การวิเคราะห์คานคอนกรีตอัดแรงในสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีด้วยแบบจำลอง FEM โดยโปรแกรม ATENA

Analysis of Prestressed Concrete Girders in Chanthaburi River Bridge using Finite Element Method by ATENA program

ณิชารินทร์ นิธิเมธาพร[1], เกียรติศักดิ์ สุรสิห์ไกรสร[2] , เจตญา ศิลาบุญศักดิ์[3], ปัญญาวุธ จิรดิลก[4,*] , ธิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล[5] และ กวิน สายประเสริฐกิจ[6]

[1,2,3,4]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

[5]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

[6]วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ กรมทางหลวงชนบท

Corresponding author; E-mail address: punyawut.j@ku.th

บทคัดย่อ

สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีเป็นสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลัง โดยสะพานแห่งนี้ตั้งอยู่ใกล้กับบริเวณปากแม่น้ำที่เชื่อมต่อกับทะเลจึงมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม รวมทั้งยังมีการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงที่ส่งผลให้โครงสร้างสะพานเกิดการโก่งตัวและรอยแตกร้าว บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพโครงสร้างคานสะพานส่วนบน โดยการศึกษาพฤติกรรมและทำนายรูปแบบการวิบัติของโครงสร้างสะพาน โดยใช้แบบจำลอง 2 มิติ ด้วยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น โดยโปรแกรม ATENA 2D และใช้ข้อกำหนดต่างๆโดยอ้างอิงจาก AASHTO LRFD-2007 จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองนี้พบว่าอิทธิพลของการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงมีผลมากกว่าอิทธิพลจากการกัดกร่อนของปฏิกิริยาคลอโรซั่น (ปฏิกิริยาการเกิดสนิม) นอกจากนี้สะพานยังมีค่าการรับน้ำหนักที่มากกว่ามาตรฐาน AASHTO ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคานมีการเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสะพานยังสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ดีจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้าง รวมถึงปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงสร้าง เพื่อยืดอายุการใช้งานในอนาคต

คำสำคัญ: การประเมินสภาพโครงสร้าง, สะพานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลัง, โครงสร้างสะพานส่วนบน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Abstract

The bridge over the Chanthaburi River is a pre-stressed concrete bridge. As the bridge is located near the river mouth connected to the sea, it has a high tendency to lose its reinforcing bar. Furthermore, due to the prestress losses in post-tensioned bridge girders, it can induce excessive deflections and crack in PC bridge girders. This article aims to assess the condition of the bridge's superstructure by analyzing the behavior and predicting the structural failure patterns of the bridge by using the 2D Non-linear Finite Element Method (FEM), ATENA 2D software. The model was evaluated based on AASHTO LRFD-2007 standards. From the analytical results, the influence of prestress losses was greater than the influence of corrosion. In addition, the bridge has a higher load capacity than AASHTO standard which meant that the bridge's girders had slightly deterioration. Therefore, the bridge will be able to support the load capacity. However, maintenance is required to strengthen and prevent structural corrosion, improve the structural efficiency, and prolong service life in the future.

Keyword: Structural assessment, Post-tensioned Concrete girder, Bridge's superstructure, Non-linear finite element method

1. คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้จัดตั้งโครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการลงทุนของภาคเอกชนทำให้การพัฒนาและยกระดับมาตรฐานระบบการบริหารจัดการโลจิสติกสในพื้นที่ EEC นั้น ควรเพิ่มการพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกและศูนย์บริการโลจิสติกส ซึ่งแน่นอนว่าผลกระทบดานการคมนาคมของโครงการ EEC จะทำให้จำนวนผู้สัญจรบนทองถนนตองเพิ่มขึ้นอยางมาก

จากปริมาณยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างพื้นฐานจะต้องทำการปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาพการณในอนาคตเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของการคมนาคม อีกทั้งในปจจุบันยังมีโครงสร้างสะพานที่สำคัญและความเสียหายอีกจำนวนมากซึ่งจำเปนต้องมีการซอมแซมเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใชงานตอไป

จากตำแหนงที่ตั้งของสะพานข้ามแมน้ำจันทบุรีมีแนวโน้มที่จะประสบปญหาเกี่ยวกับการสูญเสียเนื้อโลหะจากการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล่อม เนื่องจากที่ตั้งของสะพานใกลกับจุดออกของแมน้ำจันทบุรีซึ่ง

เชื่อมกับทะเลฝั่งอาวไทย จึงมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะจากการกัดกร่อนของคลอไรด์

บทความวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการประเมินโครงสร้างสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีขณะรับน้ำหนักบรรทุกจร โดยพิจารณาพฤติกรรมการวิบัติโครงสร้างคานสวนบน (Girder) ช่วงที่เป็นคานหลัก ระยะ 30 เมตร เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่อยู่กึ่งกลางน้ำจึงมีโอกาสสัมผัสกับแรธาตุคลอไรดได้โดยตรงและมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาการการสูญเสียเนื้อโลหะจากการกัดกร่อนของคลอไรด์กับสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้งานในระยะยาว รวมถึงทำการศึกษาการเสื่อมกำลังของลวดอัดแรงเมื่อเวลาผ่านไป อันเป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษารูปแบบการวิบัติและรูปแบบของรอยร้าวที่โครงสร้างคานส่วนบน ระยะ 30 เมตร

2.2 เพื่อจำลองและทำนายพฤติกรรมการวิบัติของคาน ขณะรับน้ำหนักบรรทุกจรโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน AASHTO LRFD [1] ด้วยการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น 2 มิติ โดยโปรแกรม ATENA 2D

2.3 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานที่ได้รับผลกระทบจากการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงและปฏิกิริยาคลอโรชั่นโดยคำนึงถึงการลดลงของพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

3. ขอบเขตงานวิจัย

การประเมินสภาพโครงสร้างส่วนบนของสะพาน โดยเจาะจงไปยังโครงสร้างสะพานส่วนของคานตามยาว โดยพิจารณาส่วนที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลัง ที่กึ่งกลางสะพาน ระยะ 30 เมตร

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 การทำนายพฤติกรรมโครงสร้างสะพานโดยโปรแกรม ATENA 2D

โปรแกรม ATENA 2D เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างขณะรับแรงกระทำ เช่น หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างในระยะโก่งตัว เป็นต้น การใช้งานโปรแกรม ATENA 2D นั้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานสำหรับวิเคราะห์ (Pre-processing) และการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้าง (Post-processing)

4.2 การเสื่อมลดของแรงดึงในลวดอัดแรง

ในการอัดแรงมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งมีการสูญเสียทั้งแบบเกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรง (immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา (long-term loss) โดยอ้างอิงสูตรในการคำนวณจากมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\Delta f_T = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} \quad (1)$$

Δf_T คือผลรวมการสูญเสียแรงดึงในลวดอัดแรง (เมกะปาสคาล), Δf_{pF} คือการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด (เมกะปาสคาล), Δf_{pA} คือการสูญเสียแรงดึงที่สมอยึด (เมกะปาสคาล), Δf_{pES} คือการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น (เมกะปาสคาล) และ Δf_{pLT} คือการสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา (เมกะปาสคาล)

4.2.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด (friction loss)

เกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลังเท่านั้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานระหว่างเหล็กอัดแรงและท่อ ทำให้แรงดึงในเหล็กค่อยๆ ลดลงตามระยะที่ห่างจากปลายเหล็กเสริมด้านที่ถูกดึง

$$\Delta f_{pF} = f_{pj}(1 - e^{-(kx+\mu\alpha)})$$

Δf_{pF} คือการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด (เมกะปาสคาล), f_{pj} คือความเครียดที่เกิดจากการดึงลวดอัดแรงด้วยแจ็ค (เมกะปาสคาล), k คือค่า wobble coefficient, x คือระยะในแนวราบจากสมอยึดถึงตำแหน่งที่พิจารณา (มิลลิเมตร), μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient), α คือผลรวมของการเปลี่ยนมุมของลวดอัดแรงจากสมอยึดจนถึงค่าตำแหน่งที่พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ (เรเดียน)

4.2.2 การสูญเสียแรงดึงที่สมอยึด (anchorage loss)

การสูญเสียการอัดแรงที่สมอยึดในบริเวณใกล้ๆปลายสมอยึด

$$\Delta f_{pA} = E_p \frac{\Delta_{set}}{L_p}$$

Δf_{pA} คือการสูญเสียแรงดึงที่สมอยึด (เมกะปาสคาล), E_p คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง (เมกะปาสคาล), Δ_{set} คือค่าการเลื่อนหลุดของอุปกรณ์ยึด (มิลลิเมตร), L_p คือความยาวของลวดอัดแรง (มิลลิเมตร)

4.2.3 การสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น (elastic shortening)

การสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น ซึ่งขึ้นอยู่กับลำดับการดึงลวด

$$\Delta f_{ES} = \frac{N-1}{2N}\frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp}$$

Δf_{pES} คือการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น (เมกะปาสคาล), N คือจำนวนเส้นลวดอัดแรง, E_p คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง (เมกะปาสคาล), E_{ci} คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล),

f_{cgp} คือผลรวมความเครียดของคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของลวดอัดแรง เนื่องจากแรงอัดหลังการดึงด้วยแจ็คและน้ำหนักของตัวเองบริเวณที่เกิดโมเมนต์สูงสุด (เมกะปาสคาล)

4.2.4 การสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา (long-term loss)

การสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา เป็นผลต่างระหว่างแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรงแล้วกับแรงดึงประสิทธิผล ซึ่งการสูญเสียที่นำมาพิจารณาได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต (creep loss), การสูญเสียเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss) และการสูญเสียเนื่องจากการล้าตัวของลวดอัดแรง (relaxation loss)

$$\Delta f_{pLT} = \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} + \Delta f_{pR}$$

$$= 10\frac{f_{pi}A_{ps}}{A_g}\gamma_h\gamma_{st} + 83\gamma_h\gamma_{st} + \Delta f_{pR}$$

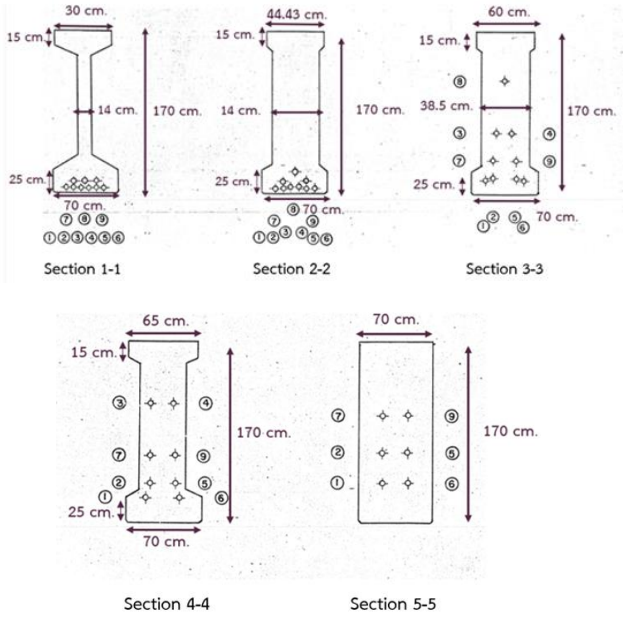
$$\gamma_h = 1.7 - 0.001H\,,\quad \gamma_{st} = \frac{35}{(7+f'_{ci})}$$

Δf_{pLT} คือการสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา (เมกะปาสคาล), Δf_{pCR} คือการสูญเสียเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต (creep loss) (เมกะปาสคาล), Δf_{pSH} คือการสูญเสียเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss) (เมกะปาสคาล), Δf_{pR} คือการสูญเสียเนื่องจากการล้าตัวของลวดอัดแรง (relaxation loss) (เมกะปาสคาล), f_{pi} คือความเครียดในลวดอัดแรงที่แม่แรง (เมกะปาสคาล), A_{ps} คือพื้นที่ของลวดอัดแรง (ตารางมิลลิเมตร), A_g คือพื้นที่หน้าตัดรวม (ตารางมิลลิเมตร), γ_h คือตัวประกอบการปรับแก้สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม, H คือค่าความชื้นสัมพัทธ์, γ_{st} คือตัวประกอบการปรับแก้สำหรับคอนกรีตแข็งแรงพิเศษในช่วงเวลาของการอัดแรงในคอนกรีต, f'_{ci} คือความเครียดของกำลังอัดคอนกรีต ณ วันที่อัดแรง (เมกะปาสคาล)

5. วิธีดำเนินงานวิจัย

5.1 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรง

สะพานแห่งนี้ประกอบด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete, RC) ซึ่งมีช่วงความยาวสะพานเท่ากับ 15 เมตร และโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Concrete, PC) โดยที่ในบทความวิจัยนี้มุ่งเน้นวิเคราะห์ไปที่คานคอนกรีตอัดแรงช่วงความยาว 30 เมตร มีหน้าตัดรูปตัวไอ และความลึก 1.7 เมตร ออกแบบตามมาตรฐาน AASSHTO LRFD โดยคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปตัวไอมีสัดส่วนของหน้าตัดที่เปลี่ยนไปเรื่อยๆตามความยาวที่เปลี่ยนดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 สัดส่วนของหน้าตัดที่เปลี่ยนไปของสะพานข้ามแม่น้ำจันบุรี

5.2 การคาดการณ์ค่าการสูญเสียแรงดึงในลวดอัดแรง

โครงสร้างสะพานแม่น้ำจันทบุรีใช้วิธีการอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลัง (post-tensioning) ที่มีการสูญเสียทั้งแบบเกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรงและการสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา โดยอ้างอิงสูตรในการคำนวณจากมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 [1] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปการสูญเสียแรงดึงตามวิธีการโดยประมาณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007

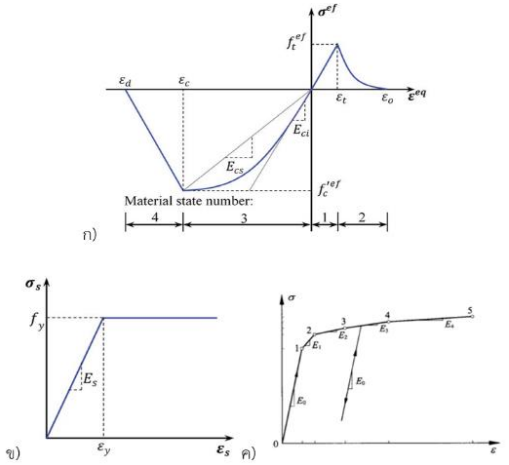
องค์ประกอบการเสื่อมแรงของลวดอัดแรง	สมการ AASHTO-LRFD	ค่าคาดการณ์	เปอร์เซ็นต์การเสื่อมแรงของลวดอัดแรง
การสูญเสียแรงแบบเกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรง			
Δf_{pF}	$\Delta f_{pF} = f_{pj}\left(1-e^{-(kx+\mu\alpha)}\right)$	61	5
Δf_{pA}	$\Delta f_{pA} = E_p\left(\Delta_{set}/L_p\right)$	71	6
Δf_{pES}	$\Delta f_{pES} = \{(N-1)/2N\}\left(E_p/E_{ci}\right)f_{cgp}$	1	0
การสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา			
Δf_{pCR}	$\Delta f_{pCR} = 10\{(f_{pi}A_{ps})/A_g\}\gamma_h\gamma_{st}$	1	0
Δf_{pSH}	$\Delta f_{pSH} = 83\gamma_h\gamma_{st}$	112	9
Δf_{pR}	$\Delta f_{pR} = 70$ (คำแนะนำสำหรับ stress -relieved strand)	70	5
Δf_T	$\Delta f_T = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT}$	316	25

จากการอ่านแบบของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีพบว่าในแรงอัดที่ใช้ขณะถ่ายแรงของเส้นลวดเส้นที่ 1และ 6 คือ 1243 MPa, เส้นที่ 2 และ 5 คือ 1252 MPa, เส้นที่ 3 และ 4 คือ 1266 MPa, เส้นที่ 7 และ 9 คือ 1262 MPa และ เส้นที่ 8 คือ 1285 MPa รวมทั้งหมดในเส้นลวดที่ 1-9 คือ

11331 MPa นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเสื่อมแรงของลวดอัดแรงที่เกิดเกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรงและการสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา คือ 25% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jirawattanasomkul T [3] นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่บันทึกไว้ในภาคตะวันออกของประเทศไทยซึ่งเป็นที่ตั้งของสะพานแห่งนี้คือ 76%

5.3 การตั้งค่าแบบจำลองวัสดุ

แบบจำลองสำหรับคอนกรีตใช้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตในการอัดแรงและดึงแรงแบบทิศทางเดียว [2] ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ผลเพื่อบ่งชี้ถึงความเสียหายของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 ก) ในส่วนของเหล็กเสริมใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบ bilinear [2] ดังแสดงในรูปที่ 2 ข) และแบบจำลองของลวดอัดแรงจะใช้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของลวดอัดแรง [4] ดังแสดงในรูปที่ 2 ค)



รูปที่ 2 แบบจำลองวัสดุที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข: ก) คอนกรีต ข) เหล็กเสริม ค) ลวดอัดแรง

5.4 การสร้างแบบจำลองคานตามยาว (Girder) ของโครงสร้างสะพาน

การจำลองโครงสร้างสะพานจะเลือกวิเคราะห์โครงสร้างสะพานส่วนของคานตามยาว ที่กึ่งกลางสะพาน ระยะ 30 เมตร เนื่องจากเป็นส่วนที่จะต้องแบกรับแรงมากที่สุดที่มีผลมาจากยานพาหนะ (Live load) และน้ำหนักคาน (Self- weight) โดยการศึกษานี้ได้ตั้งสมมติฐานสาเหตุที่ทำให้คานตามยาวเกิดรอยร้าวแบบ Shear cracks และ Flexural cracks มาจากสาเหตุ ดังนี้

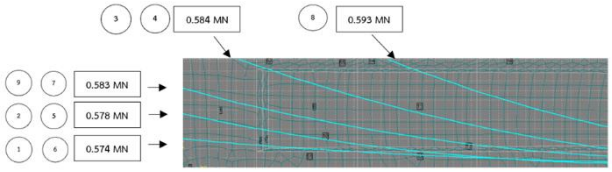
ก. การรับน้ำหนักที่มากเกินไปจากน้ำหนักคานเองและจากยานพาหนะ
ข. การเสื่อมแรงของลวดอัดแรงเมื่อเวลาผ่านไป
ค. การเกิดปฏิกิริยาคลอโรซั่น

ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองคานตามยาวซึ่งเป็นแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลของการแตกร้าวเนื่องจากการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงและแบบจำลองการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมอันเป็นผลมากจากการเกิดปฏิกิริยาคลอโรซั่นโดยในโมเดลนี้จะพิจารณาเฉพาะผลของการลดลงของหน้าตัดประสิทธิผลของเหล็กเสริมตามยาวจากปฏิกิริยาคลอโรซั่น และไม่นำเรื่องของรอยแตกร้าวในคอนกรีต และการสูญเสียค่าแรงยึดแหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีต (loss in chemical bond and mechanical bond) มาพิจารณา เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความสามารถในการรับแรงและตรวจสอบความปลอดภัยในการใช้งานสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรี สำหรับในโครงงานนี้จะทำการทดสอบโดยจะมีการจำแนกเป็นกรณีหลักจำนวน 4 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยค่าอัตราการกัดกร่อนอ้างอิงจากงานวิจัยของ ผศ.ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว [5] และค่าอัตราการเสื่อมถอยของลวดอัดแรงที่ได้เฉลี่ยมาจากค่าคาดการณ์ที่คำนวณได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 การจำแนกกรณีการกำหนดเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนและการเสื่อมแรงของลวดอัดแรง

กลุ่ม	เคส	การกัดกร่อน (%)	การเสื่อมแรงของลวดอัดแรง (%)
1	C0-PL0	0	0
2	C0-PL20	0	20
	C0-PL25	0	25
	C0-PL30	0	30
3	C15-PL0	15	0
	C20-PL0	20	0
4	C15-PL20	15	20
	C15-PL25	15	25
	C15-PL30	15	30
	C20-PL20	20	20
	C20-PL25	20	25
	C20-PL30	20	30

แบบจำลองนี้ได้จำลองการอัดแรงภายหลังโดยการคำนวณขนาดของแรงเนื่องจากการอัดแรงจากความเครียด (Strain) ที่กำหนดไว้ในแบบซึ่งเป็นแรงกดธรรมดา (Point load) กดลงบนแผ่นเหล็ก (Steel plate) ที่กำหนดให้มีขนาด 10x70 เซนติเมตร และลำดับการอัดแรงของลวดอัดแรงสามารถหาได้จากแบบเช่นกันดังรูปที่ 3 จะแสดงลำดับการอัดแรงในเส้นลวด ดังนี้ เส้นที่ 1 และ 6 พร้อมกัน , เส้นที่ 2 และ 5 พร้อมกัน , เส้นที่ 7 และ 9 พร้อมกัน และเส้นที่ 8 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าของแรงอัดในเส้นลวดที่แสดงในรูป 4 จะเป็นค่าแรงอัดที่คิดในเส้นลวดต่อหนึ่งเส้นเพียงเท่านั้น จากแบบจำลองนี้จะวิเคราะห์การรับน้ำหนักเนื่องจากการเสื่อมแรงของลวดอัดแรง โดยมีการคำนวณหาร้อยละการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงในแต่ละเส้น เพื่อนำมาใช้ในการเปลี่ยนค่าแรงการอัดแรง (Prestressing force) และนำมาใช้ในการคำนวณแรงจากการอัดแรง (Pre-stressing force) ที่การสูญเสียแรงที่ร้อยละ 0, 20, 25, 30 ดังตารางที่ 3



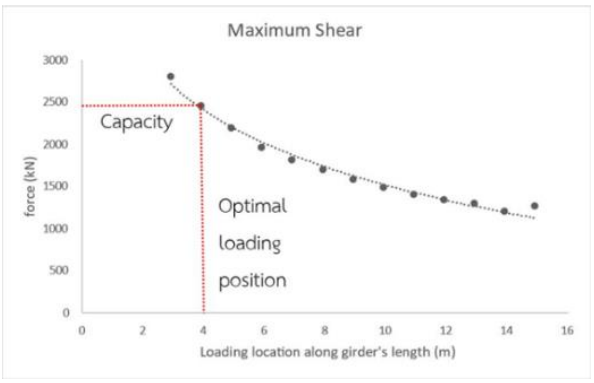
รูปที่ 3 แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลของการแตกร้าวเนื่องจากการเสื่อมแรงของลวดอัดแรง

ตารางที่ 3 ค่าแรงจากการอัดแรงในคานโดยกำหนดให้มีการสูญเสียแรงร้อยละ 0, 20, 25 , 30

Tendon No.	f_i (MPa)	A_{ps} (mm²)	Loss (%)	Force @0% (MN)	Force @20% (MN)	Force @ 25% (MN)	Force @ 30% (MN)
1	1242.60	38.5	22.467	574081	459265	430561	401857
2	1252.21	38.5	23.586	578522	462817	433891	404965
3	1265.94	38.5	26.637	584864	467891	438648	409405
4	1265.94	38.5	26.637	584864	467891	438648	409405
5	1252.21	38.5	23.586	578,522	462817	433891	404965
6	1242.60	38.5	22.467	574,081	459265	430561	401857
7	1262.02	38.5	24.332	583,053	466443	437290	408137
8	1285.46	38.5	28.083	593881	427103	445410	415716
9	1262.02	38.5	24.332	583,053	466443	437290	408137

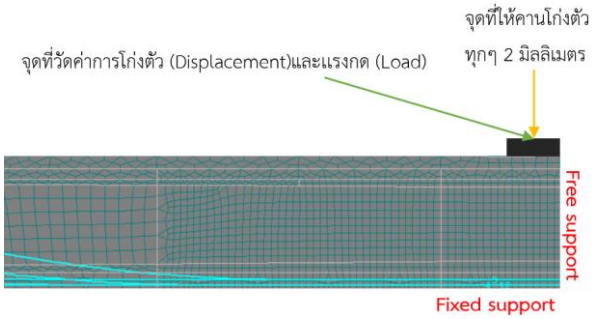
5.5 วิเคราะห์ตำแหน่งการวิบัติจากแรงเฉือน

ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกด (Point Load) ที่กระทำลงบนคานตามยาวรูปตัวไอ (I-girder) ยาว 30 เมตร ได้กำหนดให้แรงที่กระทำในบริเวณกึ่งกลางคานและบริเวณที่ capacity ต่ำสุดที่เกิดการวิบัติด้วยรูปแบบshear failure เพื่อที่จะหาขีดความสามารถในการรับแรงเฉือน (Shear capacity) ของโครงสร้าง โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองของคานที่มีตำแหน่งน้ำหนักกระทำที่ระยะต่างๆกัน จากจุดรองรับ (support) ของGirder ที่ระยะตั้งแต่ 3 จนถึง 15 เมตรรวมทั้งสิ้น 13 กรณี โดยเว้นระยะห่างช่วงละ 1 เมตร และได้เพิ่มน้ำหนักกระทำจนกระทั่งคานถึงจุดวิบัติเพื่อหาขีดความสามารถในการรับแรงที่จุดวิบัติ โดยพบว่าเมื่อตำแหน่งน้ำหนักกระทำห่างจากจุดรองรับทางซ้ายมือเป็นระยะน้อยว่า 4 เมตร คานจะเกิดการวิบัติในรูปแบบการวิบัติโดยแรงเฉือน (shear failure) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนและตำแหน่งที่กดโหลด

จุดที่ควบคุมการใส่แรงจากระยะการโก่งตัว (Displacement controlling point) ในแต่ละขั้นตอนการวิเคราะห์จะกำหนดให้มีการเพิ่มของการโก่งตัวทุกๆ 2 มิลลิเมตร ในทุกขั้นตอนดังรูปที่ 5 และนำค่าแรงที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (Load) กับระยะการโก่งตัว (Displacement)



รูปที่ 5 ลักษณะการใส่แรงและจุดที่วัดค่าการโก่งตัวของคานตามยาว

5.6 การคำนวณหาแรงกดของคานตามยาว ตาม AASHTO LRFD 2007

5.6.1 น้ำหนักคานตามยาวรูปตัวไอ (I-girder) ยาว 30 เมตร และแผ่นพื้น (Top slab)

$$\frac{Area \times SW \times L \times 9.81}{2} = \frac{0.866 \times 2.4 \times 30 \times 9.81}{2} = 305.84kN$$

5.6.2 น้ำหนักจากรถ H20-S16-44 และน้ำหนักคงที่ช่องจราจร (Lane load)

$$[1.33 \times \frac{(145 \times 30) + (145 \times (30 - 4.3))}{30}] + \frac{9.3 \times 30}{2} = 497.56kN$$

5.6.3 รวมน้ำหนักทั้งหมด

$$= 305.84 + (0.954 \times 497.56) = 780.51kN$$

6. สรุปผลงานวิจัย

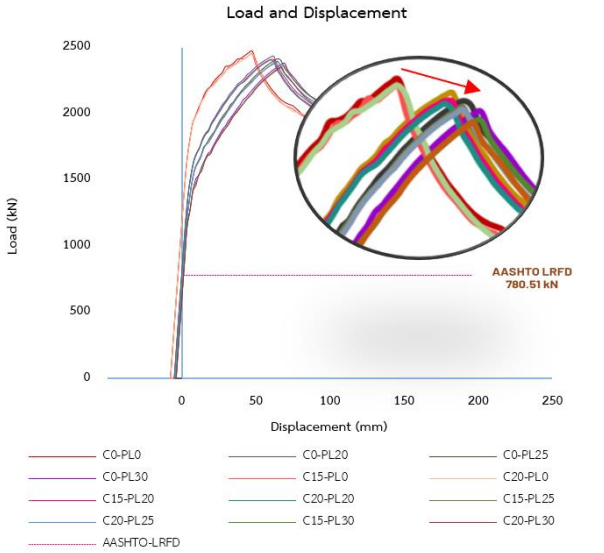
6.1 ผลจากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองสองมิติ

การเสื่อมแรงเนื่องจากลวดอัดแรงส่งผลให้คานของโครงสร้างสะพานรับน้ำหนักได้น้อยลง ผลกระทบของคานโครงสร้างสะพานจะทำให้ความสามารถในโครงสร้างสะพานสามารถรับน้ำหนักได้น้อยกว่าน้ำหนักสูงสุดที่คำนวณได้จากมาตรฐาน AASHTO LRFD [1] จึงอาจพบร้อยร้าวเนื่องจากแรงอัด (Compression crack) รอยร้าวเนื่องจากแรงดัด

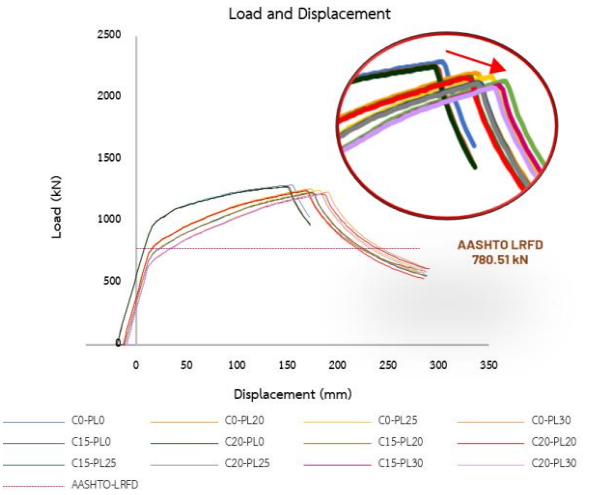
(Flexural crack) และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด (Flexural – Shear crack)

ดังนั้น การสูญเสียแรงเนื่องจากการอัดแรงมีผลกระทบมากกว่าการเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาคลอโรซั่น อย่างไรก็ดีจากกรณีนี้สะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรียังคงปลอดภัยต่อการใช้งาน แต่อาจต้องมีการเสริมกำลังบริเวณกลางคาน เพื่อป้องกันรอยแตกร้าวที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

6.2 ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (Load) กับระยะการโก่งตัว (Displacement)



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการโก่งตัว ในกรณีที่คานรับแรงกดที่บริเวณ 4 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่เกิด Shear failure สูงสุด

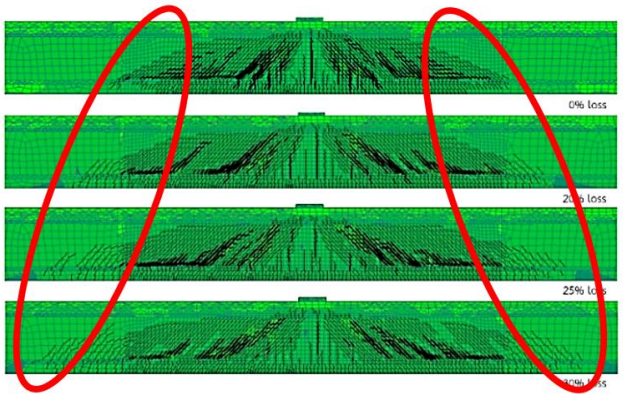


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการโก่งตัว ในกรณีที่คานรับแรงกดที่บริเวณกึ่งกลางคาน

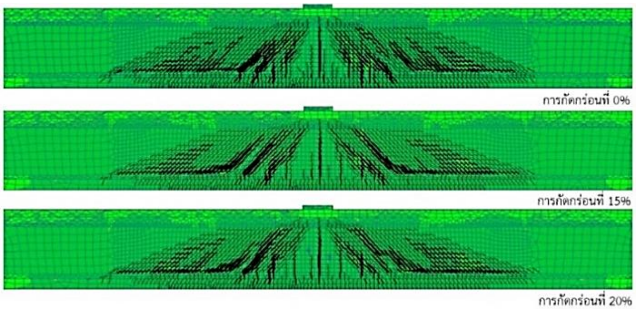
จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของคานมีแนวโน้มลดลงและส่งผลให้คานมีความเหนียวมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นจากการกัดกร่อนของปฏิกิริยาคลอโรซั่นจะส่งผลให้การรับน้ำหนักของคานลดลง และส่งผลให้คานมีความเปราะมากขึ้น อย่างไรก็ดี การเสื่อมแรงของลวดอัดแรงมีผลมากกว่าการกัดกร่อนของปฏิกิริยาคลอโรซั่น แต่หากเกิดทั้ง 2 กรณีพร้อมกัน จะส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของคานลดลงแบบเสริมกัน และคานมีความเหนียวมากขึ้นเพราะผลของการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงมีมากกว่า ดังนั้นเมื่อเทียบกับ AASHTO แล้วผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสะพานยังคงปลอดภัยต่อการใช้งาน

6.3 ผลการวิเคราะห์รอยแตกร้าวที่ได้จากแบบจำลองคานตามยาว

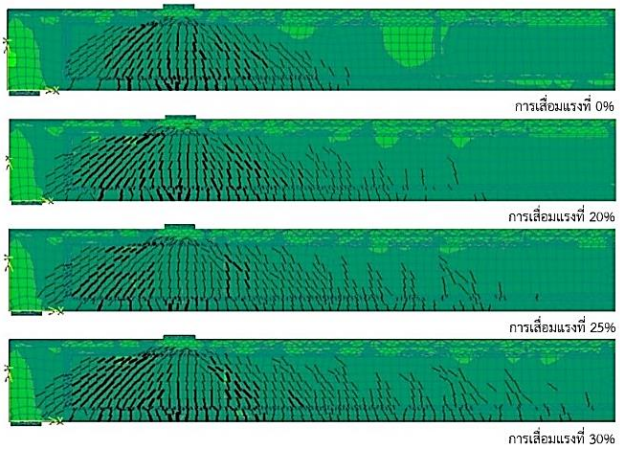
จากการวิเคราะห์รอยแตกร้าวที่ได้จากแบบจำลองของการรับน้ำหนักของคานทั้งกรณีกดแรงที่บริเวณกลางคานและกรณีกดแรงที่บริเวณ 4 เมตร จากรูปที่ 8 และ รูปที่ 10 พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีผลที่เหมือนกัน โดยที่จะเห็นได้ว่าเมื่อมีเปอร์เซ็นต์การเสื่อมแรงของลวดอัดแรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้รอยแตกร้าวมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ในรูปที่ 9 และ 11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีเปอร์เซ็นต์การกัดกร่อนของปฏิกิริยาคลอโรซั่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้รอยแตกร้าวมีการกระจายตัวที่น้อยลงเพียงเล็กน้อย



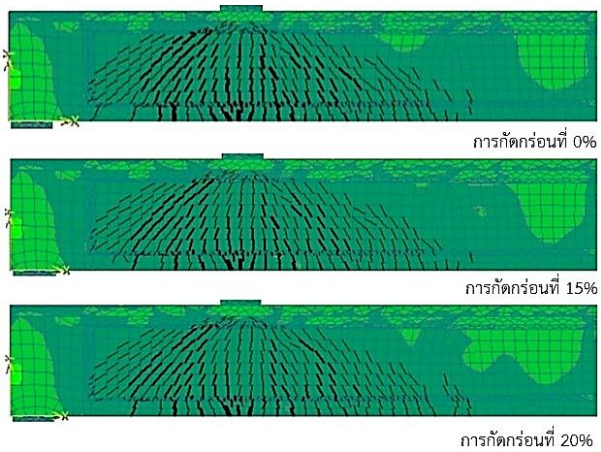
รูปที่ 8 ลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวในกรณีที่เกิดการรับน้ำหนักเนื่องจากการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงที่ 0%, 20%, 25% และ 30% ตามลำดับที่บริเวณกึ่งกลางคาน



รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวในกรณีที่เกิดการรับน้ำหนักเนื่องจากการเกิดการกัดกร่อนของปฏิกิริยาคลอโรซั่นที่ 0%, 15% และ 20% ตามลำดับที่บริเวณกึ่งกลางคาน



รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวในกรณีที่เกิดการรับน้ำหนักเนื่องจากการเสื่อมแรงของลวดอัดแรงที่ 0%, 20%, 25% และ 30% ตามลำดับที่บริเวณ 4 m จากปลายคาน



รูปที่ 11 ลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวในกรณีที่เกิดการรับน้ำหนักเนื่องจากการเกิดการกัดกร่อนของปฏิกิริยาคลอโรซั่นที่ 0%, 15% และ 20% ตามลำดับที่บริเวณ 4 เมตร จากปลายคาน

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 ควรมีการเก็บสถิติน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะที่ใช้งานสะพานจริง เพื่อที่จะได้น้ำหนักที่ถูกต้องในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานให้ถูกต้องมากขึ้น

6.4.2 ควรมีการตรวจสอบความเสียหายของสะพานข้ามแม่น้ำจันทบุรีเนื่องจากสะพานผ่านการใช้งานมายาวนานและยังมีส่วนของโครงสร้างที่เข้าถึงยากในการตรวจสอบเพื่อหาแนวทางในการบำรุงรักษา

6.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างคานตามยาวในโครงงานนี้ ได้ทำการจำลองน้ำหนักบรรทุก 2 ลักษณะ คือ กรณีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางโครงสร้างคานตามยาว และกรณีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ณ ตำแหน่งจากขอบฐานรองรับเป็นครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผล โดยทั้ง 2 กรณีทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อมีรถบรรทุกหนักอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานและรถบรรทุกหนักกำลังขึ้นสะพาน ดังนั้นควรมีการเพิ่มลักษณะของน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อโครงสร้างในการวิเคราะห์ เพื่อที่จะได้สามารถประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ คุณ Radomír Pukl และคณะผู้ผลิตซอฟแวร์เป็นอย่างยิ่ง ที่ให้คำแนะนำและความรู้เพื่อประกอบการทำงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัย ยังขอขอบพระคุณนายนัฐพงษ์ คงหวัง นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและข้อเสนอแนะตลอดการทำโครงงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] AASHTO. 2007. AASHTO LRFD bridge design specifications, customary S.I. units. Washington, DC: AASHTO.

[2] Cervenka, V., L. Jendele, and J. Cervenka. 2020. ATENA program documentation, part 1: Theory. Prague, Czech Republic: Cervenka Consulting, pp. 18-33.

[3] Jirawattanasomkul T, Kongwang N, Likitlersuang S, Yodsudjai W, Charuvisit S, and Sato Y. 2021. “Failure Analysis of Dapped-End Cracking in Posttensioned Bridge Girder.”J.BridgeEng.26(11): 04021082.

[4] Xiao-Han Wu, Shunsuke Otani and Hitoshi Shiohara (2001). Tendon Model for Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures. J. Struct. Eng., 2001, 127(4): pp. 398-405.

[5] อานนท์ วงษ์แก้ว. (2558). ผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยบูรพา