราะห์สัญญาณด้วยกระบวนการ Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานในแต่ละช่วง (รูปที่ 3) พร้อมทั้งวิเคราะห์หาค่าทิศทางของเฟส (Phase) ที่เกิดขึ้นเพื่อหารูปแบบการสั่นไหวของสะพาน ภายหลังจากวิเคราะห์สัญญาณของเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer, AC) แต่ละตำแหน่งในช่วงสะพานแล้ว จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ในช่วงสะพาน ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ที่ค่าความถี่เดียวกันกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพาน รวมถึงทิศทางของเฟสที่เกิดขึ้น รูปที่ 4 แสดงรูปร่างการสั่นไหวของสะพาน 1 ช่วงความยาวที่ถูกทำการตรวจวัดความเร่งจำนวนทั้งสิ้น 20 ตำแหน่ง ตลอดสองฝั่งตามแนวยาว คือฝั่งซ้ายทาง (LT) และฝั่งขวาทาง (RT)



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลวิเคราะห์สัญญาณด้วยกระบวนการ FFT



รูปที่ 4 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้ง Accelerometer และรูปร่างการสั่นไหวของสะพาน

2.2 คลื่นแผ่นดินไหว

คลื่นแผ่นดินไหวที่มาตามพื้นดินส่งผลกระทบให้ฐานรากของสะพานเกิดการสั่นไหวไปในทิศทางต่างๆ เมื่อมวลของชิ้นส่วนสะพานเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะทำให้เกิดแรงเฉื่อย (Inertia Force) กระทำต่อโครงสร้างและเกิดแรงภายในชิ้นส่วนขึ้น โดยกลศาสตร์ของแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวสามารถอธิบายตามสมการ (1) ดังนี้

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = [M]\{\ddot{u}_g\} \quad (1)$$

เมื่อ M คือมวลของชิ้นส่วนสะพาน, $\ddot{U}$ คือ ความเร่งที่จุดต่างๆ ของโครงสร้าง, C คือ ความหนืดของโครงสร้าง, $\dot{U}$ คือ ความเร็วที่จุดต่างๆ ของโครงสร้าง, K คือ สติฟเนสของโครงสร้าง, U คือ ระยะขจัดของจุดต่างๆ ของโครงสร้าง, $\ddot{u}_g$ คือ ประวัติความเร่งของพื้นดิน

จากสมการจะเห็นได้ว่าประวัติความเร่งของพื้นดิน (Ground Acceleration Time History) ก่อให้เกิดแรงแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้างสะพาน ดังนั้นการหาประวัติความเร่งของพื้นดินที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว

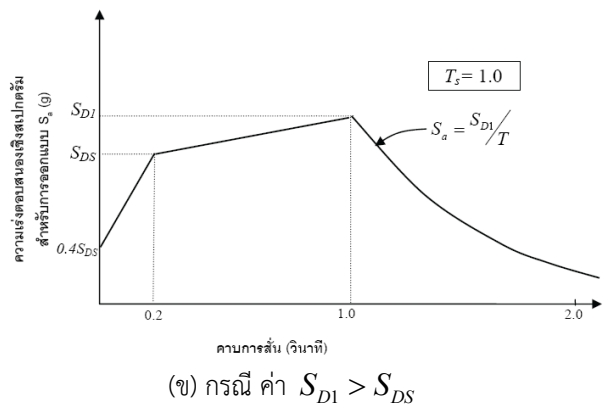
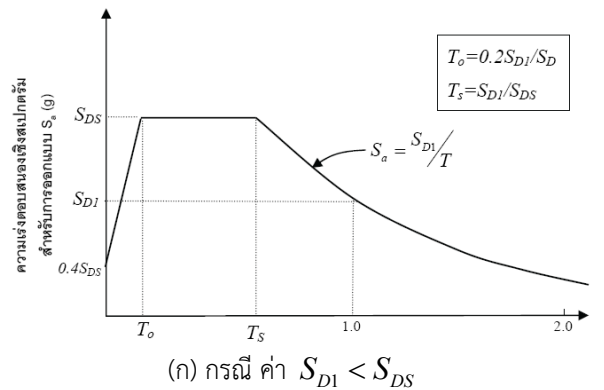
2.3 หลักการสร้างกราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

กราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302-52) ปี พ.ศ.2552 [4] สามารถสร้างได้จากสมการ (2) และ (3) โดยหาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{D1}) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_{D2}) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดจากแผนที่ความเสี่ยงภัยและทำการปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ได้ตามประเภทชั้นดิน ณ ตำแหน่งที่ตั้งโครงสร้าง จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_{DS}) หรือที่คาบ 1 วินาที (S_{D1}) มีค่ามากกว่ากัน และเลือกรูปแบบกราฟที่เหมาะสมดังแสดงใน รูปที่ 5

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (3)$$

เมื่อ S_{DS} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที, S_{D1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที, S_{MS} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดินที่ตั้ง, S_{M1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที ปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดินที่ตั้ง

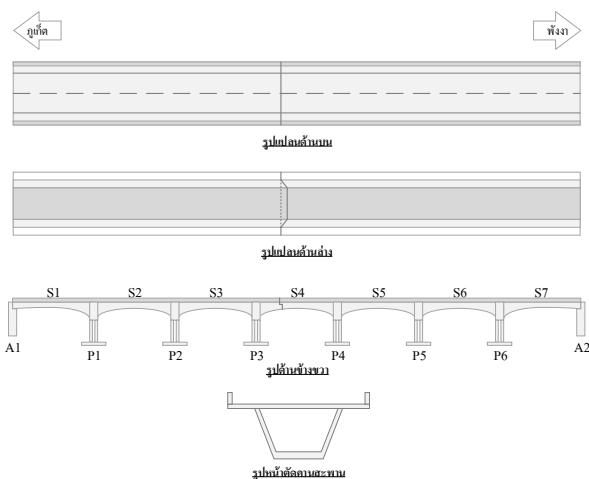


รูปที่ 5 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ)

3. การตรวจสอบสภาพโครงสร้างสะพาน

3.1 จัดทำคาร์ระดับและมิติของโครงสร้าง

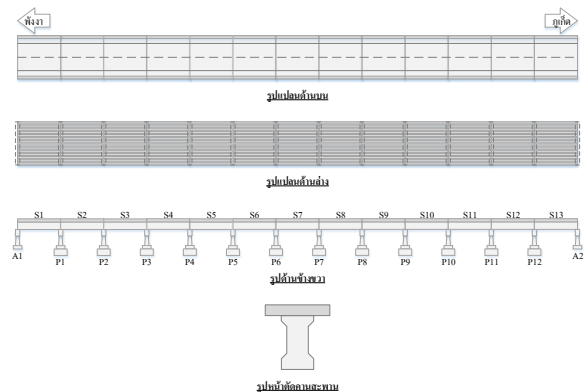
การดำเนินงานในส่วนแรกเป็นการกำหนดรูปแบบการตรวจสอบสะพานทางกายภาพ ด้านมิติและส่วนประกอบของสะพาน ได้แก่ ความกว้างผิวจราจร ความยาวช่วงสะพาน ลักษณะราวสะพาน และทิศทางการจราจร เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำแบบจำลองโครงสร้างสะพานให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง จากนั้น ได้ทำการตรวจสอบสภาพความเสียหายด้วยสายตา (Visual Inspection) ของสะพานในปัจจุบันตาม “คู่มือการตรวจสอบ วิศวกรรม และประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน กรมทางหลวง” (กรมทางหลวง, 2549) [4] โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นให้กรมทางหลวงบริหารจัดการในการวางแผนการบำรุงรักษา ซ่อมแซม หรือเสริมกำลังสะพานให้อยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย และเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานอย่างละเอียดในโครงการนี้ต่อไป



รูปที่ 6 ลักษณะทางกายภาพและการกำหนดรหัสบริเวณต่างๆ ของโครงสร้างสะพานแห่งที่ 1

เพื่อให้การตรวจสอบสะพานเป็นระบบและมีรูปแบบที่เข้าใจได้ โดยได้ทำการแบ่งสะพานออกเป็นบริเวณต่างๆ และเขียนรหัสบริเวณกำกับไว้ โดยภายในแต่ละบริเวณจะมีชิ้นส่วนประเภทต่างๆ สำหรับบันทึกตำแหน่งและรายละเอียดความเสียหาย โดยสะพานแห่งที่ 1 (รูปที่ 6) ประกอบไปด้วย (1) ช่วงสะพาน (Span, S1-S7) มีรูปแบบโครงสร้างส่วนบนเป็น Box Girder (2) ตอม่อตัวกลาง (Pier, P1-P6) (3) ตอม่อตบริม (Abutment, A1, A2) และสะพานแห่งที่ 2 (รูปที่ 7) ประกอบไปด้วย (1) ช่วงสะพาน (Span,

S1-S13) มีรูปแบบโครงสร้างส่วนบนเป็น I Girder (2) ตอม่อตัวกลาง (Pier, P1-P12) (3) ตอม่อตบริม (Abutment, A1, A2)



รูปที่ 7 ลักษณะทางกายภาพและการกำหนดรหัสบริเวณต่างๆ ของโครงสร้างสะพานแห่งที่ 2

3.2 การสำรวจความเสื่อมสภาพ

เพื่อให้การตรวจสอบสะพานเป็นไปมีประสิทธิภาพ และได้ใช้แอปพลิเคชัน iBridge บนแท็บเล็ต พัฒนาโดยสำนักก่อสร้างสะพาน ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันของระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance and Management System, BMMS) โดยแอปพลิเคชัน iBridge จะทำการประเมินระดับสภาพการใช้งาน (Condition Rating) ตามลักษณะความเสียหายภายใต้เกณฑ์การประเมินของกรมทางหลวง (ระดับ: 5-ดีมาก, 4-ดีพอใช้, 3-พอใช้, 2-ชำรุด, 1-วิกฤติ, 0-วิบัติ) และทำการอัปเดตข้อมูลการตรวจสอบสะพานเข้าสู่ระบบ BMMS ที่ส่วนกลางเพื่อประโยชน์ในการบำรุงรักษาสะพานกรมทางหลวงต่อไป

โดยผลสำรวจพบว่าสะพานแห่งที่ 1 ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี ยังคงสภาพการใช้งานที่ค่อนข้างดีมาก โดยจำนวนความเสียหายแยกตามชนิดความเสียหายและประเภทชิ้นส่วนได้แสดงไว้ใน

ตารางที่ 1 ถึงแม้ว่าสะพานจะมีจำนวนความเสียหายเพียงเล็กน้อย แต่ตรวจพบรอยแตกขนาดเล็กทั้งภายนอกและภายในคาน Box Girder ที่บริเวณใกล้รอยต่อ (Dapped End) ของช่วงสะพานที่ 4 (S4) มีลักษณะอยู่ในแนวแรงเฉือนซึ่งควรทำการซ่อมอุดรอยแตกเนื่องจากสะพานตั้งใกล้ทะเล ลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้เหล็กเสริมภายในโครงสร้างเกิดสนิมได้ง่าย รวมถึงหมั่นตรวจสอบขนาดของรอยแตกว่ามีการขยายตัวเพิ่มขึ้นหรือไม่

ตารางที่ 1 จำนวนความเสียหายแยกตามชนิดความเสียหายและตำแหน่งชิ้นส่วนของสะพานแห่งที่ 1

ลักษณะความเสียหาย โครงสร้าง	Joint Filler หลุดล่อน (สำหรับ Concrete Joint)	พบรอยร้าวขนาดเล็ก	พบรอยร้าวขนาดใหญ่กระจายเป็นบริเวณกว้าง	พบคอนกรีตหลุดแยกออกเป็นแผ่นๆ	พบรอยแตกตามแนวเหล็กเสริม	สีกร่อน หรือหลุดล่อน เล็กน้อย โพรงขนาดเล็ก	สีกร่อน หลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมเล็กน้อย	สีกร่อนหลุดล่อนเป็นบริเวณกว้าง	สีกร่อนหลุดล่อนเป็นบริเวณแคบ	ผลรวมทั้งหมด
ราวสะพาน (Railing)						1				1
คาน Box Girder (Girder)		2								2
ผลรวมจำนวนความเสียหาย		2				1				3

สำหรับสะพานแห่งที่ 2 ซึ่งปัจจุบันมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี จากการตรวจสอบพบว่า สะพานมีการเสื่อมสภาพค่อนข้างมาก มีความเสียหายกระจายอยู่ในทั้งในโครงสร้างส่วนบน โครงสร้างส่วนล่าง และส่วนประกอบรอง ความเสียหายส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับรอยแตกขนาดเล็ก การสีกร่อน หลุดล่อน มีบางแห่งที่มองเห็นเหล็กเสริม และคอนกรีตหลุดแยกออกเป็นแผ่นๆ โดยรายละเอียดความเสียหายได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ควรพิจารณาดำเนินการซ่อมบำรุง เพื่อให้สะพานมีสภาพแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งาน

ตารางที่ 2 จำนวนความเสียหายแยกตามชนิดความเสียหายและตำแหน่งชิ้นส่วนของสะพานแห่งที่ 2

ลักษณะความเสียหาย โครงสร้าง	Joint Filler หลุดล่อน (สำหรับ Concrete Joint)	พบรอยร้าวขนาดเล็ก	พบรอยร้าวขนาดใหญ่กระจายเป็นบริเวณกว้าง	พบคอนกรีตหลุดแยกออกเป็นแผ่นๆ	พบรอยแตกตามแนวเหล็กเสริม	สีกร่อน หรือหลุดล่อน เล็กน้อย โพรงขนาดเล็ก	สีกร่อน หลุดล่อนจนเห็นเหล็กเสริมเล็กน้อย	สีกร่อนหลุดล่อนเป็นบริเวณกว้าง	สีกร่อนหลุดล่อนเป็นบริเวณแคบ	ผลรวมทั้งหมด
ราวสะพาน (Railing)						1				1
ผิวทาง (Wearing surface)			2							2
รอยต่อเมื่อการขยาย (Expansion joint)	12									12
คาน I - Girder (Girder)		23								23
เสาตอม่อ (Pier)				1						1
ครอบเสาเข็ม (Pier cap)			44		3		2	4	2	55
ผลรวมจำนวนความเสียหาย	12	23	46	1	3	1	2	4	2	94

3.3 การพิจารณาโครงสร้างตามระดับสภาพการใช้งาน

การประเมินสภาพการใช้งานของระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (BMMS) จะแบ่งเป็น 4 ระดับ คือ ระดับตำแหน่ง (Location) ระดับชิ้นส่วน (Element) ระดับโครงสร้าง (Structure) และระดับสะพาน (Bridge) ซึ่งสภาพการใช้งานของแต่ละชิ้นส่วนจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งความเสียหายที่รุนแรงที่สุดของชิ้นส่วนนั้นๆ (1 ชิ้นส่วนอาจมีมากกว่า 1 ตำแหน่งความเสียหาย) จากนั้นชิ้นส่วนโครงสร้างหลักในแต่ละกลุ่มโครงสร้างที่มีสภาพการใช้งานต่ำที่สุดจะถูกเลือกเป็นตัวแทนระดับสภาพการใช้งานของแต่ละกลุ่มโครงสร้าง และในลำดับสุดท้ายโครงสร้างส่วนบนหรือโครงสร้างส่วนล่างที่มีสภาพการใช้งานต่ำที่สุดจะถูกเลือกเป็นตัวแทนระดับสภาพการใช้งานโดยรวมของสะพาน (Overall Condition Rating) ผลการประเมินระดับสภาพการใช้งานของทั้ง 2 สะพาน สรุปผลได้ดังนี้

สะพานแห่งที่ 1 มีสภาพการใช้งานโครงสร้างส่วนบนระดับ 4 (ดีพอใช้) โครงสร้างส่วนล่างระดับ 5 (ดีมาก) ส่วนประกอบรองระดับ 4 (ดีพอใช้) และสภาพการใช้งานโดยรวมระดับ 4 (ดีพอใช้)

สะพานแห่งที่ 2 มีสภาพการใช้งานโครงสร้างส่วนบนระดับ 3 (พอใช้) โครงสร้างส่วนล่างระดับ 2 (ชำรุด) ส่วนประกอบรองระดับ 3 (พอใช้) และสภาพการใช้งานโดยรวมระดับ 2 (ชำรุด)

3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของโครงสร้างสะพาน

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในโครงการนี้จะใช้วิธี Rebound Hammer ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) สามารถทดสอบได้กับชิ้นส่วนคอนกรีตหลายประเภทโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง โดยวิธีการและขั้นตอนการทดสอบจะอ้างอิงมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) C 805 “Rebound Hammer of Hardened Concrete” โดยในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้กระจายตำแหน่งการทดสอบไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงทั้งบริเวณช่วงสะพานและบริเวณตอม่อ เพื่อใช้เป็นตัวแทนกำลังวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างนั้น โดยผลการทดสอบวัสดุโครงสร้างสะพานพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของชิ้นส่วนต่างๆของทั้งสองสะพาน ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่าที่ระบุในแบบก่อสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

สะพาน	ชิ้นส่วน	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ksc)		ค่า Bias
		ค่าที่ระบุในแบบก่อสร้าง	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	
สะพานแห่งที่ 1	คาน Box	400	509	1.27
	Girder			
	กำแพงตอม่อ	300	453	1.51
	ครอบเสาเข็ม	300	343	1.14
สะพานแห่งที่ 2	พื้นสะพาน	300	375	1.25
	คาน I-Girder	400	536	1.34
	เสาตอม่อ	300	437	1.46
	คานค้ำยันเสา	300	497	1.66
	ครอบเสาเข็ม	300	331	1.10

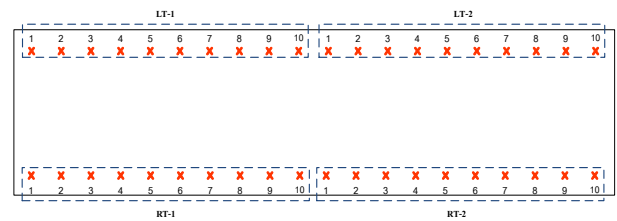
4. การตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพาน

การตรวจวัดพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานเพื่อวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และรูปแบบการสั่นไหวอิสระ (Mode Shape) กระทำโดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ที่โครงสร้างส่วนบนจากการตรวจสอบสภาพของสะพานที่หน้างาน พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง คือ ที่ผิวราวสะพานด้านใน เนื่องจากราวสะพานยึดติดกับโครงสร้างสะพานทำให้เกิดการสั่นไหวไปพร้อมกับโครงสร้างส่วนบน การตรวจวัดการสั่นไหวดำเนินการภายใต้การจราจรปกติ โดยไม่มีการปิดการจราจรบนสะพาน ซึ่งได้ทำการบันทึกข้อมูลการสั่นไหวขณะที่มีรถบรรทุกหนักวิ่งผ่านช่วงสะพานที่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด พร้อมทั้งบันทึกประเภทของรถบรรทุกที่วิ่งผ่าน เวลาที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและสอบเทียบกับแบบจำลองสะพานสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป

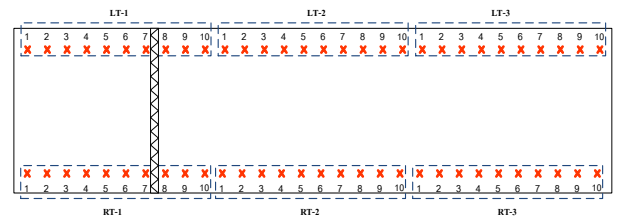
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นไหวของสะพาน

โดยได้ทำการติดตั้ง Accelerometers จำนวนทั้งหมด 300 ตำแหน่ง โดยกระจายไปในแต่ละช่วงสะพาน โดยการตรวจวัดแต่ละครั้งจะใช้ Accelerometer จำนวน 10 ตัว ติดตั้งใน 10 ตำแหน่ง ของแต่ละช่วงสะพาน เพื่อบันทึกข้อมูลการสั่นไหวจากรถบรรทุกหนักที่วิ่งผ่าน รูปแบบการติดตั้ง Accelerometer ในแต่ละครั้งๆ ละ 10 ตำแหน่ง ภายในแต่ละช่วงสะพาน โดย

สะพานแห่งที่ 1 ซึ่งมี 7 ช่วงสะพานและสะพานแห่งที่ 2 ซึ่งมี 13 ช่วงสะพาน รูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ

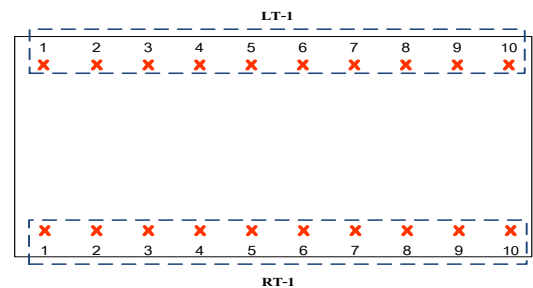


ช่วงสะพานที่ 1-3, 5-7

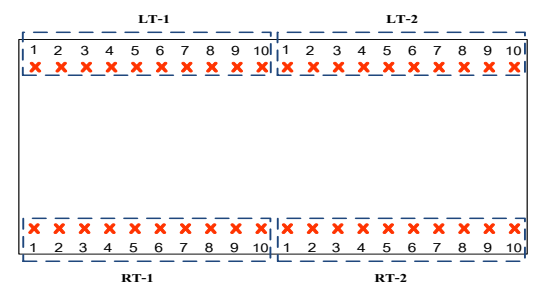


ช่วงสะพานที่ 4

รูปที่ 8 ตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer (สะพานแห่งที่ 1)



ช่วงสะพานที่ 1-6, 9-13



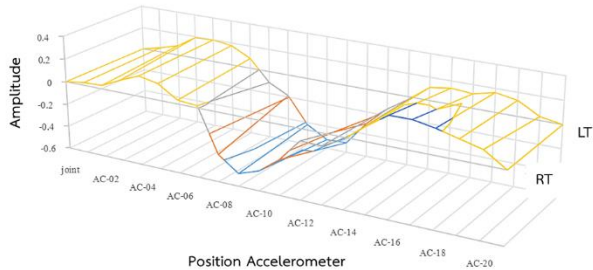
ช่วงสะพานที่ 7-8

รูปที่ 9 ตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer (สะพานแห่งที่ 2)

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นไหวของสะพาน

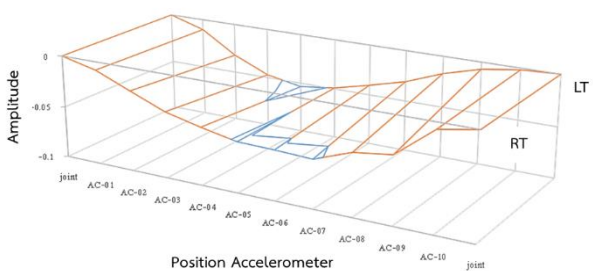
จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นไหวภายใต้การจราจรปกติของสะพานแห่งที่ 1 จำนวน 7 ช่วงสะพาน โดยพิจารณา 2 ฝั่งตามแนวยาว คือฝั่งซ้ายทาง (LT) และฝั่งขวาทาง (RT) พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน (Fundamental Frequency) อยู่ในช่วง 4.50 – 5.67 เฮิรตซ์ ซึ่งในแต่ละครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลการสั่นไหวจะทำ

การบันทึกค่าอุณหภูมิ (29-33 องศาเซลเซียส) ด้วย และเมื่อใช้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มาสร้างรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape) จะได้ลักษณะการสั่นไหวดัง **รูปที่**



รูปที่ 10 รูปร่างการสั่นไหวตามค่าความถี่ธรรมชาติช่วงสะพานที่ 1 ของสะพานแห่งที่ 1

สำหรับผลการวิเคราะห์สะพานแห่งที่ 2 ซึ่งมี 13 ช่วงสะพาน จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน (Fundamental Frequency) ในช่วง 3.05 – 3.50 เฮิรตซ์ ซึ่งในแต่ละครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลการสั่นไหวจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ (28-33 องศาเซลเซียส) ด้วย และเมื่อใช้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มาสร้างรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shape) จะได้ลักษณะดัง **รูปที่** โดยตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงรูปร่างการสั่นไหวเพียงทิศทางเดียวของหนึ่งช่วงสะพานเท่านั้น (ตามปกติแล้วจะมีรูปร่างทั้งสองทิศทาง)

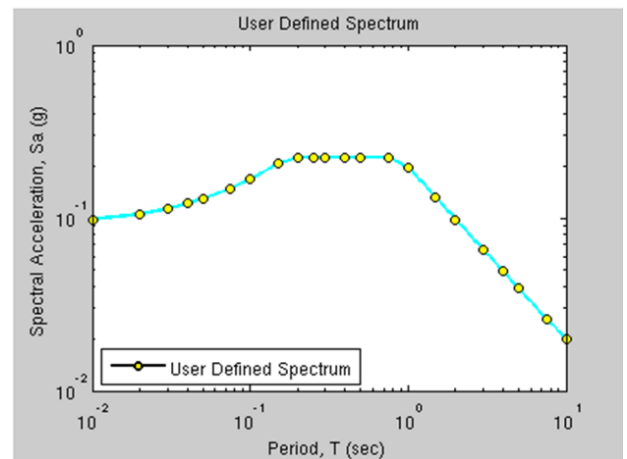


รูปที่ 11 รูปร่างการสั่นไหวตามค่าความถี่ธรรมชาติช่วงสะพานที่ 1 ของสะพานแห่งที่ 2

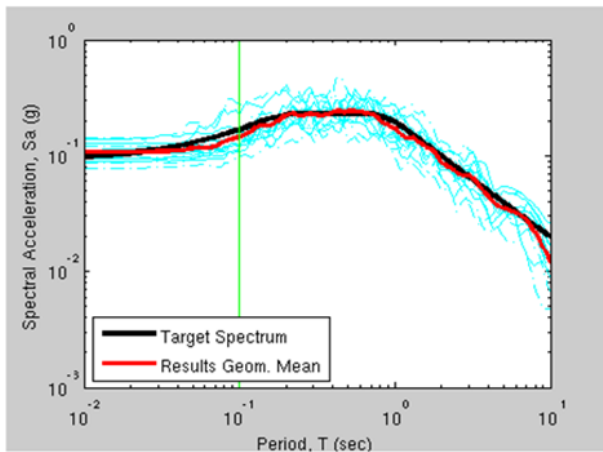
5. การจำลองคลื่นแผ่นดินไหว

การจำลองคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับใช้ในการวิเคราะห์สะพานทั้งสองแห่ง โดยได้ใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่มีอยู่ในฐานข้อมูลแผ่นดินไหว PEER Ground Motion Database โดยจะคัดเลือกประวัติความเร่งของพื้นดินมาให้สอดคล้องกับข้อมูลทาง

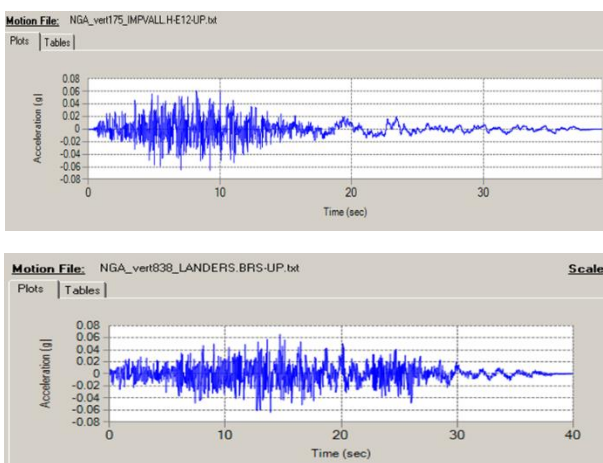
ธรณีวิทยาของรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยที่มีลักษณะเป็นการเลื่อนตัวตามแนวระดับ (strike-slip fault) และข้อมูลดินบริเวณที่ตั้งของสะพาน ซึ่งข้อมูลชั้นดินของสะพานแห่งที่ 1 ได้จากแบบก่อสร้าง (As-built Drawing) และข้อมูลหลุมเจาะดินแบบ Boring Log ที่บริเวณใกล้เคียงสะพาน จำนวน 2 หลุม ได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกประเภทดินและสร้างกราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Response Spectrum Curve) ตามแนวทางของ มยพ.1302-52 ซึ่ง Response Spectrum Curve นี้ได้ใช้เป็นข้อมูลนำเข้า (User Defined Spectrum) เพื่อค้นหาและเลือกคลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูล PEER Database และทำการปรับแก้ค่า Amplitude ของคลื่นแผ่นดินไหวให้สอดคล้องกับ Response Spectrum Curve ตาม มยพ.1302-52 (**รูปที่** และ **รูปที่**) โดยได้สร้างแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความสามารถการต้านแผ่นดินไหวของสะพานทั้งสิ้น 7 ชุด ตัวอย่างแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวและตารางสรุปการเลือกแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหว แสดงใน **รูปที่** และ **ตารางที่ 4** ตามลำดับ แม้คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้จะอยู่ในช่วงปี 1990-1999 แต่เป็นคลื่นที่มีลักษณะการเลื่อนแบบ strike-slip สอดคล้องกับรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย และได้ปรับให้เหมาะสมกับชั้นดินและ Response Spectrum ตาม มยพ.1302 จึงถือว่าเหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 12 การสร้าง Response Spectrum Curve สำหรับการออกแบบและสร้างคลื่นแผ่นดินไหว (Ground Motion)



รูปที่ 13 การปรับเลือกคลื่นแผ่นดินไหว



รูปที่ 14 ตัวอย่างแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวหลังปรับค่า Amplitude ให้สอดคล้องกับ Response Spectrum

ตารางที่ 4 รายการคลื่นแผ่นดินไหว

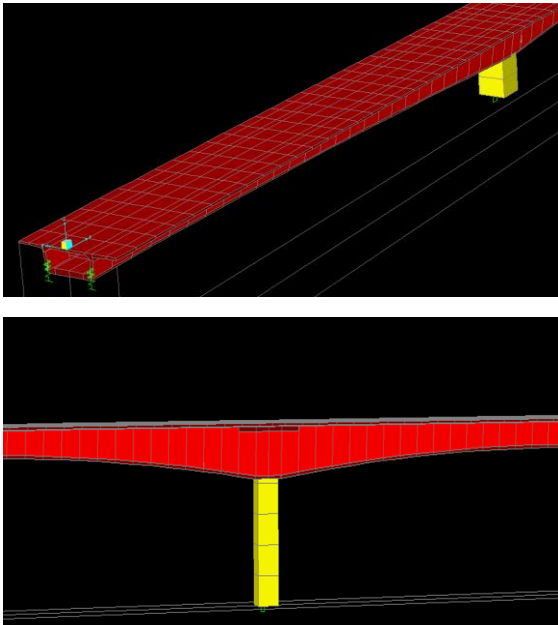
ลำดับที่	เหตุการณ์	ปี	ระดับความรุนแรง	ลักษณะการเคลื่อนตัว
1	Hector Mine	1999	7.13	Strike-Slip
2	Landers	1992	7.28	Strike-Slip
3	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	Strike-Slip
4	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	Strike-Slip
5	Imperial Valley-06	1979	6.53	Strike-Slip
6	Hector Mine	1999	7.13	Strike-Slip
7	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	Strike-Slip

6. การประเมินความสามารถของโครงสร้างสะพานในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว

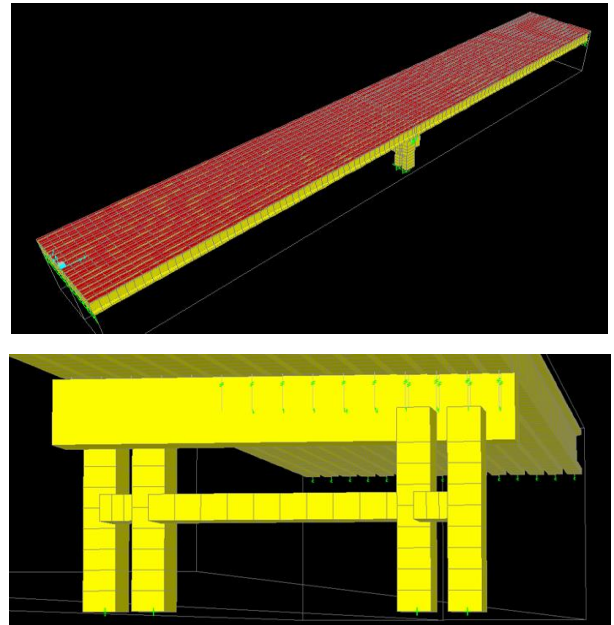
6.1 หลักการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธี Time History Analysis และ Pushover Analysis ร่วมกันเพื่อลดข้อจำกัดของแต่ละวิธี Time History Analysis สามารถจำลองพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวในเชิงเวลาได้อย่างละเอียด โดยเฉพาะการพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีข้อจำกัดด้านความไม่แน่นอนของคลื่นแผ่นดินไหวและแบบจำลอง ในขณะที่ Pushover Analysis ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถสูงสุดของโครงสร้างในการต้านแรงด้านข้าง แต่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมแบบพลศาสตร์ของโครงสร้างได้อย่างครบถ้วน ดังนั้นการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันจึงช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยวิธีนี้เหมาะสมอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะต้องจำลองโครงสร้างที่มีรูปร่างคุณลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด ในโครงการนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบสากลอันได้แก่ มาตรฐานของ American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 2007) มาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) และมาตรฐานสากลอื่นๆ อันเป็นที่ยอมรับ โดยกำหนดให้ Design Criteria เป็นไปตามมาตรฐานตามที่กล่าวถึงในข้างต้น โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวจากการจำลองในหัวข้อที่ 5 ซึ่งได้พิจารณาใช้แบบจำลอง 1 มิติ (Frame Element) สำหรับโครงสร้างส่วนล่างร่วมกับ Nonlinear Spring Element และพิจารณาแบบจำลองแบบ 2 มิติ (Shell Element) สำหรับโครงสร้างส่วนบน ในแบบจำลองนี้จะถูกพิจารณาผลของความไม่เป็นเชิงเส้นด้วย Multi-Layer Model

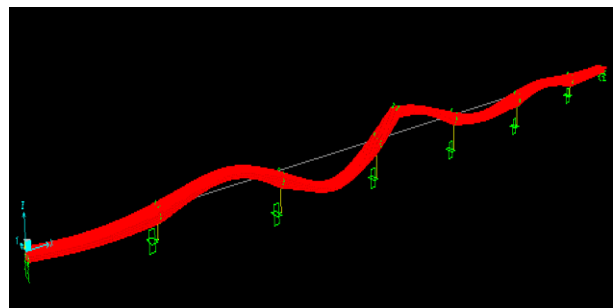


รูปที่ 15 ตัวอย่างแบบจำลองของคานและตอม่อสะพาน
แห่งที่ 1 (3D Extruded View)

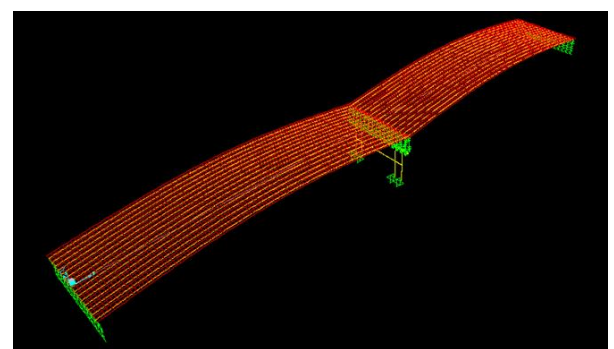


รูปที่ 16 ตัวอย่างแบบจำลองของคานและตอม่อสะพาน
แห่งที่ 2 (3D Extruded View)

โดยขั้นตอนการดำเนินงานเริ่มต้นจากการพิจารณาแบบ As-Built ของสะพานประกอบกับการตรวจวัดขนาดและสภาพของสะพานจากหน้างานจริงเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเนื่องจากแบบจำลองของสะพานมีความถูกต้องในขั้นแรก ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ในส่วนของ Modal Analysis เพื่อหารูปแบบของการสั่นพ้องพื้นฐาน (Natural frequency) และค่าของการสั่นพ้องพื้นฐาน (Mode Shape) เพื่อนำผลวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ได้มาปรับค่าให้สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม ดังแสดงใน รูปที่ และ รูปที่ หลังจากนั้นแบบจำลองที่ได้ปรับค่าเรียบร้อยแล้วจะถูกทำการวิเคราะห์แบบ Time-history analysis ภายใต้แรงกระทำจากแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 7 ชุด เพื่อประมาณหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน (Maximum Displacement Demand) จากนั้น จะทำการวิเคราะห์ Nonlinear Analysis ด้วยวิธี Pushover analysis เพื่อประมาณหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ (Maximum Displacement Capacity)



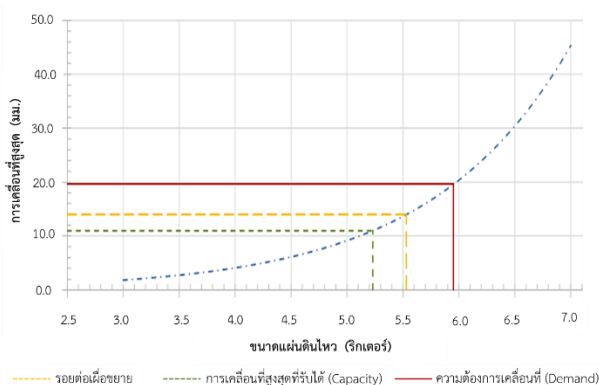
รูปที่ 17 ผลของ Mode Shape ของสะพานแห่งที่ 1 ภายหลังการปรับค่ากับผลทดสอบในสนาม



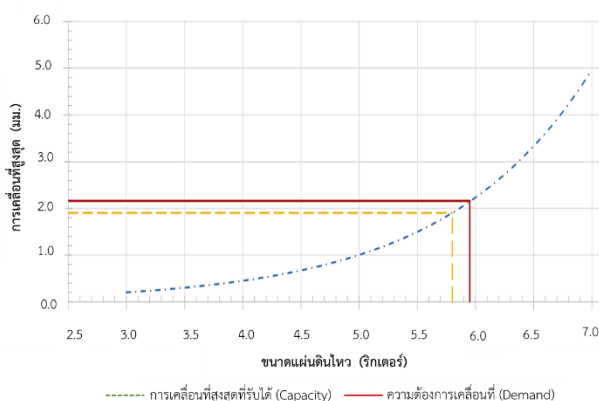
รูปที่ 18 ผลของ Mode Shape ของสะพานแห่งที่ 2 ภายหลังการปรับค่ากับผลทดสอบในสนาม

6.2 ผลการประเมินโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวและแนวทางการปรับปรุงสะพาน

ในการสร้างแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย มีสมมติฐานอยู่ที่ความเร่งผิวดินสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ตั้งของสะพานเป็นไปตามความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของ มยผ. 1302-52 โดยมีค่าประมาณ 0.0768g ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับการเกิดแผ่นดินไหวจากการปลดปล่อยพลังงานจากกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยขนาดประมาณ 5.9 ถึง 6.0 ริกเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้เห็นภาพรวมของผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างสะพานแห่งที่ 1 และสะพานแห่งที่ 2 จึงได้ทำการวิเคราะห์เทียบเคียงขนาดของแรงแผ่นดินไหวในช่วง 3 ถึง 7 ริกเตอร์ ที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของตอม่อสะพานทั้งสองดังแสดงใน รูปที่ 19 และรูปที่ 20 รูปที่



รูปที่ 19 ผลการเคลื่อนที่สูงสุดของตอม่อสะพานแห่งที่ 1



รูปที่ 20 ผลการเคลื่อนที่สูงสุดของตอม่อสะพานแห่งที่ 2

ผลการวิเคราะห์ Time-History Analysis ของสะพานแห่งที่ 1 พบว่ายอดบนของเสาตอม่อจะมีความต้องการในการเคลื่อนที่ (Displacement Demand) สูงสุดเท่ากับ 19.7 ซม. ใน

ทิศทางตามยาวของสะพาน ซึ่งหากวิเคราะห์หากำลังต้านทานของเสาตอม่อด้วยวิธี Pushover Analysis จะสามารถประเมินได้ว่าเสาตอม่อดังกล่าวนี้ มีความสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ได้สูงสุด 14 ซม. (น้อยกว่า 19.7 ซม.) นอกจากนี้รอยต่อเพื่อขยายของสะพานแห่งที่ 1 สามารถรองรับการเคลื่อนที่ได้ 11 ซม. (น้อยกว่า 19.7 ซม.) อาจทำให้โครงสร้างส่วนบนเคลื่อนตามยาวกระแทกชนกันที่บริเวณรอยต่อได้ สำหรับผลการวิเคราะห์ Time-History Analysis ของสะพานแห่งที่ 2 พบว่า ที่ยอดบนของเสาตอม่อมีความต้องการในการเคลื่อนที่ (Displacement Demand) สูงสุดเท่ากับ 2.16 ซม. ในทิศทางตามยาวของสะพาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์หากำลังต้านทานของเสาตอม่อด้วยวิธี Pushover Analysis พบว่าความสามารถในด้านทานการเคลื่อนที่ได้สูงสุดของเสาตอม่อรับได้เพียง 1.9 ซม. จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า บริเวณตอม่อและรอยต่อเพื่อขยายของสะพานทั้งสองแห่งเป็นจุดวิกฤตที่มีค่าการเคลื่อนตัวเกินกว่าค่าความสามารถของโครงสร้าง ซึ่งควรได้รับการเสริมกำลังเป็นลำดับแรกเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของสะพานภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหวในอนาคต

โดยจากผลการวิเคราะห์ที่กล่าวมานี้ พบว่าวิธีการที่สะดวกในการปรับปรุงสะพานแห่งที่ 1 ให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้มากขึ้นนั้น คือ การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อลดการเคลื่อนตัวของตอม่อสะพานในทิศทางตามยาวของสะพาน เช่น การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการยึดรั้ง (Restraining Devices) [5] โดยอุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งควรเป็นชนิดที่จะให้การยึดรั้งหากมีแรงภายนอกมากระทำอย่างรวดเร็ว เช่น แรงแผ่นดินไหว แต่ไม่ก่อให้เกิดการยึดรั้งหากโครงสร้างเกิดแรงกระทำอย่างช้าๆ เช่น การยึดหดตัวของสะพานเนื่องจากอุณหภูมิ รวมถึงการพิจารณาเปลี่ยนแผ่นรองรับคานใหม่ให้มีความสามารถในการช่วยสลายพลังงาน (Isolate Bearing) [6] ซึ่งหากการประยุกต์ใช้ทั้งสองระบบข้างต้นแล้วยังไม่เพียงพอ ควรพิจารณาการเสริมกำลังโครงสร้างเพิ่มเติมหรือเพิ่มเติมความเหนียว (Ductility) ให้กับโครงสร้างในบางตำแหน่ง โดยเฉพาะในกรณีของสะพานแห่งที่ 2 แนะนำให้ทำการเสริมกำลังและปรับปรุงตอม่อ ซึ่งในขั้นตอนการเสริมกำลังของโครงสร้างนี้จะต้องมีการวิเคราะห์โครงสร้างเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบป้องกันแผ่นดินไหวสำหรับสะพานนั้นๆ ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้ แม้ว่าจะแนวทางการปรับปรุงดังกล่าวจะมีข้อจำกัดในทางปฏิบัติ ทั้งด้านงบประมาณและผลกระทบต่อจราจร แต่ก็ถือว่าเป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้จริง หากมี

การจัดลำดับความสำคัญขององค์ประกอบที่ต้องเสริมกำลังก่อน พร้อมทั้งออกแบบรายละเอียดอย่างเหมาะสมและเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่

7. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

โครงการประเมินโครงสร้างสะพานแห่งที่ 1 และสะพานแห่งที่ 2 ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาสภาพโครงสร้าง ณ ปัจจุบันและความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหว รวมถึงเสนอแนะแนวทางในการป้องกันในอนาคต โดยผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบสภาพการใช้งานของสะพานในภาคสนาม พบว่า สะพานแห่งที่ 1 มีระดับสภาพการใช้งานโดยรวม 4 (ดีพอใช้) เนื่องจากส่วนใหญ่โครงสร้างอยู่ในสภาพดี พบเพียงรอยแตกขนาดเล็กทั้งภายนอกและภายในคาน Box Girder ที่บริเวณใกล้รอยต่อ (Dapped End) ของช่วงสะพานที่ 4 ซึ่งมีลักษณะอยู่ในแนวแรงเฉือน สำหรับสะพานแห่งที่ 2 มีระดับสภาพการใช้งานโดยรวม 2 (ชำรุด) เนื่องจากโครงสร้างมีการเสื่อมสภาพค่อนข้างมากทั้งโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่าง ลักษณะความเสียหายส่วนใหญ่ที่พบได้แก่ รอยแตกขนาดเล็ก การสึกกร่อน หลุดหล่อน บางแห่งมองเห็นเหล็กเสริม และคอนกรีตหลุดแยกออกเป็นแผ่นๆ เป็นต้น สะพานแห่งที่ 1 ควรดำเนินการซ่อมอุดรอยแตกขนาดเล็ก เนื่องจากสะพานตั้งอยู่ใกล้ทะเล ซึ่งเป็นสภาพที่ทำให้เกิดสนิมได้ง่าย และหมั่นตรวจสอบขนาดของรอยแตกกว่ามีการขยายตัวเพิ่มขึ้นหรือไม่ สำหรับสะพานแห่งที่ 2 ควรพิจารณาดำเนินการซ่อมบำรุงสะพานเนื่องจากพบความเสียหายค่อนข้างมาก อีกทั้งบริเวณที่เกิดความเสียหายเริ่มเกิดสนิมที่เหล็กเสริม ดังนั้น เพื่อให้สะพานมีสภาพแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งาน จึงควรเร่งบำรุงรักษาสะพาน และควรทำการตรวจสอบเป็นประจำ สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) สามารถสรุปได้ว่าโดยทั่วไปแล้วกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้ง 2 สะพานยังมีค่าสูงกว่าค่าที่ถูกระบุในแบบก่อสร้าง

2. ผลการตรวจวัดการสั่นไหวของสะพานในภาคสนาม เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน (Natural Frequency) พบว่าสะพานแห่งที่ 1 มีค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานอยู่ในช่วง

4.50 – 5.67 เฮิรตซ์ และสะพานแห่งที่ 2 มีค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานอยู่ในช่วง 3.05 – 3.50 เฮิรตซ์ โดยมีรูปแบบการสั่นไหวของสะพานทั้ง 2 มีลักษณะเป็นแบบการดัด (Bending Mode)

3. ผลการสร้างแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวของรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยที่สอดคล้องกับ Response Spectrum ตาม มยผ. 1302-52 โดยอาศัยฐานข้อมูล PEER Ground Motion Database และทำการปรับแก้ค่า Amplitude ของคลื่นแผ่นดินไหวให้สอดคล้องกับ Response Spectrum Curve พบว่า สามารถทำการเลือกแบบจำลองคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อเป็นตัวแทนในการนำไปวิเคราะห์โครงสร้างสะพานได้เป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 ชุด

4. ผลการวิเคราะห์ Time History Analysis ของสะพานแห่งที่ 1 พบว่า เมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหวจากการปลดปล่อยพลังงานของกลุ่มรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยขนาดประมาณ 5.9 ริกเตอร์ ที่ยอดเสาตอม่อจะมีความต้องการในการเคลื่อนที่ (Displacement Demand) สูงสุดเท่ากับ 19.7 เซนติเมตร ในทิศทางตามแนวยาวของสะพาน ซึ่งการวิเคราะห์กำลังต้านทานของเสาตอม่อด้วยวิธี Pushover Analysis พบว่า เสาตอม่อสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ได้สูงสุด 14 เซนติเมตร หรือ การเกิดแผ่นดินไหวขนาดประมาณ 5.5 ริกเตอร์ นอกจากนี้ หากเกิดแผ่นดินไหวขนาดประมาณ 5.2 ริกเตอร์ อาจจะทำให้รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint) ที่สามารถรองรับการเคลื่อนที่ได้เพียง 11 เซนติเมตร เกิดการชนกระแทกบริเวณรอยต่อของสะพานได้ จึงแนะนำให้มีการปรับปรุงสะพานแห่งที่ 1 โดยติดตั้งอุปกรณ์ยึดรั้ง (Restrainer) เพื่อลดระดับการเคลื่อนตัวของสะพานเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และน้อยกว่าความสามารถการเคลื่อนที่ของรอยต่อเพื่อขยาย

5. สำหรับผลการวิเคราะห์ ของสะพานแห่งที่ 2 พบว่า เมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหวขนาดประมาณ 5.9 ริกเตอร์ ที่ยอดเสาตอม่อจะมีความต้องการในการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 2.16 เซนติเมตร ในทิศทางตามแนวยาวของสะพาน และจากการวิเคราะห์กำลังต้านทานของเสาตอม่อ พบว่า เสาตอม่อสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ได้สูงสุด 1.90 เซนติเมตร หรือการเกิดแรงแผ่นดินไหวขนาดประมาณ 5.8 ริกเตอร์ ควรมีการปรับปรุงสะพานแห่งที่ 2 โดยการเสริมกำลังให้กับตอม่อสะพาน เพื่อให้มีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนที่สูงขึ้นและลดระดับความเสียหายให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้หากเกิดแผ่นดินไหว

6. ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยกรมทางหลวงควรพิจารณาออกแบบรอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint) ของสะพานขนาดใหญ่ให้มีความสามารถในการรองรับการเคลื่อนตัวของสะพานได้หากเกิดแผ่นดินไหวในอนาคตจากรอยเลื่อนที่มีพลังในประเทศไทย เพื่อลดโอกาสที่โครงสร้างสะพานจะเกิดความเสียหาย

ทั้งนี้ งานวิจัยฉบับนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ ได้แก่ การใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลต่างประเทศ (PEER Ground Motion Database) ซึ่งแม้จะผ่านการปรับแก้ให้สอดคล้องกับมาตรฐาน มยพ.1302-52 แล้ว แต่ยังอาจไม่สะท้อนลักษณะเฉพาะของแผ่นดินไหวในประเทศไทยอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากแรงภายนอกอื่น เช่น แรงดันน้ำใต้สะพาน หรือการระจากรขณะเกิดแผ่นดินไหว อีกทั้งยังไม่มีทดสอบสะพานภายใต้แรงสั่นสะเทือนจริง ดังนั้น ในอนาคตควรมีการศึกษาที่อาศัยข้อมูลแผ่นดินไหวในประเทศ และการทดสอบสนามเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและผลวิเคราะห์ในภาพรวม

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง และ สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม รวมทั้งบุคลากรกรมทางหลวงที่เกี่ยวข้องที่ช่วยให้การสนับสนุน และให้ความอนุเคราะห์เพื่อให้คณะผู้วิจัยได้เข้าไปตรวจสอบสภาพสะพาน รวมถึงสนับสนุนทั้งข้อมูลต่างๆเพื่อให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน สำนักก่อสร้างสะพาน ระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน
- [2] AASHTO 2007, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition, 2008 and 2009 Interim. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- [3] AASHTO 2009, Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

- [4] มยพ.1302 (พ.ศ. 2552) มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย
- [5] Caltrans (1989) “Bridge Design Aids – Equivalent Static Analysis of Restrainers”, California Department of Transportation, Sacramento, California, 14-11 to 14-25.
- [6] FHWA (2006) “Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges”, Publication No. FHWA-HRT-06-032, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [7] Hulya Sonmez Schaap & Alp Caner. (2022). Bridge collapses in Turkey: causes and remedies. Structure and Infrastructure Engineering, 18(5), 694-709. DOI: 10.1080/15732479.2020.1867198
- [8] Chang KC, Mo YL, Chen CC, Lai LC, and Chou CC. (2004). Lessons Learned From the Damaged Chi-Lu Cable-Stayed Bridge. Journal of Bridge Engineering, 9(4), 343–352. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2004\)9:4\(343\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:4(343))
- [9] Han, Q., Du, X., Liu, J., Li, Z., Li, L., & Zhao, J. (2009). Seismic damage of highway bridges during the 2008 Wenchuan earthquake. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 8(2), 263–273. <https://doi.org/10.1007/s11803-009-8162-0>
- [10] Kunnath, S. K., Erduran, E., Chai, Y. H., & Yashinsky, M. (2008). Effect of Near-Fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings. Journal of Bridge Engineering, 13(3), 282–290. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)10840702\(2008\)13:3\(282\)](https://doi.org/10.1061/(asce)10840702(2008)13:3(282))
- [11] Kim, S. J., Holub, C. J., & Elnashai, A. S. (2010). Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC Bridge Piers. Journal of Structural Engineering, 137(2), 252–260. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000306](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000306)
- [12] Priestley, M. J. N., Verma, R., & Xiao, Y. (1994). Seismic shear strength of reinforced concrete columns. Journal of Structural Engineering, 120(8), 2310–2329. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339445\(1994\)120:8\(2310\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339445(1994)120:8(2310))

- [13] Sun, Z., Wang, D., Guo, X., Si, B., & Huo, Y. (2011). Lessons Learned from the Damaged Huilan Interchange in the 2008 Wenchuan Earthquake. *Journal of Bridge Engineering*, 17(1), 15–24. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000210](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000210)
- [14] Brinissat, M., Kuti, R., & Louhibi, Z. (2021). Dynamic seismic analysis of bridge using response spectrum and time history methods. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(2), 171185. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00595>
- [15] Brownjohn, J. M. W., Moyo, P., Omenzetter, P., & Lu, Y. (2003). Assessment of highway bridge upgrading by dynamic testing and Finite-Element model updating. *Journal of Bridge Engineering*, 8(3), 162–172. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)10840702\(2003\)8:3\(162](https://doi.org/10.1061/(asce)10840702(2003)8:3(162)
- [16] Pettoruso, C., & Quaglini, V. (2023). ASSESSMENT OF THE SEISMIC VULNERABILITY AND MODELLING OF EXISTING BRIDGE WITH DIFFERENT LEVELS OF ACCURACY: STRENGTHS AND WEAKNESSES. *COMPDYN Proceedings*, 3732–3741. <https://doi.org/10.7712/120123.10675.20183>
- [17] Shattarat, N. K., Symans, M. D., McLean, D. I., & Cofer, W. F. (2007). Evaluation of nonlinear static analysis methods and software tools for seismic analysis of highway bridges. *Engineering Structures*, 30(5), 1335–1345. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.021>, 162, 04013