พฤติกรรมการรับน้ำหนักสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า หลังซ่อมแซมจุดถ่ายน้ำหนักบริเวณกึ่งกลางสะพาน

Load-Carrying Behaviors of Somdet Phra Pinklao Bridge After Repairing Center Hinge Bearings

ชวลิต ทิพากรวงศ์[1*] คุณมาศ พันธุเตชะ[1] กุลวัชร ปิ่นละมัย[1] และ กฤดายุทธ์ ชมภูมิ่ง[2]

[1] *กรมทางหลวงชนบท จ.กรุงเทพมหานคร*

[2] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี*

**Corresponding author; E-mail address: boy9811@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการรับน้ำหนักของสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้าหลังจากการซ่อมแซม สะพานมีคานยื่นออกจากตอม่อแบบสมดุล (Balanced Cantilever Bridge) จุดถ่ายน้ำหนักบริเวณปลายคานยื่น (Center Hinge Bearing) เกิดความเสียหายทำให้ Hinge Bearing ไม่สามารถเคลื่อนตัวตามแนวยาวสะพานได้ตามปกติและเกิดการสั่นสะเทือนจนรู้สึกได้ การตรวจสอบสะพานพบว่า ความเสียหายเกิดจากการคืบตัวของคอนกรีตโครงสร้างซึ่งทำให้ Center Hinge Bearing เลื่อนออกจากที่ออกแบบไว้ การซ่อมแซมสะพานดำเนินการด้วยการติดตั้ง Center Hinge Bearing ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง การซ่อมแซมทำให้การกระจายน้ำหนักดีขึ้นและการสั่นไหวลดลงอยู่ในระดับที่ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างสะพาน

คำสำคัญ: สะพานที่มีคานยื่นออกจากตอม่อแบบสมดุล, จุดถ่ายน้ำหนักบริเวณปลายคาน, การซ่อมแซมสะพาน, พฤติกรรมการรับน้ำหนักสะพาน

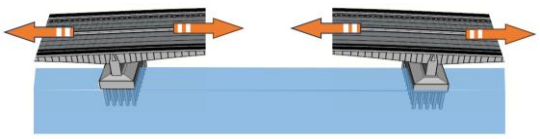
Abstract

This article presents load-carrying behaviors of Somdet Phra Pinklao Bridge after rehabilitation. The bridge is a balanced cantilever one. The center hinge bearing at the edge of the cantilever was damaged. The damage resulted in bearing restraint of longitudinal movement and a high and perceptible vibration. Bridge inspection found that the damage was caused by concrete creep resulting in the hinge bearing movement away from its original position and the ability to distribute bearing load was reduced. The solution was to replace and install the new hinge bearings in the right position and also change the type of the center hinge bearing to improve load distribution. After the replacement, the bearing load distribution was enhanced and the vibration was reduced to normal level.

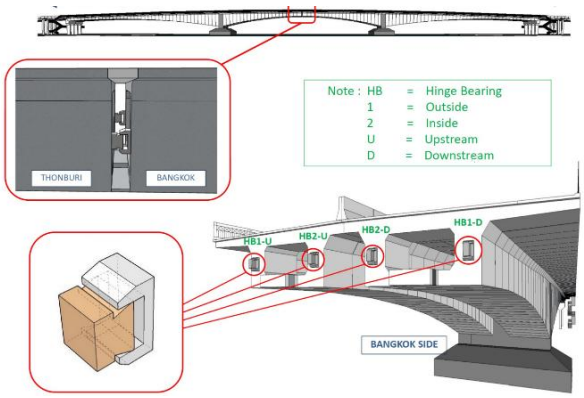
Keywords: Balanced cantilever bridge, center hinge bearing, Rehabilitation, Load-carrying behavior

1. ความเป็นมา

สะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้าเป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาเชื่อมระหว่างเขตพระนคร กับเขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร เริ่มก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2514 แล้วเสร็จเมื่อปี พ.ศ. 2516 สะพานมีโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรง Post-tension ที่มีคานรูปกล่อง (Box Girder) ยื่นออกจากตอม่อแบบสมดุล (Balanced Cantilever Bridge) ดังรูปที่ 1 ปลายพื้นยื่นมีการติดตั้งจุดถ่ายน้ำหนักเพื่อกระจายน้ำหนักจากปลายทั้งสองด้านลงสู่ตอม่อ ดังรูปที่ 2 สะพานออกแบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร AASHTO HS20-44 สะพานมี 3 ช่วงต่อเนื่อง ช่วงกลางยาว (Midspan) 114 เมตร ช่วงปลาย (Side span) ยาวช่วงละ 83 เมตร ความยาวรวม 280 เมตร



รูปที่ 1 การก่อสร้างสะพานด้วยวิธี Balanced Cantilever



รูปที่ 2 จุดถ่ายน้ำหนักบริเวณปลายพื้นยื่น (Center Hinge Bearing)

ในปี พ.ศ. 2542 ช่องว่างคอนกรีตของปลายพื้นยื่น (Concrete gap) บริเวณกึ่งกลางสะพาน (Main Span) กว้างขึ้นและเกิดช่องว่างใน Center hinge bearing ดังรูปที่ 3 รวมทั้งเกิดการสั่นสะเทือนของสะพานจนรู้สึกได้ การแก้ไขปัญหาทำโดยติดตั้งลิ่มเหล็ก (Shimmering plate) บริเวณช่องว่าง (Gap) ของจุดหมุนกลาง (Central Hinge) และติดตั้งแท่งเหล็ก (Tie rod) ยึดกับผนังไดอะแฟรมเพื่อลดการสั่นสะเทือนของสะพาน [1] ดังรูปที่ 4

ช่องว่างของปลายพื้นสะพานกว้างขึ้น | ช่องว่างใน Center hinge bearing

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของพื้นสะพานที่พบในปี พ.ศ. 2542

รูปที่ 4 การติดตั้งลวดเหล็ก (Tie Rod) ยึดกับผนังไดอะแฟรม

ในปี พ.ศ. 2559 กรมทางหลวงชนบทดำเนินการตรวจสอบสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาในความรับผิดชอบ พบว่า โครงสร้างของสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้ายังคงมีความมั่นคงแข็งแรงเพียงพอ อย่างไรก็ดี พบการขัดตัวของ Center Hinge Bearing จนไม่สามารถเคลื่อนที่ตามที่ออกแบบไว้ [2]

ช่องว่างคอนกรีต (Concrete gap) ยังคงมีการขยายตัวมากขึ้นจนลิ่มเหล็กเสียหายและแท่งเหล็กเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไป กรมทางหลวงชนบทจึงได้ดำเนินการตรวจสอบสะพานอย่างละเอียดพร้อมหาแนวทางซ่อมแซมสะพานในปี พ.ศ. 2562

แผ่นลิ่มเหล็กเสียหาย | ลวดเหล็ก (Tie Rod) วิบัติ

รูปที่ 5 ความเสียหายบริเวณกึ่งกลางสะพาน

2. กระบวนการซ่อมแซมสะพาน

กระบวนการซ่อมแซมสะพานประกอบด้วยการตรวจสอบความเสียหายและการซ่อมแซม ดังรูปที่ 6 ขั้นตอนการตรวจสอบความเสียหายเริ่มจากการตรวจสอบด้วยสายตา การตรวจวัดความเสียหาย การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ การตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนัก การวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรง และการวิเคราะห์หาสาเหตุความเสียหาย ขั้นตอนการซ่อมแซมความเสียหายเริ่มจากการออกแบบซ่อมแซม ดำเนินการซ่อมแซม และประเมินผลการซ่อมแซม [3,4]

ตรวจสอบความเสียหาย
1) สังเกตด้วยสายตา
2) วัดขนาดความเสียหาย
3) ทดสอบคุณสมบัติวัสดุ
4) ตรวจสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนัก
5) วิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรง
6) วิเคราะห์สาเหตุของความเสียหาย

ซ่อมแซมความเสียหาย
7) ออกแบบซ่อมแซม
8) ดำเนินการซ่อมแซม
9) ประเมินผลการซ่อมแซม

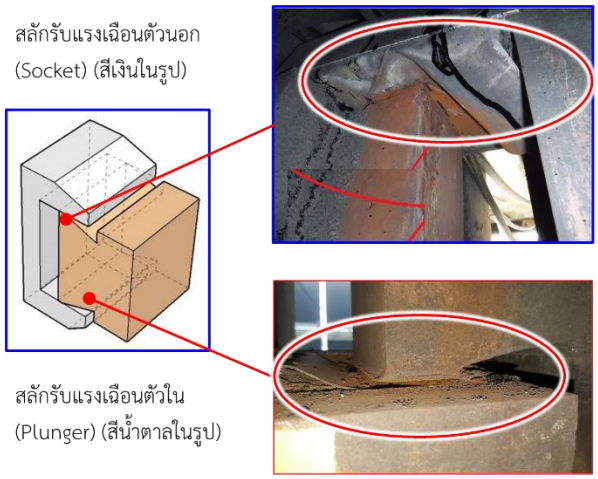
รูปที่ 6 กระบวนการซ่อมแซมสะพาน

3. งานสังเกตุความเสียหายด้วยสายตา

การประเมินความเสียหายเชิงกายภาพด้วยสายตา (visual inspection) อาศัยหลักเกณฑ์ Condition State (CS) ของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [5] ซึ่งมีการประเมินผลกระทบต่อโครงสร้างสะพาน

จากการตรวจสอบ Center Hinge Bearing พบการเกิดช่องว่าง (Gap) ระหว่างผิวสัมผัสด้านล่างของสลักรับแรงเฉือนตัวนอก (Socket) และตัวใน (Plunger) ช่องว่างของผิวสัมผัสด้านล่างทำให้แรงกดของผิวสัมผัสด้านบนเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การเคลื่อนตัวตามแนวสะพานของ Hinge Bearing ไม่เป็นไปตามปกติอันเป็นผลให้แผ่นลิ่มเหล็กเกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 7 ช่องว่างที่เกิดขึ้นทำให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักของ Center Hinge อยู่ในลักษณะ Semi-Hinge ซึ่งส่งผลอย่างมีนัยต่อพฤติกรรมและกำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกของ Box Girder ซึ่งความเสียหายเชิงโครงสร้าง (Condition Rating) อยู่ในระดับ 3



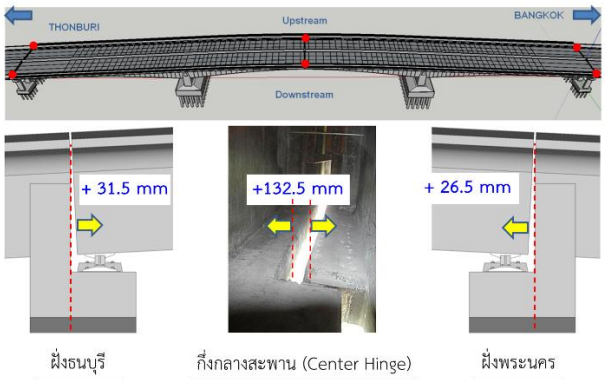


รูปที่ 7 ความเสียหายของ Center Hinge Bearing

4. งานวัดขนาดความเสียหาย

งานนี้ประกอบด้วยการตรวจวัดขนาดต่างๆ ของสะพานอันได้แก่ ความยาวสะพาน ระดับของสะพาน และช่องว่างต่างๆ สิ่งที่พบความผิดปกติคือช่องว่างระหว่างช่วงสะพานกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับแบบก่อสร้าง ดังรูปที่ 8 รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint) กว้างขึ้น แผ่นเหล็กบนและล่างของ Roller bearing เกิดการเยื้องตัว ดังรูปที่ 9 จุดถ่ายน้ำหนักบริเวณปลายพื้นยื่น (Center Hinge Bearing) มีช่องว่างเกิดขึ้น

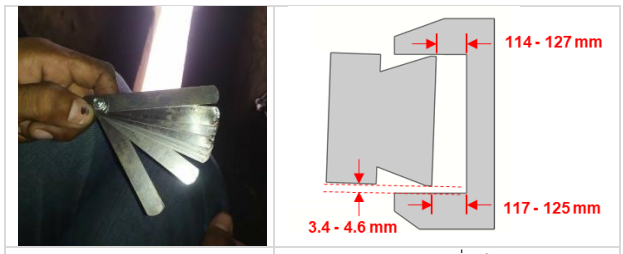
ช่องว่างใน Center Hinge Bearing เกิดขึ้นทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ กล่าวคือ ในแบบก่อสร้างไม่ได้กำหนดให้มีช่องว่างในแนวดิ่งระหว่างสลักแต่ตรวจวัดช่องว่างได้ระหว่าง 3.4 ถึง 4.6 มิลลิเมตร แบบก่อสร้างกำหนดให้มีช่องว่างในแนวราบ 38 มิลลิเมตรแต่ตรวจวัดช่องว่างได้ระหว่าง 114-127 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 ช่องว่างบริเวณปลายสะพานกว้างขึ้น



รูปที่ 9 ส่วนบนของ Roller bearing เคลื่อนตัวออกจากตอม่อตับริม



วัดช่องว่างด้วย Filler Gage | ช่องว่างที่วัดได้

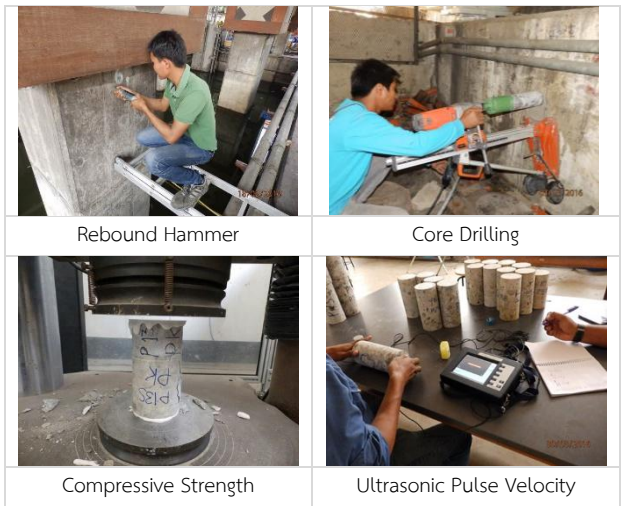
รูปที่ 10 ช่องว่างที่เกิดขึ้นใน Center Hinge Bearing

ช่องว่างระหว่างช่วงสะพานกว้างขึ้นเนื่องจากการคืบตัวคอนกรีตโครงสร้างสะพาน (Concrete Creep) ซึ่งสอดคล้องกับระยะการคืบตัวที่ได้จากการประมาณด้วยแบบจำลองของ CEB-FIP Model Code 1990 โดยคาดว่าระยะการคืบของคอนกรีตที่เกิดขึ้นถึงปัจจุบันคิดเป็นร้อยละ 98.7 ของการคืบตัวทั้งหมด

การคืบตัวของคอนกรีตทำให้คอนกรีตหดตัวอันเป็นเหตุให้ Center Hinge Bearing เคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้ และการเกิดช่องว่าง (Gap) ในสลักของ Hinge Bearing ทำให้สลักตัวนอกและสลักตัวในกระแทกกันในขณะถ่ายน้ำหนักอันส่งผลให้จุดหมุนของ Bearing เกิดความเสียหาย

5. งานทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

งานนี้ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในสนามโดยใช้ Rebound Hammer และ โดยวิธี Core Drilling รวมทั้งการทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity ตามมาตรฐาน ASTM C805 ASTM C39/AASHTO T22 และ ASTM C597 – 09 [6,7] ไม่พบความผิดปกติใดๆ ดังรูปที่ 11



Rebound Hammer | Core Drilling
Compressive Strength | Ultrasonic Pulse Velocity

รูปที่ 11 การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตโครงสร้างสะพาน

6. งานตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักสะพาน

6.1 เตรียมการตรวจสอบ

การตรวจสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักเป็นการตรวจสอบการตอบสนองของโครงสร้างต่อน้ำหนักการจราจรและอุณหภูมิของอากาศ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบได้แก่ ค่าความเครียด (Strain) ค่าการโก่งตัว (Deflection) ค่าการเอียงตัว และค่าการสั่นไหว (Vibration)

อุปกรณ์ตรวจสอบสะพานประกอบด้วย อุปกรณ์วัดความเครียด (Strain Gage) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer) อุปกรณ์วัดมุมการแอ่นตัว/เอียงตัว (Tilt Meter) และอุปกรณ์วัดอัตราการสั่นไหว (Velocity Sensor) คุณสมบัติของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 12

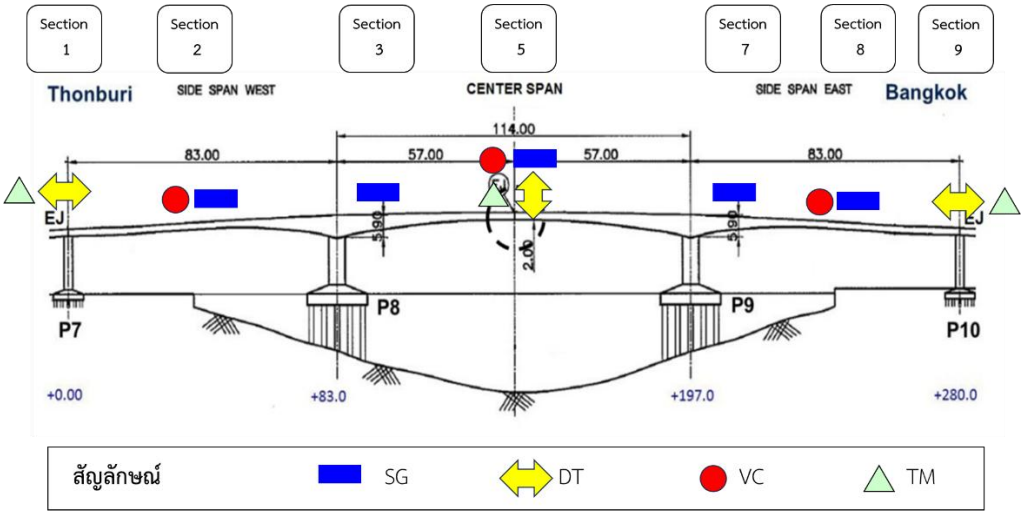
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

รายการ	Specifications
Strain Gage	ช่วงค่าที่วัดได้ ± 2,000 μ ความถูกต้อง 1 μ
Displacement Transducer	ช่วงค่าที่วัดได้ 100 มม. ความถูกต้อง 0.01 มม.
Tilt Meter	ช่วงค่าที่วัดได้: ±10 องศา ความถูกต้อง 0.005 องศา
Velocity Sensor	ช่วงที่วัดได้ 50 mm/s ความถูกต้อง 0.2%

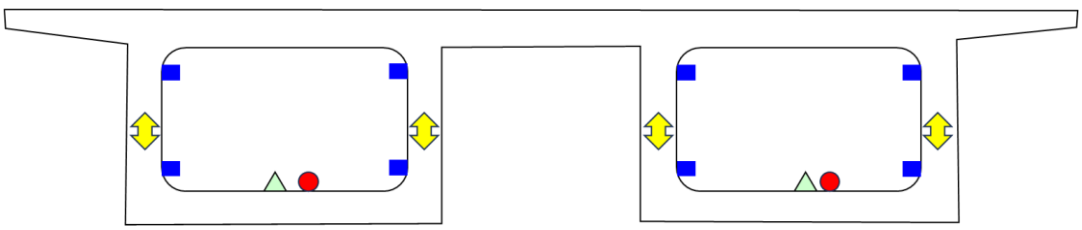
จากการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างเบื้องต้น (ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 7) ได้กำหนดตำแหน่งตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักโครงสร้างสะพาน 7 ตำแหน่ง ซึ่งครอบคลุมคานหลัก (Box Girder) บริเวณกึ่งกลางสะพาน Center Hinge Bearing และ Roller Bearing ดังรูปที่ 13 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ของแต่ละตำแหน่ง ดังในรูปที่ 14



รูปที่ 12 การติดตั้งอุปกรณ์และการตรวจสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนัก



รูปที่ 13 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมสะพานตามแนวยาว



รูปที่ 14 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์หน้าตัดของตำแหน่งต่างๆ (Section 5)

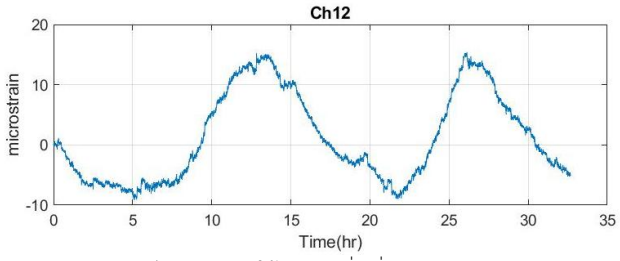
การตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักประกอบด้วยการตรวจวัดพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Test Truck) และภายใต้การจราจรปกติ (Normal Traffic) น้ำหนักบรรทุกประกอบด้วยรถบรรทุกทดสอบขนาด 25 ตัน จำนวน 6 คัน มีการทดสอบทั้งแบบสถิต (Static Load Test) และแบบพลวัต (Dynamic Load Test) ดังรูปที่ 15 ส่วนการจราจรปกติหมายถึงรถที่แล่นผ่านสะพานในช่วงเวลาที่เปิดใช้สะพาน



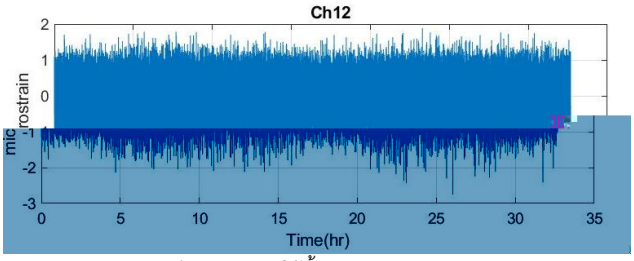
รูปที่ 15 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Test Truck)

6.2 ค่าความเครียด

จากค่าความเครียดของ Box Girder ภายใต้การจราจรปกติ (รูปที่ 16) และ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (รูปที่ 17) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นไม่ได้บ่งบอกถึงความผิดปกติ และค่าความเครียดที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าจากแบบจำลอง

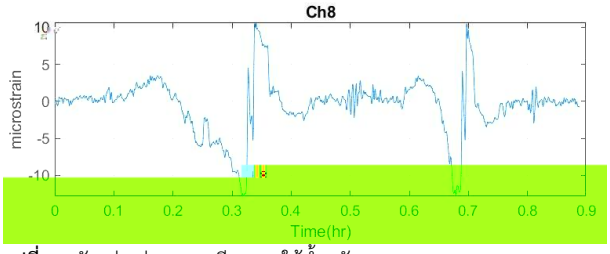


16 ก) องค์ประกอบภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง Section 8



16 ข) องค์ประกอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร Section 8

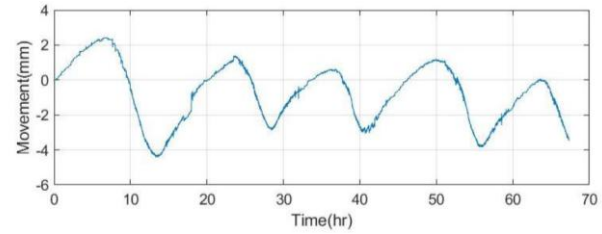
รูปที่ 16 ตัวอย่างองค์ประกอบของค่าความเครียดภายใต้การจราจรปกติ



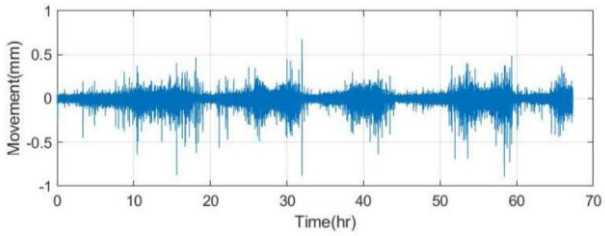
รูปที่ 17 ตัวอย่างค่าความเครียดภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ Section 5

6.3 ค่าการเคลื่อนตัว

จากผลการวัดการเคลื่อนตัวของ Planar Hinge Bearing ภายใต้การจราจรปกติและภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นไม่ได้บ่งบอกถึงความผิดปกติ รูปที่ 18 และ 19 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัว

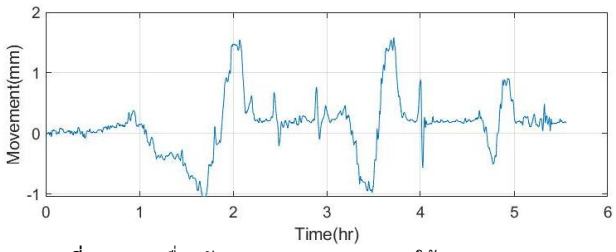


18 ก) องค์ประกอบภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง



18 ข) องค์ประกอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร (Live load)

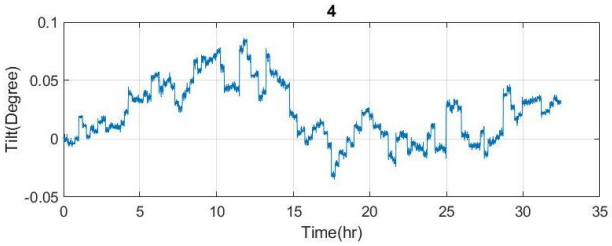
รูปที่ 18 การเคลื่อนตัวของ Hinge Bearing ภายใต้การจราจรปกติ



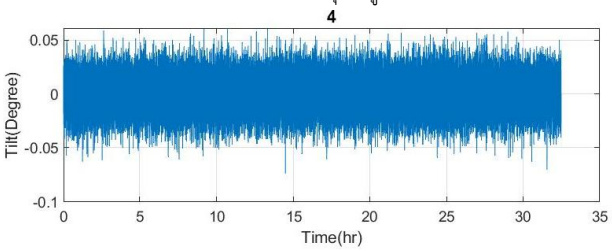
รูปที่ 19 การเคลื่อนตัวของ Hinge Bearing ภายใต้รถบรรทุกทดสอบ

6.4 ค่าการเอียงตัว

การเอียงตัวของ Box segment ภายใต้การจราจรปกติอยู่ในเกณฑ์ปกติ ดังรูปที่ 20 ไม่พบความผิดปกติ กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและน้ำหนักบรรทุกจรและคืนตัวเมื่อไม่มีปัจจัยภายนอกกระทบ



20 ก) องค์ประกอบภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

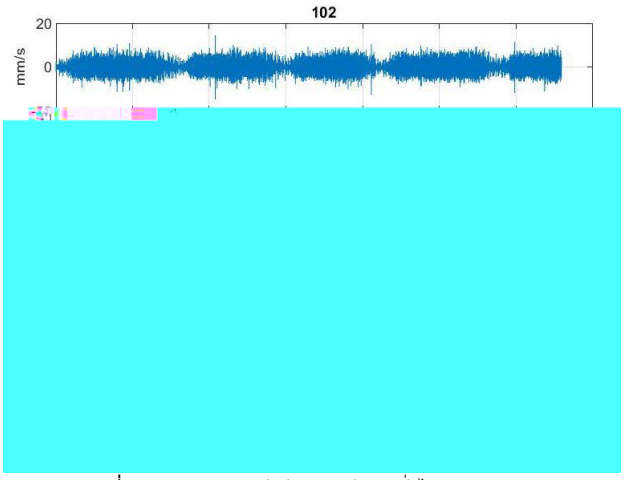


20 ข) องค์ประกอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร (Live load)

รูปที่ 20 ตัวอย่างค่าการเอียงตัวภายใต้การจราจรปกติ

6.5 ค่าการสั่นไหว

ผลการตรวจวัดสามารถแสดงค่าการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานภายใต้การจราจรปกติได้ โดยทำการแยก Time-History ของผลตรวจวัดและผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติโดยวิธี Fast Fourier Transformation Analysis (FFT) และ Power Spectral Density Analysis (PSD) ด้วยความเร็วการสั่นไหว ดังมีตัวอย่างแสดงในรูปที่ 21 ความเร็วในการสั่นไหวสูงสุดเท่ากับ 14.57 mm/s ซึ่งมากกว่าระดับที่อาจส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย (10 mm/sec, DIN 4150) [8]



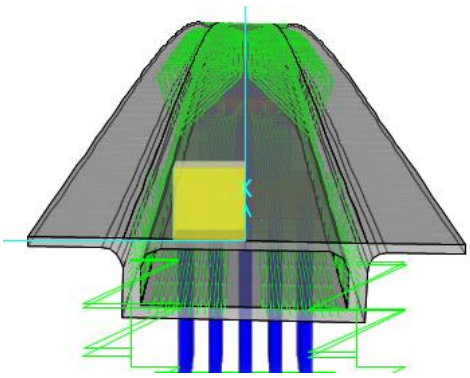
รูปที่ 21 ผลการตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นไหว Section 5

7. งานวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงสะพาน

งานนี้เริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองเบื้องต้นของโครงสร้างสะพาน (ก่อนปรับปรุง) (หัวข้อ 7.1) หลังจากนั้นปรับแก้แบบจำลองด้วยผลการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนัก (ก่อนปรับปรุง) (หัวข้อ 7.2) แล้วประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพาน (หัวข้อ 7.3)

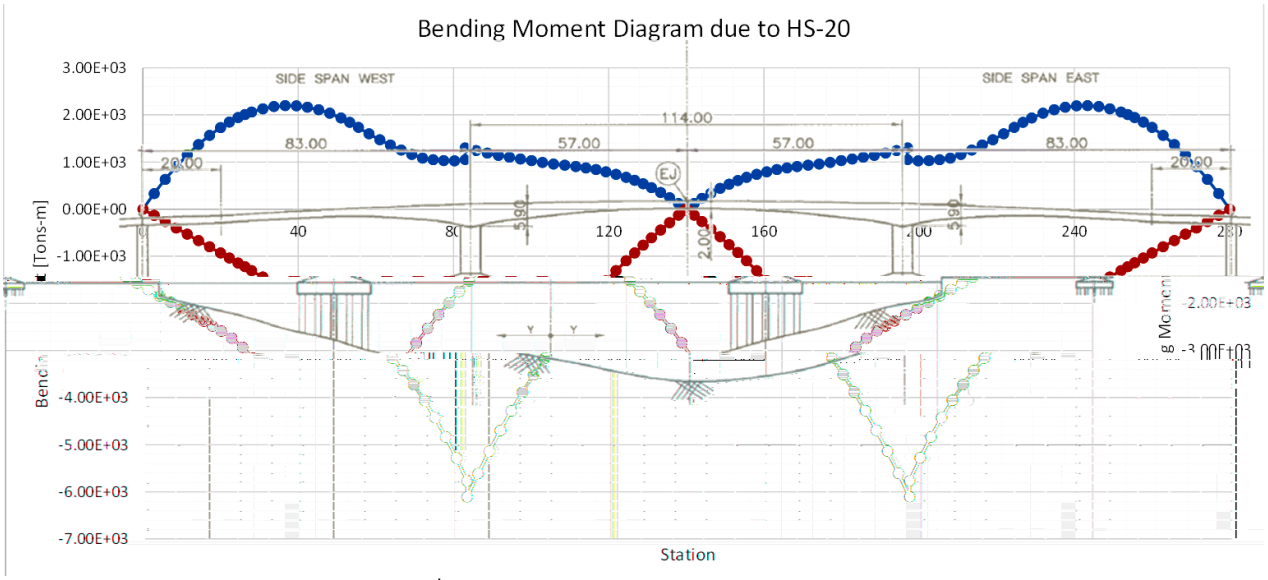
7.1 การพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างสะพาน (เบื้องต้น)

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างสะพานเบื้องต้น (Bridge Initial model) โดยอาศัยวิธี Finite Element แบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 22 โดยมีการพิจารณาคุณสมบัติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ คุณสมบัติวัสดุ ขนาดหน้าตัดคอนกรีต และสภาพที่รองรับ (Support condition) เป็นต้น เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง

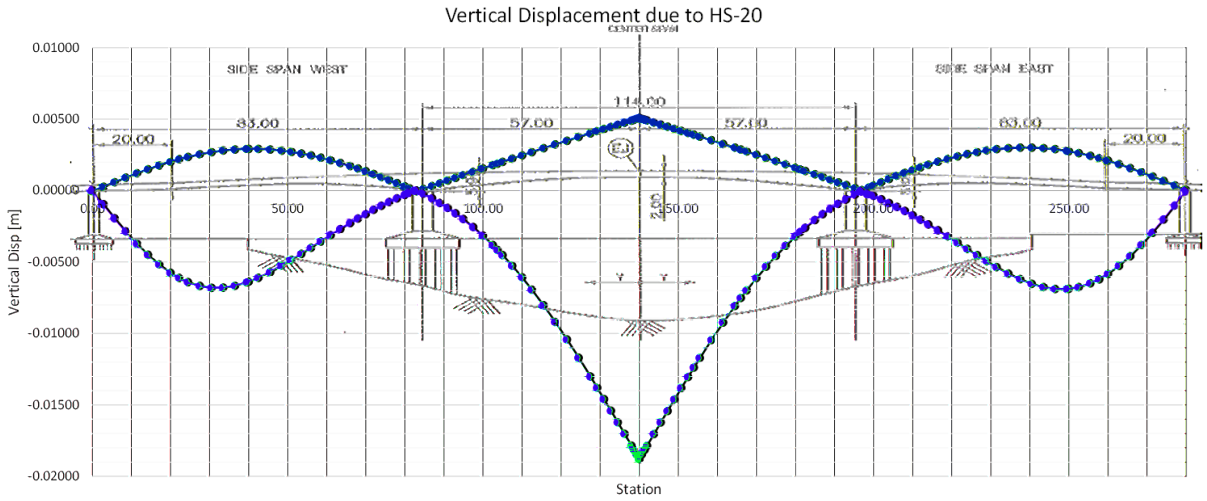


รูปที่ 22 แบบจำลองโครงสร้างสะพาน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานประกอบด้วยโมเมนต์ดัด แรงเฉือน การเสียรูปสะพาน และการสั่นไหวของสะพาน โดยมีตัวอย่างผลของโมเมนต์ดัดบวกและลบที่เกิดขึ้นของ Box Girder ภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรออกแบบ HS20 ดังรูปที่ 23 คานสะพานมีการแอ่นตัวและการโก่งตัว ดังรูปที่ 24



รูปที่ 23 โมเมนต์ดัดของ Box Girder จากการวิเคราะห์โครงสร้าง

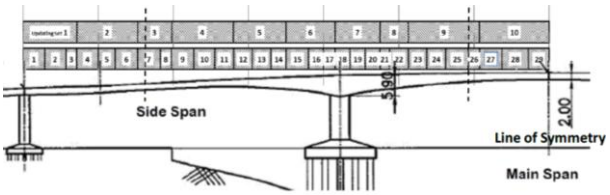


รูปที่ 24 การแอ่นตัวและการโก่งตัวในแนวดิ่งของ Box Girder จากการวิเคราะห์โครงสร้าง

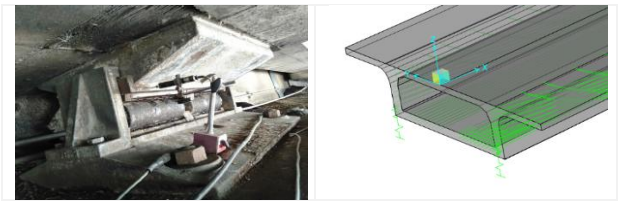
7.2 การปรับแก้แบบจำลองสะพาน

การปรับแก้แบบจำลองสะพาน (Updating model) ทำโดยการปรับเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานจากแบบจำลองเบื้องต้นกับผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ เช่น กำลังอัดคอนกรีต เป็นต้น และผลการตรวจสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน (ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 6) ค่าที่ใช้ในการปรับเทียบได้แก่ ค่าความเครียด (Strain) และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)

การปรับแก้แบบจำลองด้วยการแก้ไขคุณสมบัติของคานรูปกล่องอันได้แก่ ความแข็งเชิงดัด (Flexural Stiffness) ของหน้าตัดคาน ซึ่งมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดความยาว ดังนั้นจึงพิจารณาแบ่งหน้าตัดคานออกเป็นส่วนย่อย (Section) ในการปรับค่าคุณสมบัติของหน้าตัดดังรูปที่ 25 แบบจำลองกำหนดให้ Roller Bearing สามารถเคลื่อนตัวได้ในแนวราบแต่ไม่สามารถเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง ดังรูปที่ 26

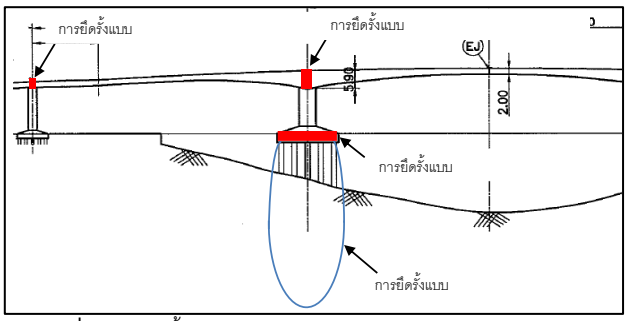


รูปที่ 25 การแบ่งคานสะพานออกเป็นส่วนย่อย (Section)



รูปที่ 26 แบบจำลองของ Roller Bearing เคลื่อนที่เฉพาะตามแนวสะพาน

ผนัง Diaphragm เหนือตอม่อ และ Pile Cap ซึ่งมีความหนามากและเป็นส่วนโครงสร้างที่มี Stiffness สูง แบบจำลองกำหนดให้ส่วนโครงสร้างเหล่านี้ให้มีการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปไปด้วยกันในเชิงระนาบ หรือมีการยึดรั้งกันในลักษณะ Planar Coupling ในส่วนของเสาเข็มสะพานซึ่งเป็นเสาเข็มกลุ่มได้พิจารณาให้กลุ่มเสาเข็มมีการเสียรูปไปด้วยกัน (Pile Group Coupling) โดยมีปลายเสาเข็มด้านล่างเป็นแบบยึดแน่น (Fixed) ดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 การยึดรั้งส่วนของโครงสร้างแบบระนาบ (Planar Coupling)

7.3 การประเมินความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างสะพาน

การประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างสะพานสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของโครงสร้างหลัก ประกอบด้วย โครงสร้างส่วนบน (Superstructure)และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) โดยโครงสร้างส่วนบนได้ทำการประเมินในรูปของค่า Rating Factor (RF) และโครงสร้างส่วนล่าง และ Deck Slab ได้ทำการประเมินในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลัง (Capacity) และภาระ (Demand) ในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง หรือที่เรียกว่า C/D Ratio (Capacity/Demand Ratio)

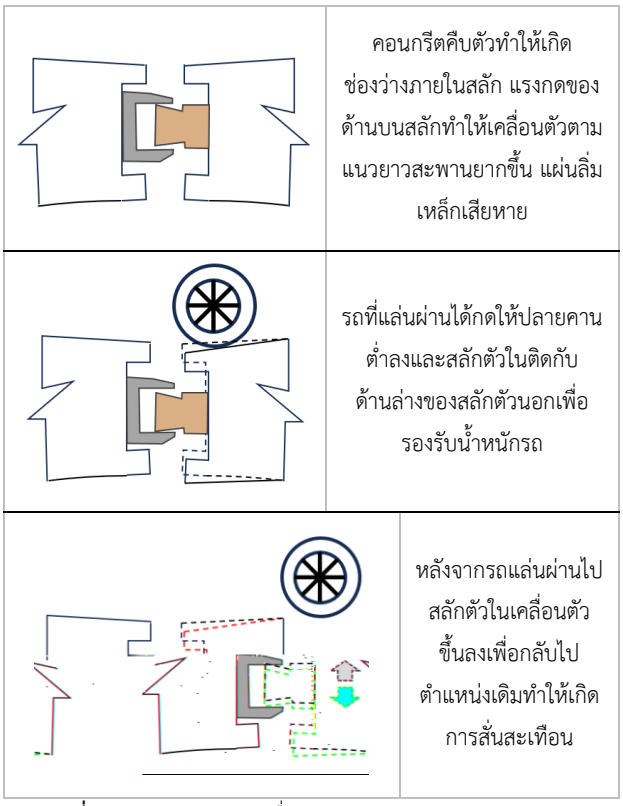
ผลการประเมินคานรูปกล่อง (Box Girder) พบว่า Rating Factor มีค่ามากกว่า 1.0 ดังตารางที่ 2 การประเมินกำลังของเสาตอม่อสะพานได้พิจารณาภายใต้ผลของแรงกระทำต่างๆที่เกี่ยวข้องตามที่ระบุในมาตรฐานการออกแบบ โดยผลการคำนวณอัตราส่วน C/D มีค่าเท่ากับ 1.49 และการประเมินกำลังรับน้ำหนักของฐานรากตอม่อสะพาน มีค่าอัตราส่วน C/D เท่ากับ 2.06

ตารางที่ 2 ค่า Rating Factor ของคานสะพานก่อนซ่อมแซม

ตำแหน่ง	Flexural Moment		Flexural Shear	
	Inventory	Operating	Inventory	Operating
กึ่งกลาง Side span	1.63	2.72	5.69	9.50
ใกล้ตอม่อ กลางน้ำ	2.01	3.36	3.06	5.11
ปลายคานยื่น ของ Main span	-	-	2.50	4.17

8. งานวิเคราะห์สาเหตุความเสียหาย

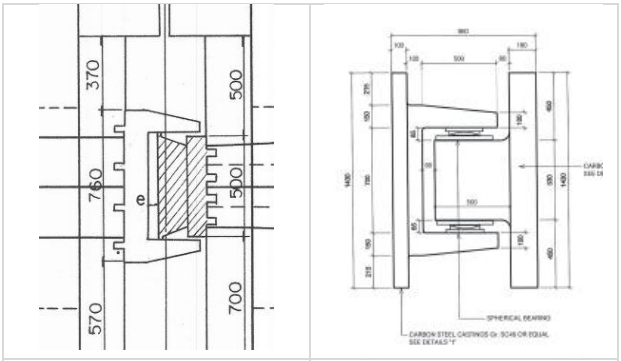
จากการตรวจสอบความเสียหายสะพาน พบว่า สาเหตุหลักส่วนหนึ่งเป็นผลของคอนกรีตโครงสร้างสะพานเกิดการคืบตัวจน Center Hinge Bearing หลุดออกจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้อันทำให้การถ่ายน้ำหนักของ Center Hinge Bearing ไม่สมบูรณ์อันนำไปสู่การสั่นสะเทือนและความเสียหาย การเคลื่อนตัวของ Center Hinge Bearing สามารถอนุมานได้ดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 การอนุมานการเคลื่อนตัวของ Center Hinge Bearing

9. งานซ่อมแซมสะพาน

การปรับปรุงจุดถ่ายแรงเฉือนบริเวณกึ่งกลางสะพานทำโดยการติดตั้ง Hinge Bearing ตัวใหม่ให้อยู่ในตำแหน่งที่ออกแบบไว้ รวมทั้งเปลี่ยนประเภทของ Hinge Bearing จากเดิมที่เป็นแบบ Plunger เป็นแบบ Planar เพื่อเพิ่มพื้นที่รองรับน้ำหนักให้กว้างขึ้นและให้การเคลื่อนตัวของสะพานบริเวณ Center Hinge มีความต่อเนื่องมากขึ้น ดังรูปที่ 29 และมีการติดตั้ง Spherical Bearing รองรับการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวระนาบและสามารถรองรับการแอ่นตัวได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 30



Plunger Hinge Bearing | Planar Hinge Bearing

รูปที่ 29 Hinge Bearing แบบเดิมกับแบบใหม่



รูปที่ 30 Planar Hinge Bearing ที่มี Spherical Bearing

เพื่อให้ Hinge bearing ยึดติดกับผนังคอนกรีตเดิมจึงได้หล่อฐานคอนกรีตขนาดใหญ่ (Mass Concrete) ดังรูปที่ 31 ทั้งนี้ภายหลังการติดตั้งได้มีการปลด Tie Rod ออกเพื่อให้สะพานมีการเคลื่อนตัวในสภาพปกติ



รูปที่ 31 การยึด Planar Hinge Bearing ด้วย Mass Concrete และลวดอัดแรง

10. งานประเมินผลการซ่อมแซมสะพาน

การประเมินผลการซ่อมแซมสะพานด้วยการเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน ก่อนการปรับปรุงสะพาน [9] และหลังการปรับปรุงสะพาน [10] อันประกอบด้วย ค่าความเครียด ค่าการเคลื่อนตัว ค่าการเอียงตัว และค่าการสั่นไหว

10.1 ค่าความเครียด

ค่าความเครียดของ Box Girder ภายใต้การจราจรปกติในส่วนของผลจากอุณภูมิแวดล้อมมีแนวโน้มลดลง โดยค่าที่ตรวจวัดได้ก่อนและหลังการปรับปรุงสะพานมีค่าอยู่ในช่วง 73 และ 33 microstrain ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ค่าความเครียดของ Box Girder ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทดสอบหลังการปรับปรุง มีค่าแตกต่างจากก่อนซ่อมแซมในปี 2559 เล็กน้อย (ตารางที่ 3) จากผลการตรวจวัดโดยรวมไม่พบค่าความเครียดที่บ่งชี้ถึงความผิดปกติในการรับน้ำหนักบรรทุกของ Box Girder หลังการปรับปรุง

ตารางที่ 3 ค่าความเครียดก่อนและหลังปรับปรุงสะพาน

กรณีทดสอบ	องค์ประกอบค่าความเครียด	ช่วงค่าที่วัดได้	ก่อนปรับปรุง (ต.ค. 2565)	หลังปรับปรุง (พ.ย. 2565)
การจราจรปกติ	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	น้อยสุด	-22	-33
		มากสุด	73	33
	น้ำหนักรถ	น้อยสุด	-10	-1
		มากสุด	40	10
รถบรรทุกทดสอบ	น้ำหนักรถ	น้อยสุด	-11	-13
		มากสุด	27	25

หมายเหตุ หน่วย microstrain ค่าบวกคือแรงดึง ค่าลบคือแรงกด

10.2 ค่าการเคลื่อนตัว

ค่าเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของ Planar Hinge Bearing ภายใต้การจราจรปกติลดลง ในขณะที่ Planar Hinge Bearing มีการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของสะพานเป็นอิสระมากขึ้น ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าการเคลื่อนตัวของ Bearing ภายใต้การจราจรปกติ

ชิ้นส่วนสะพาน	องค์ประกอบ	ช่วงค่าที่วัดได้	ก่อนปรับปรุง (ต.ค. 2565)	หลังปรับปรุง (พ.ย. 2565)
Planar hinge bearing (เคลื่อนตัวแนวดิ่ง)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	น้อยสุด	-2.29	-0.81
		มากสุด	2.05	0.76
	น้ำหนักรถ	น้อยสุด	-1.03	-0.79
		มากสุด	0.79	0.44
Planar hinge bearing (เคลื่อนตัวตามแนวยาวสะพาน)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	น้อยสุด	-4.42	-17.08
		มากสุด	2.43	19.63
	น้ำหนักรถ	น้อยสุด	-1.72	-10.68
		มากสุด	0.72	17.19
Roller bearing (เคลื่อนตัวตามแนวยาวของสะพาน)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	น้อยสุด	-0.85	-1.10
		มากสุด	1.17	0.31
	น้ำหนักรถ	น้อยสุด	-0.43	-0.53
		มากสุด	0.45	0.62

หมายเหตุ ค่าบวกคือเคลื่อนที่ขึ้น (แนวดิ่ง) หรือ เข้าหากลางสะพาน (แนวราบ)

10.3 ค่าการเอียงตัว

ค่าการเอียงตัว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความนี้ขอขอบพระคุณกรมทางหลวงชนบท (สำนักบำรุงทาง) ที่เอื้อเฟื้อให้ข้อมูลของโครงการศึกษาแนวทางการบูรณะโครงสร้างสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้าและโครงสร้างบูรณะสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า รวมทั้งสำนักงานศูนย์วิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ให้คำปรึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย (2543). *รายงานการตรวจสอบ โครงการตรวจสอบโดยเฉพาะของสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า*. หน้า 22-23

[2] กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม (2559). *รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาแบบจำลองและระบบตรวจวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงสะพาน ระยะที่ 1 (สะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า)*. หน้า 112-115

[3] กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม (2562). *รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาแนวทางการบูรณะโครงสร้างสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า*. หน้า 12

[4] Tipagornwong et al. (2022). Damage inspection, structural evaluation and rehabilitation of a balanced cantilever bridge with center hinges. *Advances in Road Infrastructure and mobility: Proceedings of the 18th International Road Federation World Meeting & Exhibition*, Dubai, the United Arab Emirates, 7-10 November 2021, pp. 187-201.

[5] The American Association Of State Highway and Transportation Officials. (2011). *Guide Manual for Bridge Element Inspection 1st Edition*. pp. 3-21.

[6] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2562). *การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (คอนกรีต)*. หน้า 13-30.

[7] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551). *มาตรฐานตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย*. หน้า 19-43.

[8] Adam Mayers. (2009). Vibration acceptance criteria. *Australian Bulk Handling Review*. March/April 2009, pp. 54-55.

[9] กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม (2565). *รายงานการตรวจสอบพฤติกรรมรับน้ำหนักโครงสร้างสะพาน: ก่อนและระหว่างการติดตั้ง Planar Hinge Bearing โครงการบูรณะสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า*. หน้า 32-48.

[10] กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม (2565). *รายงานการตรวจสอบพฤติกรรมรับน้ำหนักโครงสร้างสะพาน: หลังการติดตั้ง Planar Hinge Bearing โครงการบูรณะสะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า*. หน้า 31-43.