

การประเมินโครงสร้างคานบ่าในสะพานกลับรถพระราม 2

Structural Assessment of Beam Ledge in Rama 2 U-Turn Bridge

กษิติศ แสงสุวรรณนุกูล และ กิติเมศวร์ หิรัญเลิศฤทธิ์

Kasidit Saengsuwannagul and Kitimed Hiranlertrith

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10300

Departure of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 10300

บทคัดย่อ

โครงสร้างบริเวณคานบ่า (Beam Ledge) เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญกับโครงสร้างสะพาน เนื่องจากอุบัติเหตุคานสะพานถล่มจากการวิบัติที่ Beam ledge นี้เกิดขึ้นในต่างประเทศแล้ว ดังนั้นหากไม่ได้รับการประเมินความเสียหายเชิงโครงสร้าง อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้งานสะพาน สะพานที่มีอายุการใช้งานมาอย่างยาวนาน จากการศึกษาพบว่าสะพานกลับรถเก่าซึ่งได้รับการออกแบบโดยใช้น้ำหนักบรรทุกที่น้อยกว่าสภาพการจราจรจริงในปัจจุบัน ส่งผลให้เหล็กเสริมในโครงสร้างสะพานดังกล่าวบริเวณ Beam Ledge ไม่เพียงพอต่อการรับแรงในปัจจุบัน โดยสะพานกลับรถพระราม 2 กิโลเมตรที่ 26+470 มีอายุการใช้งานมากกว่า 25 ปี พบว่ามีรอยร้าวแบบเฉือนตรง (Direct Shear Crack) ปรากฏขึ้นที่ Beam Ledge โดยเป็นผลมาจากสภาพการจราจรที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นโครงการนี้ จึงมุ่งเน้นในการวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นส่วน Beam Ledge โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite element method, 3D-FEM) ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของ Beam Ledge การวิบัติและรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้น เพื่อประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: การประเมินสภาพ; โครงสร้างคานบ่า; การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; รอยร้าวแบบเฉือนตรง

Abstract

The beam ledge is an important element of the bridge structure since there was collapse of bridge owing to failure at the beam ledge in other country. Therefore, the assessment of such damage should be performed as they may affect the safety and property of people. Aging bridges designed under live loads following the old standard which is significantly less than that of current traffic loads. As a result, the steel reinforcement in the beam ledge region is insufficient to withstand current loads. Rama 2 U-turn Bridge at 26+470 km has been serving for over 25 years. It is observed that direct shear cracks were found at the beam ledge caused by the increasing traffic conditions. Therefore, in this project, we focus on structural analysis of the beam ledge region using 3D Finite element method (3D-FEM) by 3D-ATENA program under live load according to AASHTO LRFD 2007 standard in order to determine the shear strength and potential failure modes of the beam ledge for predicting future damages.

Keywords: condition assessment; beam ledge; finite element analysis; direct shear crack

1. บทนำ

ถนนพระราม 2 สร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2513 และเริ่มใช้งานปี พ.ศ. 2516 มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประชาชนได้ใช้เดินทางสู่ภาคใต้ โดยภายหลังมีประชาชนมาใช้เป็นจำนวนมากเนื่องจากการขยายช่องจราจรจราจรเพิ่มมากขึ้น และมีการก่อสร้างสะพานกลับรถที่ถนนพระราม 2 เป็นจำนวนมากเพื่ออำนวยความสะดวกในการเดินทาง ในปัจจุบันถนนพระราม 2 ได้กลายเป็นเส้นทางสายหลักที่ใช้ในการเดินทางสู่ภาคใต้ ปัจจุบันพบว่าสะพานกลับรถพระรามที่ 2 กิโลเมตรที่ 26+470 มีอายุการใช้งานมาก โดยเริ่มก่อสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 มีอายุประมาณ 25 ปี โดยโครงสร้างดังกล่าวมีการรองรับน้ำหนักบรรทุกมาอย่างยาวนาน ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพตามกาลเวลา ดังนั้นการตรวจสอบโครงสร้างของสะพานดังกล่าว จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้งานสะพาน

จากการสำรวจภาคสนามพบว่ามียอรร้าวแบบเฉือนตรง (Direct Shear Crack) ปรากฏขึ้นบริเวณรอยต่อแบบครึ่ง (Half Joint) ที่ขึ้นส่วนคานบ่า (Beam Ledge) ของสะพานกลับรถพระราม 2 ซึ่งเป็นส่วนที่วิกฤตมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 คานบ่านี้ได้รับการออกแบบโดยมาตรฐานในอดีต กล่าวคือ ASSHTO standards ทำให้ปริมาณน้ำหนักบรรทุกในการคำนวณไม่เพียงพอในการรองรับน้ำหนักกระทำของรถบรรทุกปัจจุบันที่ออกแบบด้วยมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของคานบ่านี้ไม่เพียงพอ ต่อการต้านทานรอยร้าวที่เกิดขึ้น ดังนั้นการประเมินความสามารถในการรับแรงของ Beam Ledge ภายใต้ความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อช่วยในการเสนอแนะแนวทางการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม

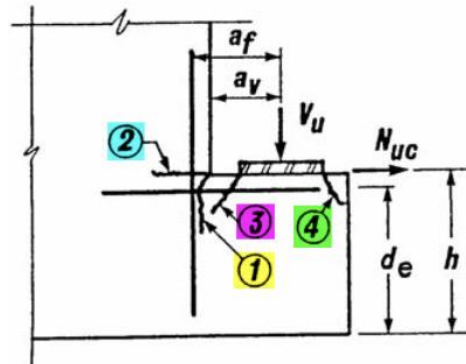
โครงการนี้ จึงมุ่งเน้นในการวิเคราะห์โครงสร้างของขึ้นส่วนคานบ่า (Beam Ledge) บริเวณ Half Joint โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite element method, 3D-FEM) ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA ภายใต้คานน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของ Beam Ledge นอกจากนี้ยังเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงและเสริมกำลังโครงสร้าง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

2. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐานการออกแบบ Beam Ledge

รูปแบบการแตกร้าวตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ของ Beam Ledge แบ่งออกเป็น 4 แบบดังนี้

- การแตกร้าวในระนาบที่ 1 ด้วยแรงดัด (Flexure Force) , แรงเฉือน (shear) และ แรงในแนวราบ (horizontal forces)
- การแตกร้าวในระนาบที่ 2 ด้วยแรงดึง (Tension force) ในชิ้นส่วนรองรับ
- การแตกร้าวในระนาบที่ 3 ด้วยแรงเฉือนทะลุ (Punching shear) ที่ตำแหน่งแรงกระทำ
- การแตกร้าวในระนาบที่ 4 ด้วยแรงแบกทาน (Bearing force)



รูปที่ 1 รูปแบบรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณ Beam Ledge

โดยแบ่งวิธีการออกแบบไว้ตามรูปแบบการรับกำลังของโครงสร้างเป็น 4 วิธี

2.1.1 การออกแบบเพื่อรับแรงเฉือน

การออกแบบกำลังแรงเฉือนในระนาบเป็นไปตามสมการ

$$V_n = cA_{cv} + \mu(A_{vf}f_y + P_c) \quad (2.1)$$

โดยที่ $c = 0$ MPa (สำหรับ Beam Ledge) , $A_{cv} = b_w d$, $\mu = 0.6$, $P_c = 0$, A_{vf} = พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กที่รับแรงเฉือนในพื้นที่ A_{cv} โดยมีค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้หาจากสูตร

$$A_{vf} \geq \frac{0.35A_{cv}}{f_y} \quad (2.2)$$

V_n จากสมการ 2.1 จะต้องมีค่าไม่เกินค่าน้อยของสมการดังต่อไปนี้ (สำหรับคอนกรีตความหนาแน่นทั่วไป)

$$V_n = 0.2f'_c b_w d_e \quad (2.3)$$

$$V_n = 5.5b_w d_e \quad (2.4)$$

ซึ่งความกว้างของหน้าตัดคอนกรีตที่ใช้ต้านทานแรงเฉือน,

$$b_w = \text{Min}[S, W + 4a_v, 2c]$$

2.1.2 การออกแบบเพื่อรับแรงดัดและแรงตามขวาง

พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมรับแรงดัด, A_s เป็นตัวช่วยต้านแทนแรงดัดและแรงตามขวางที่โครงสร้างได้รับ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$A_s \geq \frac{2A_{vf}}{3} + A_n \quad (2.5)$$

การใส่เหล็กปลอกหรือเหล็กผูกให้ใส่เป็นระยะทางเท่ากับ $\frac{2d_e}{3}$ จากเหล็กเสริมหลักโดยสามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก, A_h ได้ดังนี้

$$A_h \geq 0.5(A_s - A_n) \quad (2.6)$$

โดย
$$A_n \geq \frac{N_{uc}}{\phi f_y} \quad (2.7)$$

โดยที่ d_e คือ ระยะจากใต้ Beam Ledge ถึงกลางหน้าตัดเหล็กเสริม, A_s (mm), A_{vf} คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (mm^2) และ เหล็กเสริมรับแรงดัดจะต้องเว้นระยะห่างสม่ำเสมอภายใต้ระยะ $(W+5a)$ หรือ $2c$

2.1.3 การออกแบบเพื่อรับแรงเฉือนทะลุ (Punching Shear)

แรงต้านทานแรงเฉือนทะลุระบุ, V_n ในหน่วยนิวตัน จะถือเป็น

- ที่แผ่นรองด้านใน, หรือแผ่นรองด้านนอกที่ระยะปลาย c มีค่ามากกว่า ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างแผ่นรองตาม Beam Ledge $S/2$:

$$V_n = 0.328\sqrt{f'_c}(W + 2L + 2d_e)d_e \quad (2.8)$$

- ที่แผ่นรองด้านนอกที่ระยะปลาย c มีค่าน้อยกว่า ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างแผ่นรองตาม Beam Ledge $S/2$ และ $c-0.5W$ มีค่าน้อยกว่า ค่าความลึกประสิทธิภาพ d_e :

$$V_n = 0.328\sqrt{f'_c}(W + L + d_e)d_e \quad (2.9)$$

- ที่แผ่นรองด้านนอกที่ระยะปลาย c มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างแผ่นรองตาม Beam Ledge $S/2$ แต่ $c-0.5W$ มีค่ามากกว่า ค่าความลึกประสิทธิภาพ d_e :

$$V_n = 0.328\sqrt{f'_c}(0.5W + L + d_e + C)d_e \quad (2.10)$$

โดยที่ f'_c คือ ค่ากำลังรับแรงอัดจำเพาะของคอนกรีตที่ 28 วัน (MPa), W คือ ความกว้างของแผ่นรอง, L คือ ความยาวของแผ่นรอง (mm), d_e คือ ระยะจากใต้ Beam Ledge ถึงกลางหน้าตัดเหล็กเสริม, A_s (mm)

2.1.4 การออกแบบสำหรับ Hanger Reinforcement

ต้องจัดให้มี Hanger Reinforcement ที่ระบุในที่นี้ นอกเหนือจากการเสริมแรงแบบเฉือนที่น้อยกว่าที่จำเป็นสำหรับด้านใดด้านหนึ่งของแรงปฏิกิริยาของคานที่รองรับ แรงต้านทานแรงเฉือนระบุ, V_n ในหน่วยนิวตัน สำหรับ Single-Beam Ledge จะถือเป็น

- สำหรับสภาวะจำกัดความสามารถในการให้บริการ:

$$V_n = \frac{A_{hr}(0.5f_y)}{s}(W + 3a_v) \quad (2.11)$$

- สำหรับสภาวะขีดจำกัดด้านกำลัง:

$$V_n = \frac{A_{hr}f_y}{s}S \quad (2.12)$$

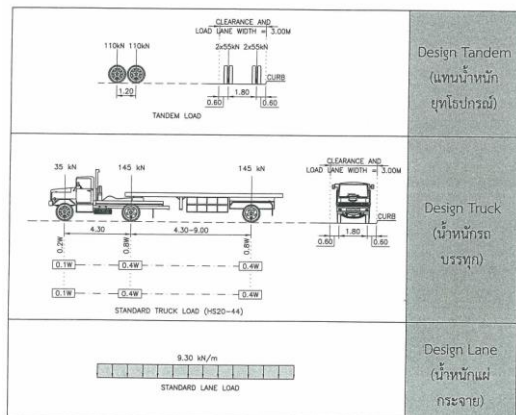
โดยที่ A_{hr} คือ พื้นที่ของ Hanger Reinforcement 1 ขา, S คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นรอง (mm), s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็ก Hanger แต่ละเส้น (mm), f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริม (MPa), a_v คือ ระยะห่างจากหน้าของกำแพงจนถึงแนวแรง (mm)

2.2 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบสะพาน

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ถูกบัญญัติขึ้นในปี ค.ศ.1993 จึงเป็นที่มาของน้ำหนัก HL-93 (Highway Load 1993) ทั้งนี้ได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kulicki and Metz (1991) ซึ่งทำการเปรียบเทียบรถบรรทุกที่ใช้วิ่งปัจจุบันกับน้ำหนักรถ HS-20-44 กระทั่งได้ข้อสรุปที่สามารถปรับปรุงน้ำหนักรถใหม่ ประกอบด้วยน้ำหนัก 3 ชนิดดังนี้

- Design Tandem ประกอบด้วยแรง 110 kN 2 แรง วางเรียงห่างกัน 1.20 เมตร มีระยะห่างของล้อตามขวาง 1.80 เมตร เป็นน้ำหนักสมมติแทนน้ำหนักยานพาหนะเพื่อจำลองพฤติกรรมทางทหาร
- Design Truck ประกอบด้วยแรง 35, 145, 145 kN ระยะห่างระหว่างล้อตามยาวแสดงใน รูปที่ 2 ระยะห่างระหว่างล้อหลังให้ใช้ค่าระหว่าง 4.30-9.00 เมตร โดยจัดวางตำแหน่งล้อรถให้เกิดหน่วยแรงบนสะพานสูงสุด และระยะห่างของล้อในแนวขวางกับสะพานเท่ากับ 1.80 เมตร
- Design Lane Load ประกอบด้วยน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอ ขนาด 9.30 kN/m กว้าง 3.00 เมตร โดยปราศจากน้ำหนักแบบจุด (Concentrated Load)

AASHTO LRFD กำหนดให้น้ำหนักแผ่กระจาย, Lane Load กระทำร่วมกับ Design Truck หรือ Design Tandem อย่างไม่อย่างหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดหน่วยแรงบนโครงสร้างสูงที่สุด



รูปที่ 2 น้ำหนักรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

แรงกระแทก (Dynamic Load Allowance, IM) แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจรขณะเคลื่อนที่ผ่านบนพื้นสะพาน ดังนั้นแรงกระแทก คือ สัดส่วนความแตกต่างระหว่างน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงบนสะพานขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ต่อ น้ำหนักของยานพาหนะที่จอดหยุดนิ่ง

Component	IM
Deck Joints—All Limit States	75%
All Other Components	
• Fatigue and Fracture Limit State	15%
• All Other Limit States	33%

ตารางที่ 1 แรงกระแทก (Dynamic Load Allowance, IM)

3.ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ศึกษาแบบ Beam Ledge ของสะพานสะพานกลับริดพระราม 2

ในโครงการนี้ มุ่งเน้นการศึกษาแบบรูปรายการประกอบแบบของ Beam Ledge ของสะพานกลับริดพระราม 2 และรายละเอียดอื่นเพิ่มเติมเพื่อการตรวจสอบโครงสร้าง โดยทำการศึกษาแบบก่อสร้างจริงของสะพานเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับปริมาณหน้าตัดของเหล็กเสริมที่มีอยู่ตามแบบ ($A_s, existing$) กับปริมาณหน้าตัดของเหล็กที่พึงมีตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ($A_s, required$) จากการคำนวณมือได้ดังตารางที่ 2

รูปแบบการรับแรง	$A_s, existing$ (mm ²)	$A_s, required$ (mm ²)	Ratio
รับแรงเฉือน (ตัวใน)	1206	3455.6	0.35
รับแรงเฉือน (ตัวนอก)	1206	2772	0.44
รับแรงดัดและแรงตามขวาง (ตัวใน)	4419	887.3	4.98
รับแรงดัดและแรงตามขวาง (ตัวนอก)	1473	887.3	1.66
Hanger Reinforcement (Service Limit State)	2946	813.1	3.62
Hanger Reinforcement (Strength Limit State)	2946	230.4	12.79

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณเหล็กเสริมที่มีในแบบเทียบกับปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007

จึงสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบ Beam Ledge ด้วยมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 นั้นมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่น้อยกว่าค่าที่พึงมีส่วนเหล็กเสริมอื่น ๆ นั้นเพียงพอต่อการรับแรง ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงมุ่งเน้นที่จะหาแนวทางการปรับปรุงแก้ไข และหาแนวทางเสริมกำลังของโครงสร้างต่อไป

3.2 การสำรวจโครงสร้างของสะพานกลับริดพระราม 2 และวิเคราะห์วิธีชำรุดของผู้ใช้งานสะพาน

การสำรวจภาคสนามเพื่อวิเคราะห์รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของสะพานกลับริดพระราม 2 พบรอยแตกร้าวบริเวณ Beam Ledge ที่ต่อมอดตัวที่ 10 (ระบุตามแบบก่อสร้างจริง) ดังรูป



รูปที่ 3 รูปด้านขวาของ Beam Ledge

จะเห็นได้ว่าเกิดรอยแตกร้าวที่ด้านเดียวของ Beam Ledge โดยเป็นรอยแตกในรูปแบบของ Direct Shear Crack โดยเป็นรอยแตกตรงลงมาบริเวณคานที่ยื่นออกไปรองรับ Girder ซึ่งสัมพันธ์กับการคำนวณที่แสดงให้เห็นว่าเหล็กรับแรงเฉือนมีไม่มากเพียงพอแต่การเกิดรอยร้าวเพียงด้าน

เดียนั้นอาจเป็นผลมาจากรูปแบบการขับขี่ส่วนใหญ่ของผู้ใช้สะพานกลับรถพระราม 2 จึงได้สำรวจข้อมูลการขับขี่เพิ่มเติมได้ผลการสำรวจดังนี้

- การสังเกตวิธีการขับขี่รถของผู้ใช้สะพานพบว่าผู้ขับขี่ส่วนใหญ่มีมักขับชิดไปทางขวาของเลน หรือ ขับกลางสะพานก่อนที่จะเปลี่ยนตำแหน่งไปชิดขวาเพื่อกลับรถใกล้กับจุดที่เกิดรอยร้าว
- การวิเคราะห์รูปแบบของสะพานพบว่าบริเวณที่เราสนใจเป็นตำแหน่งก่อนจุดกลับรถฝั่งขาขึ้นของสะพานกลับรถพระราม 2

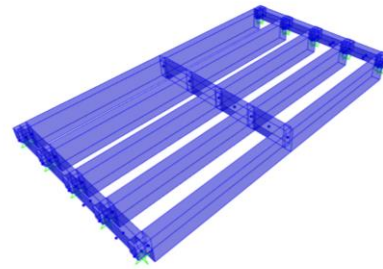


รูปที่ 4 การวิ่งของรถเอียงไปทางด้านขวาของเลน

จากข้อมูลการสำรวจแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการขับขี่ของผู้ใช้งานส่วนใหญ่นิยมขับขี่ชิดไปทางขวาเพื่อทำการกลับรถส่งผลให้การกระจายแรงในแต่ละ Bearing Pad มีค่าต่างกันออกไปโดยในตำแหน่งทางด้านขวาควรจะได้รับแรงมากที่สุด ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นเพียงฝั่งเดียนั้นเอง

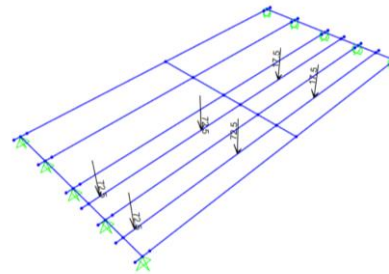
3.3 วิเคราะห์แรงเฉือนที่แต่ละ Bearing Pad ด้วยโปรแกรม SAP2000

การคำนวณแรงด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้ในการออกแบบมีค่าที่มากกว่าความเป็นจริง และจากการตรวจสอบพบว่าตัว Beam Ledge มีความสามารถในการรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ เราจึงต้องการหาค่าแรงที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดโดยได้โมเดลโครงสร้างสะพานให้ใกล้เคียงตามความจริงด้วยโปรแกรม SAP2000 ดังรูป



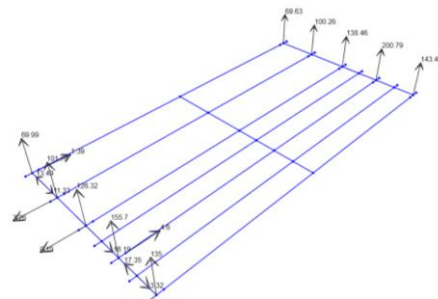
รูปที่ 5 โมเดลโครงสร้างสะพาน

จากนั้นทำการใส่ Moving Load ของรถบรรทุกตามมาตรฐาน ASSTHO LRFD 2007 ให้รถบรรทุกวิ่งคร่อม Girder ตัวที่ 4 จากทางด้านซ้ายเพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบการวิ่งของรถที่ได้จากการสำรวจดังรูป



รูปที่ 6 การใส่ Moving Load ใน model

โดยค่าแรงที่เราสนใจนำมาใช้วิเคราะห์คือค่าแรงสูงสุดที่ Bearing Pad ด้านขวาบนซึ่งเป็นตำแหน่งรอยร้าวที่เราสนใจ โดยคำนึงถึงแรงกระแทก (Impact Load , IM) มีค่า=33% ของน้ำหนักบรรทุกจร ทำให้อ่านน้ำหนักบรรทุกรวม เป็น 1 เท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ รวมกับ 1.33 เท่าของน้ำหนักบรรทุกจร (DL+1.33LL) และโดยค่าสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีรถวิ่งไปถึงด้านบนที่เหนือ Bearing Pad พอดีและได้ค่าแรงออกมาดังรูป



รูปที่ 7 ค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Bearing Pad ด้านขวาบน

จากนั้นนำค่าแรงที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 รวมกับค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ของแผ่นพื้นสะพานโดยมีค่าเท่ากับ 60.5 kN เพื่อให้ได้ค่าแรงที่กระทำลงแต่ละ Bearing Pad ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยต้องแปลงค่าแรงเป็น Load Pressure ก่อนนำผลไปใช้วิเคราะห์ให้ค่าดังแสดง

Location	unit	Bearing				
		1	2	3	4	5
Between girder 4	Load (kN)	69.63	100.26	138.46	200.79	143.49
(+IM=33%)	Add	60.5	60.5	60.5	60.5	60.5
	Sum	130.13	160.76	198.96	261.29	203.99
	P (MPa)	2.17	2.68	3.32	4.35	3.40

ตารางที่ 3-3 แสดงแรงที่กระทำในแต่ละ Bearing Pad

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปใช้คำนวณและวิเคราะห์โครงสร้างต่อในโปรแกรม 3D ATENA

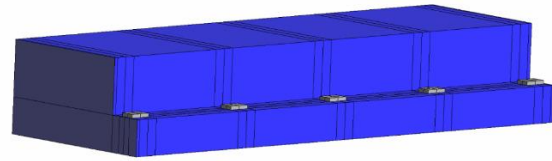
4.ข้อกำหนดและเงื่อนไขในโปรแกรม 3D-ATENA

4.1 ข้อกำหนดและรายละเอียดการตั้งค่าแบบจำลอง

- ค่าคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties)
 - คอนกรีตจะต้องรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 300 กก. / ซม.²
 - ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่น้อยกว่า 350 กก./ ม.³
 - เหล็กเสริมที่ใช้มีค่า Young's Modulus 200 GPa, Yield Strength 300 MPa และ Ultimate Strength 500 MPa
- Boundary Condition
 - Constraint for Surface เป็นการกำหนด Support ให้กับโมเดลบริเวณด้านหลังของโมเดลโดยจำกัดการเคลื่อนที่ทั้งแนวแกน X, Y และ Z
 - Monitor for Point เป็นการกำหนดจุดเพื่อสังเกตแรงตอบสนองของโมเดลในช่วงเวลาต่างๆ ที่ถูกแรงกระทำ บริเวณด้านใต้ที่กึ่งกลางของ Beam Ledge

4.2 โมเดล Beam Ledge ในแต่ละกรณี

การสร้างโมเดล Beam Ledge จะทำเพียงครั้งเดียวเพื่อพิจารณาด้านที่สนใจ โดยประกอบด้วย คอนกรีต เหล็กเสริม และ Bearing Pad โดยจะเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไปตามแต่ละกรณีดังต่อไปนี้



รูปที่ 8 Model Beam Ledge

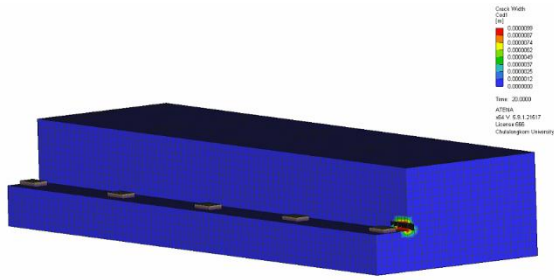
- กรณีที่ 1 ใส่เหล็กเสริมตามแบบก่อสร้างจริง (Actual Case) มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนบริเวณใต้ Bearing pad เป็นตำแหน่งละ 6 เส้น ตามแบบ
- กรณีที่ 2 เพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเพียงจุดรองรับตัวในให้พอดีต่อการรับแรงเฉือน (Interior Case)
 - เพิ่มปริมาณเหล็กเสริมบริเวณใต้ Bearing Pad ตัวใน เป็นตำแหน่งละ 18 เส้น และบริเวณใต้ Bearing Pad ตัวนอก มีปริมาณเหล็กคงเดิม
- กรณีที่ 3 เพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเพียงจุดรองรับตัวนอกให้พอดีต่อการรับแรงเฉือน (Exterior Case)
 - เพิ่มปริมาณเหล็กเสริมบริเวณใต้ Bearing Pad ตัวนอกเป็นตำแหน่งละ 14 เส้น และบริเวณใต้ Bearing Pad ตัวในมีปริมาณเหล็กคงเดิม
- กรณีที่ 4 เพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งหมดให้พอดีต่อการรับแรงเฉือน (All Case)
 - เพิ่มปริมาณเหล็กเสริมบริเวณใต้ Bearing Pad ตัวนอกเป็นตำแหน่งละ 14 เส้นและบริเวณใต้ Bearing Pad ตัวในเป็นตำแหน่งละ 18 เส้น

5. ผลการวิเคราะห์ Beam Ledge ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA

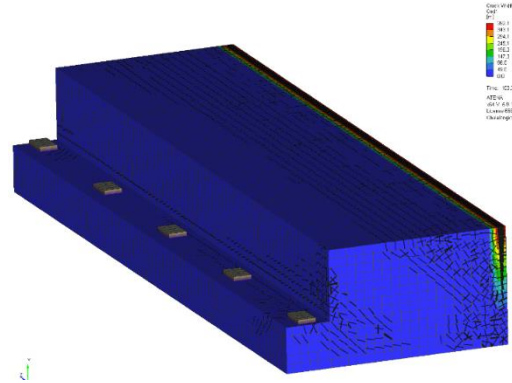
5.1 ผลการวิเคราะห์ Beam Ledge ที่ Service Load

ผลการวิเคราะห์ Beam Ledge ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA ในทุกกรณี พบว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้นที่ฝั่งเดียวของโครงสร้างที่ตำแหน่งใกล้กับ Bearing Pad ตัวที่ 5 เหมือนกัน เนื่องจาก แรงที่กระทำกับโครงสร้างมีค่าน้อยทำให้ยากที่จะมองเห็นความแตกต่างกัน เช่นในเรื่องของ ขนาดของรอยร้าว รูปแบบการวางตัวของรอยร้าว เป็นต้น แต่จากผลวิเคราะห์ทำให้เราเห็นว่าน้ำหนักจริงที่กระทำกับสะพานนั้นเริ่มทำให้มีรอยร้าวเกิดขึ้นโดยเป็นรอยร้าวในรูปแบบของ Flexural Failure ทำให้การเสริม

เหล็กรับแรงเฉือนในรูปแบบต่างๆไม่ได้ช่วยลดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในช่วงแรกลงไป จึงทำให้ผลในแต่ละกรณีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 9 รอยร้าวของ Beam Ledge ที่ Service Load



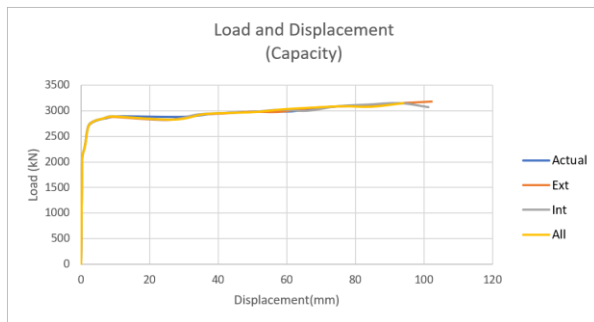
รูปที่ 10 รอยร้าวของ Beam Ledge ที่ Load Capacity (Actual Case)

5.2 ผลการวิเคราะห์ Beam Ledge ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA ที่ Load Capacity

จากการวิเคราะห์ Beam Ledge ด้วยโปรแกรม 3D-ATENA โดยใช้วิธีแบบ Load Control จนถึง Capacity ของโครงสร้างจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างออกมาเป็นดังนี้

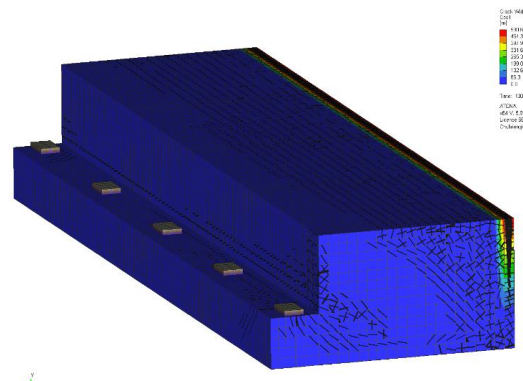
- Load Capacity

แต่ละกรณีสามารถหาค่า Load Capacity ออกมาได้ดังนี้ Actual Case = 3,163 kN , Interior Case = 3,067 kN , Exterior Case = 3,182 kN และ All Case = 3,149 kN โดยแสดงรวมแต่ละกรณีเพื่อเปรียบเทียบกันได้ดังนี้

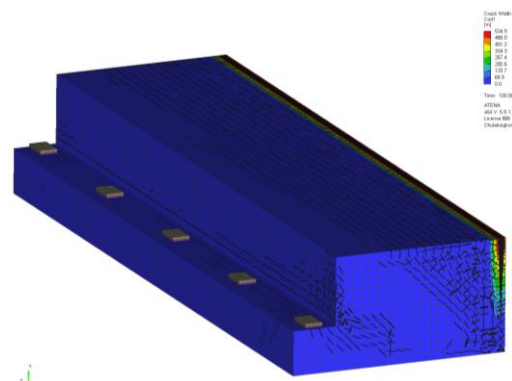


กราฟที่ 1 Load and Displacement รวมทุกกรณี

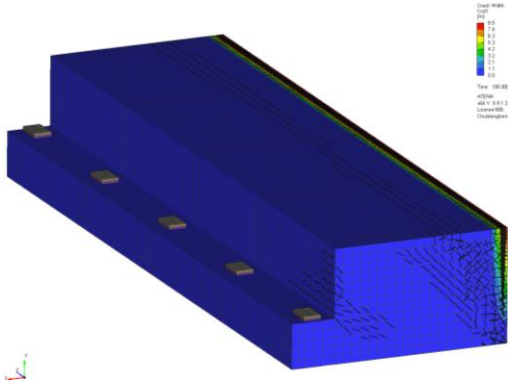
การให้แรงจนถึง Capacity ทำให้รอยแตกร้าวที่เยอะขึ้นจึงแสดงเพียงรอยแตกร้าวที่มีขนาดมากกว่า 0.5 mm เพื่อให้เห็นรูปแบบการวางตัวของรอยร้าวที่ต่างกันไปในแต่ละกรณี ดังรูป



รูปที่ 11 รอยร้าวของ Beam Ledge ที่ Load Capacity (Interior Case)



รูปที่ 12 รอยร้าวของ Beam Ledge ที่ Load Capacity (Exterior Case)



รูปที่ 13 รอยร้าวของ Beam Ledge ที่ Load Capacity (All Case)

จากผลการวิเคราะห์ รอยแตกร้าว , Principal Stress และ Principal Stress ทำให้ทราบว่าจุดที่มีการแตกร้าวมากที่สุดเป็นบริเวณด้านขวาของ Beam Ledge ตามความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง แต่รูปแบบของรอยแตกร้าวนี้ไม่เป็นแบบ Direct Shear Crack ตามที่ตั้งสมมติฐานเอาไว้ นอกจากนั้นยังทำให้เห็นพฤติกรรมการถ่ายแรงของโครงสร้าง และสามารถทำนายรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นเพิ่มเติมในอนาคตได้ โดยค่า Capacity นั้นมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ที่สุด support ทำให้โครงสร้างพัง

6. สรุปผลการวิจัย

สะพานกลับรถพระราม 2 มีโครงสร้างที่ได้รับความเสียหายทำให้เกิดรอยร้าวขึ้น จึงมีการตรวจสอบกำลังที่รับได้เพื่อป้องกันการแตกร้าวตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 โดยพิจารณาจากขนาดของ Beam Ledge และเหล็กเสริมที่มีอยู่ตามแบบก่อสร้างจริง พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนตรงนั้นมีไม่เพียงพอซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐานว่ารอยร้าวแนวตรงบริเวณคานที่ยื่นออกไปรองรับ Girder เป็นแบบ Direct Shear Crack ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลโครงสร้างด้วยโปรแกรม 3D-ATENA โดยวิธี Load Control ซึ่งใส่ค่าแรงตามรูปแบบการขับซึ่งจริงของผู้ใช้ทาง ด้วยการหาแรงจากโปรแกรม SAP2000 ให้รั่วิ่งเยื้องไปทางด้านขวา โดยสรุปผลออกมาตามการใส่แรงให้โครงสร้างในกรณีต่างๆให้ข้อสรุปออกมาดังนี้

- การใส่แรงจริง (Service Load)

การเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเข้าไปในโครงสร้างไม่ส่งผลให้รอยแตกร้าวมีขนาดเล็กลง เนื่องจากแรงที่กระทำกับโครงสร้างนั้นมีค่าน้อยทำให้เกิดเพียง Initial Crack ในรูปแบบของ Flexural Failure เหล็ก

เสริมรับแรงเฉือนจึงไม่ช่วยรับแรงในส่วนนี้ทำให้ค่าของรอยร้าวไม่มีรูปแบบและขนาดของรอยร้าวที่คงที่ไม่ต่างจากกัน จึงสรุปได้ว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากแรงที่มีค่ามากกว่า Service Load มากระทำกับโครงสร้าง

- การใส่แรงจนโครงสร้างวิบัติ (Load Capacity)

การใส่แรงจนโครงสร้างวิบัติทำให้ทราบ Capacity ของโครงสร้าง โดยแต่ละกรณีให้ค่าที่ใกล้เคียงกันประมาณ 3,100 kN ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เป็นผลมาจากการกำหนดจุด support ทำให้เกิดการพังของโครงสร้างที่บริเวณจุด support ก่อน แต่หากพิจารณาในจุดของรอยร้าวบริเวณด้านขวาของ Beam Ledge นั้นในการเพิ่มเหล็กจะส่งผลให้รูปแบบการวางตัวของรอยร้าวต่างกันออกไปแสดงให้เห็นว่าการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนไปในโครงสร้างมีผลต่อรูปแบบการวางตัวของรอยร้าวส่งผลให้การกระจายแรงเข้าโครงสร้างในแต่ละกรณีมีรูปแบบที่ต่างออกไปด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์และคาดการณ์รูปแบบรอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตแสดงให้เห็นว่า Crack ที่เกิดขึ้นมานั้นเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดที่สนใจแต่มีรูปแบบการวางตัวไม่ตรงกับ Direct Shear Crack เพราะผลของ Combine Effect อื่นๆ เช่น Corrosion หรือ Carbonation ที่จะส่งผลทำให้คุณสมบัติในการรับกำลังของเหล็กเสริมและคอนกรีตนั้นมีค่าลดต่ำลง

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 พบว่า Beam Ledge สามารถเกิดความเสียหายได้หากได้รับแรงกระทำที่มากกว่าปกติอันเนื่องมาจากการใช้งานของผู้ขับขี่และปริมาณรถที่มากกว่ากรณี Service Load ดังนั้นควรมีการตรวจสอบกำลังของโครงสร้างเพิ่มเติม โดยคำนึงถึงผลกระทบจาก Corrosion และ Carbonation เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ตรงตามความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้หากมีการก่อสร้างที่อิงแบบก่อสร้างเดิมควรมีการเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเข้าไปด้วยเพื่อลดรอยแตกร้าวลงและให้ค่ากำลังเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและช่วยเหลือในการทำวิจัยนี้ โดยเฉพาะฝ่ายที่เกี่ยวข้องที่ช่วยให้งานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่นและเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธีรรัตน์ วิสุทธ์เสวีวงศ์ ผู้ที่เป็นที่ปรึกษาและให้คำแนะนำในการจัดทำวิจัยวิศวกรรม และให้การช่วยเหลือเป็นอย่างมาก รวมถึงเทคโนโลยีและ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างข้อมูลวิจัย เพื่อให้งานวิจัยมีคุณภาพและน่าเชื่อถือ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในความเอื้อเฟื้อเพื่ออุปกรณ์ตลอดจนเป็นสถานที่ในการศึกษาปฏิบัติการปริญญานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เกิดข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ทางคณะผู้จัดทำ ใคร่ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย และหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้อ่านและผู้สนใจศึกษาปริญญานิพนธ์นี้ต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

[1] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units 4th Edition 2007

[2] Mitchell, D., Marchand, J., Croteau, P., & Cook, W. D. (2011). Concorde overpass collapse: structural aspects. *Journal of performance of constructed facilities*, 25(6), 545-553.

[3] Jirawattanasomkul, T., Kongwang, N., Likitlersuang, S., Yodsudjai, W., Charuvisit, S., & Sato, Y. (2021). Failure analysis of dapped-end cracking in posttensioned bridge girder. *Journal of Bridge Engineering*, 26(11), 04021082.

[4] การออกแบบสะพาน. ทศพล ปิ่นแก้ว และ มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา 521 หน้า