

การตรวจสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานปทุมธานี 2 The Detailed Inspection and Evaluation of Load Carrying Capacity performance of Pathum Thani II Bridge.

คุณานนท์ งามข้า^{1,*} และ กิตติภูมิ รอดสิน²

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร
² ศูนย์วิจัยพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง (CESD), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: 66016011@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการเสื่อมสภาพและการประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานปทุมธานี 2 ซึ่งเป็นโครงสร้างคานรูปกล่องขนาดใหญ่พิเศษ จึงต้องดำเนินการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างเป็นระยะ ๆ เพื่อให้ทราบถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งาน ณ ปัจจุบัน เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด สามารถรองรับปริมาณจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพและสร้างความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ทางเป็นสิ่งสำคัญ โดยในการศึกษานี้จะดำเนินการตรวจสอบลักษณะความเสียหายด้วยการตรวจพินิจและทดสอบวัสดุวิศวกรรม (Detailed Inspection) และประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานปทุมธานี 2 ด้วยการประเมินสัดส่วนความปลอดภัย (Rating Factor, RF) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR โดยการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจากการนำรถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน จำนวน 3 คันมาวิ่งผ่านสะพาน ซึ่งทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน การแอ่นตัว และความเครียดของสะพาน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพานด้วยการวิเคราะห์หระเบียวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (Finite Element Analysis, FEA) ผลการทดสอบได้นำไปปรับแก้แบบจำลองและประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย พบว่ามีอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า 1 ในระดับการออกแบบ (Inventory Level) จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างสะพานมีความแข็งแรงตามอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้ตามข้อกำหนดมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการบำรุงรักษารวมถึงการเสริมกำลังของโครงสร้างให้มีความมั่นคงแข็งแรงและช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานปทุมธานี 2 ให้สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การตรวจสอบส่วนประกอบอย่างละเอียด; การทดสอบสะพาน; สัดส่วนความปลอดภัย

Abstract

This research aims to examine the deterioration and assess the load-carrying capacity of the Pathum Thani 2 Bridge, which is an extra-large box-girder structure. Periodic structural inspections are necessary to determine the current safety level, minimize structural damage, enhance traffic efficiency, and ensure user safety. In this study, the damage characteristics are investigated through visual inspection and engineering material testing (Detailed Inspection). The bridge's load-carrying capacity is assessed using the safety rating factor (Rating Factor, RF) in accordance with the AASHTO LRFR standard. A live load test is conducted by driving three 10-wheel trucks, each weighing 25 tons, across the bridge. Sensors are installed to measure vibrations, deflections, and stress responses of the structure. The collected data is then used to refine the bridge model through a three-dimensional Finite Element Analysis (FEA). The test results are incorporated into the model calibration and safety factor evaluation. The findings indicate that the safety rating factor exceeds 1 at the design level (Inventory Level), confirming that the bridge structure meets the design safety requirements. This study provides essential data for maintenance planning and structural strengthening to enhance stability and durability. Ultimately, it contributes to extending the service life of the Pathum Thani 2 Bridge, ensuring its continued efficiency and safe operation.

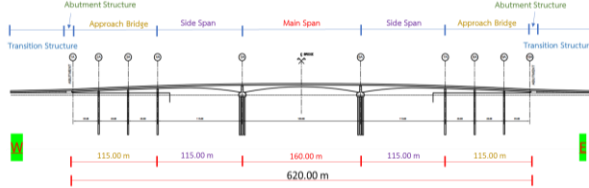
Keywords: Detailed Inspection; Bridge Load Test; Rating Factor

1. บทนำ

สะพานปทุมธานี 2 เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างท้องที่ตำบลบางชะแยงกับตำบลบ้านใหม่ อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี และเป็นส่วนหนึ่งของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 345 เป็นสะพานที่รองรับปริมาณรถที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสะพานที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการใช้งานของประชาชนในพื้นที่ ที่ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ตัวโครงสร้างสะพานเป็นคานรูปกล่องขนาดใหญ่พิเศษมีความยาวรวม 620 เมตรและช่วงสะพานหลัก(Main Bridge)อยู่ที่ 160 เมตรดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2

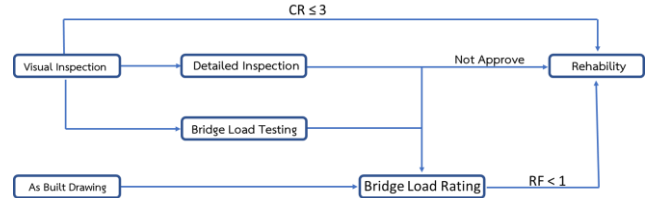


รูปที่ 1 สะพานปทุมธานี 2



รูปที่ 2 แบบแปลนสะพาน

เพื่อให้ทราบถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งานในปัจจุบันจึงต้องดำเนินการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างเป็นระยะ ๆ การตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อันเกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุองค์ประกอบของโครงสร้าง อาทิเช่น การเกิดรอยร้าว การแตกกะเทาะ การหลุดร่อนของคอนกรีตหรือการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เป็นต้น เพื่อความปลอดภัยในการให้บริการแก่ผู้ใช้งานจึงทำให้มีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นประจำเพื่อช่วยป้องกันความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อสภาพหน้า อีกทั้งเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของสะพาน เริ่มจากการสำรวจความเสียหายของสะพานตามแนวทางของคู่มือการตรวจสอบสะพานกรมทางหลวง (BMMS) และคู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน ที่ได้จัดทำโดยกรมทางหลวงซึ่งได้อธิบายแนวทางการตรวจสอบสะพาน การกำหนดชิ้นส่วนของสะพาน การถ่ายภาพ การจำแนกประเภทของความเสียหาย วิธีการประเมินระดับความเสียหาย และการประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน[1-2] เมื่อทราบถึงสภาพความเสียหาย คุณสมบัติของวัสดุสะพาน และทำการทดสอบสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกเหมือนจริง[3] จากนั้นจึงนำมาทำแบบจำลองสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ(Finite Element Analysis) และปรับแก้แบบจำลองด้วยข้อมูลของผลการทดสอบและการประเมินสัดส่วนความปลอดภัย(Rating Factor) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความปลอดภัยในการใช้งานสะพาน [4] หากพบความเสียหายหรือกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างภายหลังการประเมินไม่เพียงพอ(RF มีค่าน้อยกว่า 1)ต้องมีการศึกษาตรวจสอบหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง และหาแนวทางในการบูรณะโครงสร้างสะพานปทุมธานี 2 ต่อไปแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการตรวจสอบและประเมินสะพาน

2. การสำรวจสภาพสะพาน

การสำรวจตรวจสอบสภาพของโครงสร้างสะพานโดยการตรวจสอบด้วยสายตา หรือ Visual Inspection มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพทั่วไปของสะพาน การสำรวจลักษณะทางกายภาพที่แสดงถึงความชำรุดเสียหาย การเสื่อมสภาพและประเมินถึงระดับความเสียหาย(Condition Rating, CR) ของโครงสร้างในทุกชิ้นส่วนของสะพานดังรูปที่ 4 และศึกษาผลกระทบที่มีต่ออายุการใช้งาน ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและวางแผนการตรวจสอบในเชิงลึกเพื่อการหาแนวทางในการบำรุงรักษาและการซ่อมแซม ทั้งนี้ในการตรวจสอบต้องมีการคำนึงถึงผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุต่อสมรรถนะของโครงสร้าง สำหรับใช้เป็นข้อมูลประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง และดำเนินการจัดทำ Damage Mapping Drawing ดังรูปที่ 5 เพื่อรวบรวมข้อมูลความเสียหายของสะพานปทุมธานี 2 ในปัจจุบันไว้ ผลของการสำรวจแสดงได้ดังนี้

- ผิวทาง (Wearing Surface, WS) : โดยทั่วไปผิวทางยังอยู่ในสภาพดี ยกเว้นที่บางตำแหน่งตรวจพบรอยแตก ทำให้เกิดความไม่ราบเรียบในการขับขี จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซม
- รอยต่อแผ่ขยาย (Expansion Joint, EJ) : ไม่พบความเสียหายบริเวณรอยต่อแผ่ขยาย แต่บริเวณถุง Seal มีเศษขยะอุดตัน
- ราวสะพาน (Railing, RL) : ไม่พบความเสียหาย
- ทางเท้า (Sidewalk, SW) : พบความเสียหาย กระจายอยู่ในทุกช่วงสะพานโดยความเสียหายส่วนใหญ่เป็นการเสื่อมสภาพทั่วไป เช่น รอยแตกขนาดเล็กถึงปานกลาง ผิวคอนกรีตสึกกร่อน ขอบทางบิ่นเล็กน้อย
- ระบบระบายน้ำ (Drainage, DN) มีสิ่งอุดตันควรทำความสะอาดท่อระบายน้ำบริเวณทางเท้า
- คานตามยาว (Box Girder, BG) : คานรูปกล่องในช่วงของการก่อสร้างแบบ Balanced Cantilever พบรอยแตกร้าวบางตำแหน่งซึ่งเกิดจากการขยายตัวจากอุณหภูมิ(Shrinkage Crack)
- ฐานรองรับสะพาน (Pot Bearing, PB) : อยู่ในสภาพดีไม่มีเศษฝุ่นอุดตัน
- กำแพงกันดิน (Retaining wall, RW) : ไม่พบความเสียหาย
- เสาดอม่อ (Pier, PR) : ไม่พบความเสียหาย



หูก้าง



เชิงลาดสะพาน



แผ่นรองรับคาน



รอยต่อเพื่อการขยาย

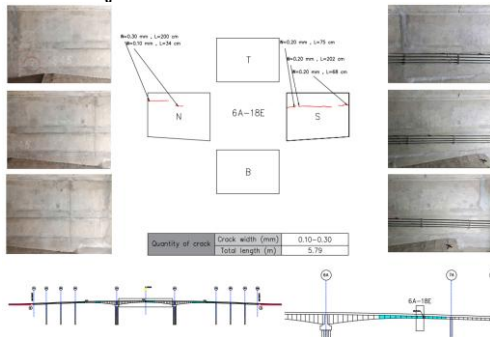


ผิวทาง



ราวสะพาน

รูปที่ 4 สภาพของโครงสร้างสะพาน



รูปที่ 5 ตัวอย่างการจัดทำ Damage Mapping Drawing

3. การจัดทำ As Built Drawing ของสะพาน

แบบสำรวจสะพานปทุมธานี 2(Asbuilt Drawing) ที่ได้จากการสำรวจ ดังรูปที่ 6 ได้แก่ มิติของสะพานกระทำโดยถ่ายภาพสะพานในบริเวณต่าง ๆ ทั้งด้านบนและด้านล่าง และการสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริมด้วย เครื่องมือ Ferro Scan เป็นการสำรวจเพื่อหาตำแหน่ง และจำนวนเหล็กเสริม เฉพาะเหล็กเสริมชั้นนอกที่มีความลึกไม่เกิน 100 มม. จากผิวสำรวจ ของโครงสร้าง การสำรวจด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างระหว่างการสำรวจ สามารถดำเนินการได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ผลการสำรวจที่ได้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับแบบก่อสร้างจริงของสะพาน และเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับใช้ในการทำแบบจำลองสะพานดังรูปที่ 7

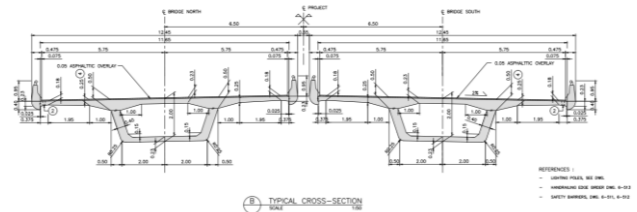


การวัดมิติของสะพาน



การสำรวจรายละเอียดเหล็กเสริม

รูปที่ 6 การสำรวจมิติและรายละเอียดเหล็กเสริมของสะพาน



รูปที่ 7 แบบสำรวจสะพานปทุมธานี 2 (Asbuilt Drawing)

4. การตรวจสอบวัสดุทางวิศวกรรม

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (Material Testing) ซึ่งรายการทดสอบ วัสดุในครั้งนี้เป็นการทดสอบวัสดุที่ทำกรเก็บตัวอย่างจากโครงสร้าง สะพานเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเพื่อใช้เป็นข้อมูล พื้นฐานในการวิเคราะห์และประเมินความเสียหายของสภาพโครงสร้างและ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพาน โดยมี รายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบหาค่ากำลังแรงอัดของคอนกรีต

- การเก็บตัวอย่างคอนกรีต แบบ Core Drilling และทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C42[5]
- การทดสอบหาค่ากำลังแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) ด้วย Rebound Hammer ตามมาตรฐาน ASTM C805[6]

จากผลการทดสอบกำลังคอนกรีตทั้งสองรูปแบบดังรูปที่ 8พบว่าค่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงสามารถใช้งาน คอนกรีตได้โดยไม่ต้องดำเนินการเสริมกำลังด้านการรับแรงอัดของคอนกรีต



Core Drilling



Rebound Hammer

รูปที่ 8 การทดสอบหาค่ากำลังแรงอัดของคอนกรีต

4.2 การตรวจวัดค่า Carbonation Depth การหาปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content)

การทดสอบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากสภาวะแวดล้อม โดยทำการตรวจวัดค่า Carbonation Depth ซึ่งเป็นการทดสอบความเป็นด่างของคอนกรีตซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กเสริม และการหาปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content) เนื่องจากเมื่อไอออนคลอไรด์ (Cl^-) ตามมาตรฐาน ASTM C1152[7] ซึมผ่านเนื้อคอนกรีตและสะสมถึงระดับหนึ่งใกล้ผิวเหล็กเสริม จะทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (corrosion) หรือเกิดสนิมได้ การทดสอบจะทำการเจาะผกคอนกรีตตัวอย่างที่มีความลึก 1.0 ถึง 10.0 เซนติเมตร และนำมาทดสอบเพื่อหาโอกาสในการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ตารางที่ 1 ผลการตรวจวัดค่า Carbonation Depth การหาปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content)

ตำแหน่ง	ความลึกการพบคาร์บอนเนชั่น (cm)	Chloride Concentration (w/w of sample)			
		1 cm	3 cm	5 cm	7 cm
Abutment(A1)	3	0.011	0.015	0.026	0.033
Abutment(A10)	4	0.009	0.014	0.027	0.032
Pier(P5)	0	0.012	0.026	0.027	0.022
Pier(P6)	0	0.017	0.022	0.029	0.017
Box Segment(3-4)	0	0.007	0.009	0.018	0.020
Box Segment(8-7)	1	0.006	0.009	0.010	0.013

ตารางที่ 1 แสดงผลการตรวจวัดค่า Carbonation Depth การหาปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content) พบว่าผลการทดสอบการเกิด Carbonation ในคอนกรีตพบว่าค่าความลึกของระยะคาร์บอนเนชั่นโดยรวมแล้วอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเกิดสนิมในเหล็กเนื่องจากมีระดับความลึกที่ยังน้อยกว่าระยะหุ้มของคอนกรีตอยู่มาก ซึ่งค่าดังกล่าวไม่ส่งผลทำให้เหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนจนเป็นสนิมได้ และผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์โดยรวมพบว่า ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม(ประมาณ 5 cm) ปริมาณคลอไรด์ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (น้อยกว่า 0.03% โดยน้ำหนัก) ดังนั้นเหล็กเสริมจึงมีโอกาสเกิดสนิมต่ำเมื่อเทียบกับผลของความลึกการเกิด Carbonation และปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่ในบางตำแหน่งพบปริมาณคลอไรด์เกินระดับมาตรฐานแต่ยังมีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงควรมีการติดตามตรวจสอบปริมาณคลอไรด์และควรทำการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นระยะอย่างต่อเนื่องป้องกันปฏิกิริยาในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 9



Carbonation Depth



Chloride Content

รูปที่ 9 การตรวจวัดค่าความลึกของคาร์บอนเนชั่นการหาปริมาณคลอไรด์

4.3 การตรวจสอบการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion Test)

การตรวจสอบการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion Test) ด้วยวิธี Half-cell potential test ด้วย Copper-Copper Sulfate Electrode (CSE) แบบ Single-point Measurement โดยใช้กระแสไฟฟ้าส่งผ่านเข้าไปในเหล็กเสริมในบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ดังแสดงในรูปที่ 10 เพื่อบอกปริมาณสนิมเหล็กที่เกิดขึ้น โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 876-91 ผลการประเมินโอกาสการเกิดสนิมในเหล็กเสริมพบว่าทุกตำแหน่งที่ทำการสำรวจมีโอกาสในการเกิดสนิมต่ำ (มากกว่า -200 mV) ตามมาตรฐาน ASTM C876[7] ดังตารางที่ 2 และ 3 [8]



รูปที่ 10 การตรวจสอบด้วยวิธี Half-cell potential test

ตารางที่ 2 Standard Test Method for Corrosion Potentials

Copper/Copper sulfate	Silver/silver chloride / 4M KCl	Standard hydrogen electrode	Calomel	Corrosion condition
> -200 mV	> -106 mV	$> +116$ mV	> -126 mV	Low (10% risk)
-200 to -350 mV	-106 to -256 mV	$+116$ to -32 mV	-126 to -276 mV	Intermediate risk
< -350 mV	< -256 mV	< -34 mV	< -276 mV	High (<90% risk)
< -500 mV	< -406 mV	< -184 mV	< -426 mV	Severe corrosion

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion Test) ด้วยวิธี Half-cell potential

ตำแหน่ง	พื้นที่ (จำนวนจุด)	ค่าเฉลี่ย (mV.)	ระดับการสึกกร่อนของเหล็กเสริม
Abutment(A1)	140 x 140 cm. (64)	-30.1503	No Corrosion
Abutment(A10)		-86.319	No Corrosion
Pier(P5)		-198.964	No Corrosion
Pier(P6)		-113.433	No Corrosion
Box Segment(3-4)		-192.562	No Corrosion
Box Segment(8-7)		-140.029	No Corrosion

5. การทดสอบสะพาน(Bridge Load Testing)

การทดสอบสะพานเพื่อให้ได้ผลของพฤติกรรมของสะพานที่เกิดขึ้นในสภาวะปัจจุบันเพื่อนำผลที่ได้จากการตรวจวัดไปแบบแก้แบบจำลองของสะพานเพื่อวิเคราะห์สัดส่วนความปลอดภัย จากการทดสอบในสภาวะพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำของรถบรรทุกทดสอบที่มีน้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 3 คันดังรูปที่ 11 เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็ว 60 กิโลเมตรจากนั้นจะทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของคานสะพาน เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies)ค่าความหน่วง (Damping Ratios) และรูปร่างการสั่นไหว(Mode Shape) โดยอาศัยค่าที่

อ่านได้จากอุปกรณ์วัดความเร่ง ผลการวิเคราะห์สะพานพบว่ามีความถี่ธรรมชาติและความถี่อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 3.099 Hz, 3.071% ตามลำดับ



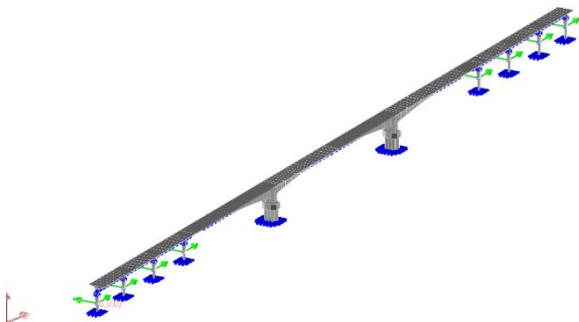
รูปที่ 11 การทดสอบสะพาน(Bridge Load Testing)

6. การประเมินหาสัดส่วนความปลอดภัย(Bridge Load Rating)

6.1 การก่อสร้างปรับแก้แบบจำลองของสะพาน

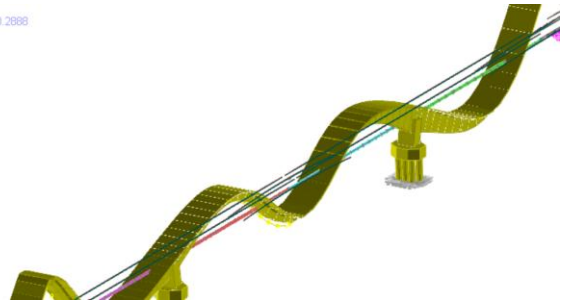
ในการสร้างแบบจำลองของสะพาน เนื่องจากสะพานมีพฤติกรรมที่ค่อนข้างซับซ้อน การสร้างแบบจำลอง Finite Element จะใช้ Software MIDAS Civil [8] ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพาน เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานโดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธี Finite Element Analysis (FEA) เป็นวิธีสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี Numerical Method และเป็นวิธีเชิงการประมาณ (Approximate Method) การวิเคราะห์โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน และจะต้องจำลองโครงสร้างในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีรูปร่างและคุณลักษณะต่างๆใกล้เคียงกับโครงสร้างจริง การนำผลที่ได้จากการทดสอบมาปรับแก้แบบจำลองของสะพานที่มีหน้าตัดสะพานเหมือนกับหน้าตัดสะพานจริง เพื่อให้แบบจำลองของโครงสร้างสะพานมีความสอดคล้องกับสถานะในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานในสถานะปัจจุบันมากที่สุด โดยจะเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างการทดสอบสะพานกับการปรับแก้แบบจำลองให้มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดโดยจะคำนึงถึง ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) และรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำแบบจำลองไปประเมินหาสัดส่วนความปลอดภัย (Rating Factor, RF) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13

Stage: BC Right Side Span Closure / Step 1



รูปที่ 12 ตัวอย่างของ Nonlinear Construction Stage Analysis ของสะพาน(Completed Bridge Construction)

$f = 3.46, \tau = 0.2888$

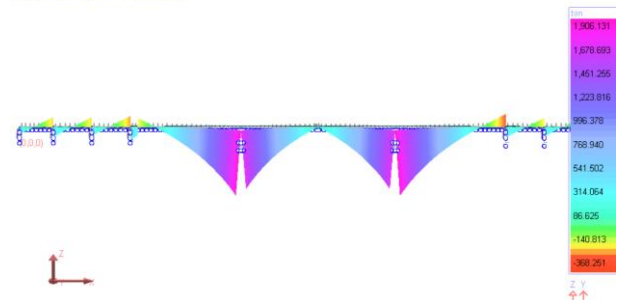


รูปที่ 13 Natural Frequency และ Mode Shape ภายหลังการปรับแก้ค่าของแบบจำลอง(Main Span) (Test/ FEA = 1.05)

6.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง(Analysis Results)

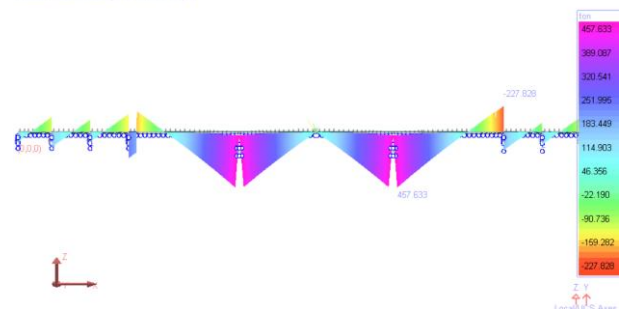
การวิเคราะห์โครงสร้างจะพิจารณาการรับน้ำหนักของโครงสร้างอยู่ 3 รูปแบบตามมาตรฐาน AASHTO LRFR ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกถาวร(Dead Load, DL), น้ำหนักบรรทุกถาวรที่เพิ่มทีหลัง(Superimposed Dead Load, SDL) และน้ำหนักบรรทุกจรจาก HL-93 (Live Load ตาม AASHTO LRFD) ทั้งนี้พฤติกรรมแบบจำลองโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) จะพิจารณาผลของแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากปัจจัยผลของน้ำหนักบรรทุกจร (Truck Load) รูปแบบ HL93 จะพิจารณา Moving load ของน้ำหนักบรรทุกจรรูปแบบ HL93 เพื่อวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัด (Moment) และแรงเฉือน (Shear) สูงสุด ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 19 และตารางที่ 4

Zoom: 1.953x Stage: 15 YEARS / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 15 YEARS Step 1



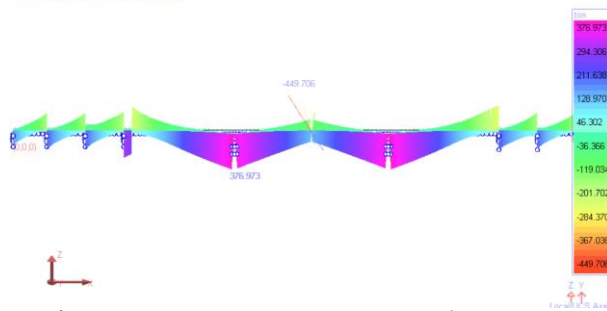
รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ของสะพาน (Shear (T)) เนื่องจาก DL

Zoom: 1.953x Stage: 15 YEARS / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 15 YEARS Step 1



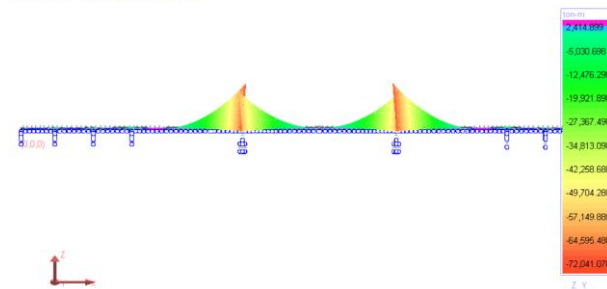
รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ของสะพาน (Shear (T)) เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.953K
Member Forces - Shear Fy - HL_93(1+IM) M/L



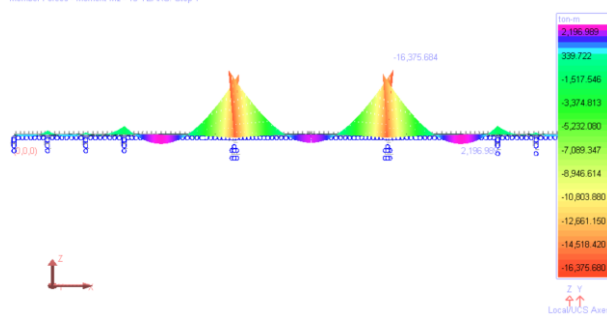
รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์ของสะพาน(Shear (T)) เนื่องจาก HL-93 (1+IM)

Member Forces - Moment Mz - 15 YEARS: Step 1



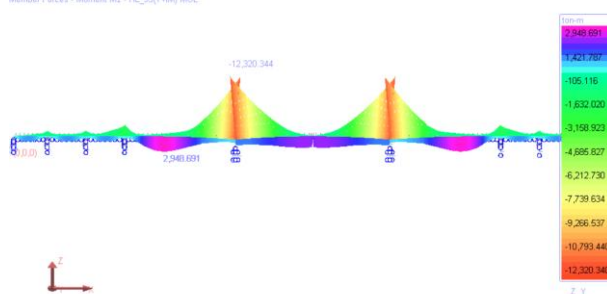
รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์ของสะพาน(Moment (T-M)) เนื่องจาก DL

Zoom: 1.953K Stage: 15 YEARS / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 15 YEARS: Step 1



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์ของสะพาน(Moment (T-M)) เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.953K
Member Forces - Moment Mz - HL_93(1+IM) M/L



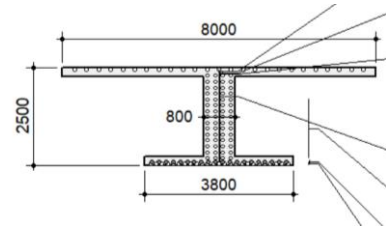
รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์ของสะพาน(Moment (T-M)) เนื่องจาก HL-93 (1+IM)

ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์ของสะพานพุ่มธานี 2

Girder	Shear (T)	Moment (T-m)
DL	185	2389
SDL	40	2197
LL+IM	125	2950

6.3 กำลังของหน้าตัดช่วง Main Bridge (At Mid Span Location)

ในการหากำลังของหน้าตัดช่วง Main Bridge ในช่วงกลางสะพาน ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของคานรูปกล่องและปริมาณเหล็กเสริมหรือลวดอัดแรงที่ใช้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์กำลังของหน้าตัดในปัจจุบันได้อย่างแม่นยำจึงจะได้ข้อมูลจากแบบสำรวจสะพานพุ่มธานี 2(Asbuilt Drawing) ดังแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งได้จากการตรวจจริงมาใช้สร้างแบบจำลองของหน้าตัดคานรูปกล่องโดยใช้ Software Response 20000 [8]

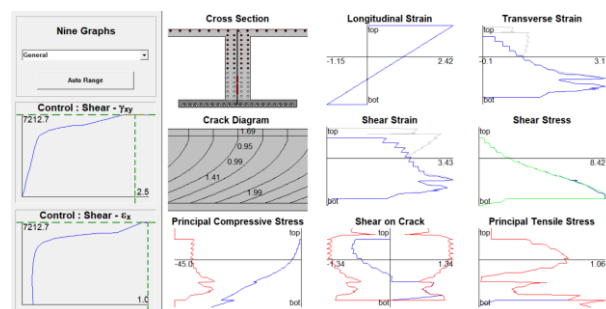


รูปที่ 20 หน้าตัดสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรม

6.4 กำลังของหน้าตัดด้าน Shear Capacity

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมแรงเฉือนของหน้าตัดโครงสร้างดังรูปที่ 21 ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD ให้ใช้ทฤษฎี Modified Compression Filed Theory (MCFT) ได้แก่

- หน้าตัดของคานหรือโครงสร้างมีการกระจายตัวของค่าความเครียด (Strain) เป็นเส้นตรงภายหลังการตัด
- แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเป็นแบบ Perfect Bond
- พฤติกรรมของวัสดุ เป็นไปตาม Stress-Strain Relationship
- คอนกรีตที่ถูกกระทำโดยความเค้นดึงในแนวตั้งฉากจะมีการลดลงของค่า Compressive Strength หรือที่เรียกว่า Compression Softening Effect
- คอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเกิดรอยร้าวยังสามารถรับแรงดึงได้ หรือที่เรียกว่า Tension Stiffening Effect
- ในการวิเคราะห์พฤติกรรม พิจารณาจาก Equilibrium, Compatibility, และ Stress-Strain Relation
- พิจารณาผลของ Tensile Stress Across Crack Surface เพื่อพิจารณาผลของความสามารถในการถ่ายแรงระหว่างรอยแตก

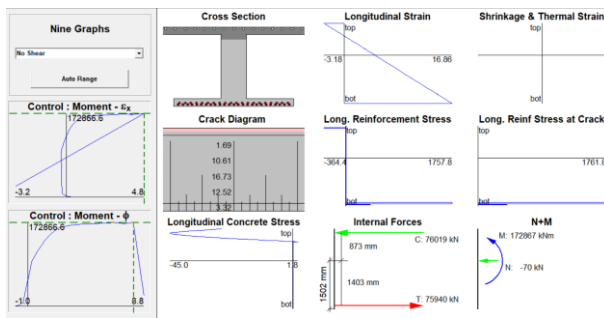


รูปที่ 21 Response สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมแรงเฉือน

6.5 กำลังของหน้าตัดด้าน Flexural Capacity

ในการวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด ที่พฤติกรรมเป็น Flexural Behavior ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD สามารถใช้วิธี Strain Compatibility Analysis ในการวิเคราะห์ ร่วมกับ การใช้ แบบจำลอง Stress-Strain Relationship ของวัสดุ เพื่อได้กำลังของหน้าตัดที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมและวัสดุจริง โดยสมมติฐานในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 22 เป็นดังนี้

- หน้าตัดของคานหรือโครงสร้างมีการกระจายตัวของค่าความเครียด (Strain) เป็นเส้นตรงภายหลังการตัด
- แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเป็นแบบ Perfect Bond
- พฤติกรรมของวัสดุ เป็นไปตาม Stress-Strain Relationship



รูปที่ 22 Response สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมโมเมนต์ดัด

6.6 ผลการประเมินหาสัดส่วนความปลอดภัย

การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพาน โดยวิธีที่กำหนดตามมาตรฐาน AASHTO LRFR โดยข้อกำหนดในมาตรฐานดังกล่าวจะนำมาประเมินกับสะพานตามสภาพที่ตรวจวัดได้ในปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบกับ ขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ หรือ การประเมินในระดับ Inventory Level เพื่อให้ได้ แนวทางการบูรณะสะพานที่ปรับปรุงให้สะพานมีความแข็งแรงอยู่ในระดับ มาตรฐานน้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบันหรือ HL-93 โดยอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานที่ถูกปรับแก้ด้วยข้อมูลจากการทดสอบจริงแล้ว

สำหรับสมการเพื่อใช้ในการประเมินตามมาตรฐาน AASHTO LRFR จะใช้ค่าของ Rating Factor (RF) เพื่อใช้ในการพิจารณาว่าสะพานมีความแข็งแรงเพียงพอหรือไม่หรือมีความจำเป็นต้องเสริมกำลังโดยสมการของ Rating Factor (RF) ตามมาตรฐาน AASHTO LRFR ในกรณีที่ค่า RF มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1 หมายความว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาได้อย่างปลอดภัย แสดงดังนี้

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

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

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

$$\phi_s = 1.00$$

Slab Bridge

$$\phi_n = 0.9$$

Bending

น้ำหนักบรรทุกคงที่

$$\gamma_{DC} = 1.25$$

น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่ปรับแต่งผิวจราจร และแบร์รี่เออ์กันตัก

ผู้ออกแบบกำหนดให้ใช้ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

$$\gamma_{DW} = 1.5$$

น้ำหนักบรรทุกจร

$$\gamma_{LL} = 1.75 \text{ (Inventory Factor)}$$

การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานที่ได้จากแบบจำลองและประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย พบว่ามีอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า 1 ในระดับการออกแบบ (Inventory Level) จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างสะพานมีความแข็งแรงตามอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้ตามที่ออกแบบตามมาตรฐานแสดงดังได้ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงสัดส่วนความปลอดภัย (Rating Factor, RF)

Behavior	Shear(Ton)	Flexural(Ton.m)
Dead Load(DL)	185	2,389
Superimposed Dead Load (SDL)	40	2,197
Live Load(LL+IM)	125	2,950
Nominal Capacity(M_n)	721	17,287
RF(Inventory)	1.19	2.13

7. สรุปผลการศึกษา

จากการตรวจสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานปทุมธานี 2 เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาระหว่างท้องที่ตำบลบางชะแยงกับตำบลบ้านใหม่ อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี และเป็นส่วนหนึ่งของทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 345 สามารถสรุปได้ดังนี้

- จากการสำรวจสภาพสะพานปทุมธานี 2 ณ ปัจจุบัน ไม่พบความเสียหายที่รุนแรง โครงสร้างสะพานโดยรวมยังอยู่ในสภาพค่อนข้างดี อย่างไรก็ตาม เริ่มมีร่องรอยการเสื่อมเกิดขึ้นบ้างแล้ว ในบางตำแหน่งที่เป็นคอนกรีตพบว่ามีรอยแตกและหลุดล่อนเล็กน้อย
- คุณภาพของวัสดุยังอยู่ในสภาพดี แต่จากการสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์พบค่าสูงเกินมาตรฐานบางตำแหน่งดังนั้นควรมีการตรวจสอบสนิมในเหล็กเสริมเป็นระยะๆ
- จากผลการประเมิน LRFR ในส่วนของกำลังสะพานยังสามารถรองรับแรงที่ระดับ Inventory Level หรือ ระดับการออกแบบได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง. คู่มือการตรวจสอบสะพานกรมทางหลวง (BMMS). กรมทางหลวง.
- [2] สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง. (2555). คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน ระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] Lantsoght, E., Veen, C., Boer, A., Hordijk, D. A. (2017). State-of-the-art on load testing of concrete bridges. *Engineering Structures*, 150, pp.231-24
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *Manual for bridge evaluation* (3rd ed.). AASHTO.
- [5] ASTM International. (2023). ASTM C42/C42M-23: Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. ASTM International. https://www.astm.org/c0042_c0042m-23.html
- [6] ASTM International. (2023). ASTM C805/C805M-23: Standard test method for rebound number of hardened concrete. ASTM International. https://www.astm.org/c0805_c0805m-23.html
- [7] ASTM International. (2020). ASTM C1152/C1152M-20: Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. ASTM International. https://www.astm.org/c1152_c1152m-20.html
- [8] ASTM International. (1991). ASTM C876-91: Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM International.