

พฤติกรรมของสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึดภายใต้สถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Behavior of Tied-Arch Bridge Under Cable Loss Scenarios Using Nonlinear Finite Element Method

ศิวกร บุตรศรี^{1,*} ธรา ทานวีร์² ศุภศิษฐ์ ศรีวรานันท์³ และ อดิรัตน์ วิสุทธิเสรีวงศ์⁴

^{1,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

² NorCiv Engineering Co., Ltd.

*Corresponding author; E-mail address: 6670241121@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

สะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึดแห่งหนึ่ง ปัจจุบันมีอายุการใช้งานมากกว่า 30 ปี จากการสำรวจพบว่ามีความเสียหายหลายส่วน โดยเฉพาะในสะพานโค้ง ซึ่งพบปัญหาความเสียหายในสายเคเบิลหลายตำแหน่ง บทความนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้สถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) เพื่อศึกษารูปแบบการถ่ายแรง พฤติกรรมการเสียรูป และกลไกการวิบัติของโครงสร้างสะพาน โดยมีการใช้ซอฟต์แวร์ GiD Simulation และ ATENA Science ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้าง ทั้งนี้ได้พิจารณาสถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิลหลายรูปแบบ ได้แก่ การขาดสายเคเบิลเส้นเดียวและการขาดต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์พบว่า สายเคเบิลบางเส้นมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของโครงสร้างอย่างมาก อาจก่อให้เกิดกลไกการวิบัติและนำไปสู่การพังทลายได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้วางแผนเสริมกำลังหรือปรับปรุงโครงสร้างสะพานให้มีความมั่นคงยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: สะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึด, กลไกการวิบัติ, การสูญเสียสายเคเบิล, ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Abstract

A tied-arch bridge, currently in service for over 30 years, has exhibited various signs of structural deterioration. Notably, damage has been observed in several hangers of the arch system. This study aims to analyze and evaluate the structural behavior of the bridge under different cable loss scenarios using the Nonlinear Finite Element Method (NLFEM). The investigation focuses on load transfer mechanisms, deformation behavior, and failure mechanisms of the bridge. GiD Simulation and ATENA Science were employed to perform structural modeling and analysis. Several scenarios were considered, including single cable failure and progressive cable loss. The analysis results indicate that certain cables are critical to the structural stability, and their failure may trigger a failure mechanism that could lead to collapse. The insights gained from this study can be applied to structural strengthening strategies and rehabilitation planning to enhance the safety and stability of the bridge.

Keywords: Tied-Arch Bridge, Failure Mechanism, Cable Loss, Nonlinear Finite Element Method

1. คำนำ

สะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึดแห่งหนึ่ง มีอายุการใช้งานมากกว่า 30 ปี จากการลงพื้นที่สำรวจโดยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) พบว่าสะพานมีสภาพทรุดโทรมและปรากฏความเสียหายในหลายจุด โดยเฉพาะสะพานโค้ง ซึ่งพบความเสียหายของสายเคเบิลบางเส้น ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยสายเคเบิลถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการถ่ายแรงของระบบโครงสร้างสะพาน การสูญเสียสายเคเบิลบางเส้นอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้าง และในบางกรณีอาจก่อให้เกิดกลไกการวิบัติแบบต่อเนื่องและนำไปสู่การพังทลายของสะพานได้ ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้สถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนเสริมกำลังหรือบูรณะโครงสร้างสะพาน ให้มีความมั่นคงและปลอดภัยสำหรับการใช้งานในระยะยาว

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึด ภายใต้สถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิล โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเสถียรภาพของโครงสร้าง กรณีศึกษาในบทความนี้คือสะพานโค้งที่มีช่วงความยาวประมาณ 63 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ตรวจพบความเสียหายของสายเคเบิลบางส่วนจากการสำรวจภาคสนาม การศึกษาดำเนินการโดยสร้างแบบจำลองสามมิติของสะพานช่วงดังกล่าว และจำลองพฤติกรรมโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis: NL-FEA) โดยใช้โปรแกรม GiD Simulation ร่วมกับ ATENA Science ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งในแง่ของแรงภายใน การเสียรูป และการเกิดรอยร้าวในชิ้นส่วนต่าง ๆ

สำหรับการกำหนดน้ำหนักบรรทุก อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO 2007 [1] โดยใช้รถบรรทุกแบบสองเพลลา (H20-35) [2] ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับช่วงเวลาที่ผ่านมาที่สะพานได้รับการออกแบบเดิม การวิเคราะห์ครอบคลุมหลายกรณี ได้แก่ การขาดสายเคเบิลเส้นเดียว และการขาดต่อเนื่อง ผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นแนวทางสำคัญในการวิเคราะห์ความเสี่ยงของการวิบัติแบบต่อเนื่อง และสนับสนุนการวางแผนซ่อมแซมหรือเสริมกำลังสะพานที่มีอายุการใช้งานยาวนานให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยในระยะยาว

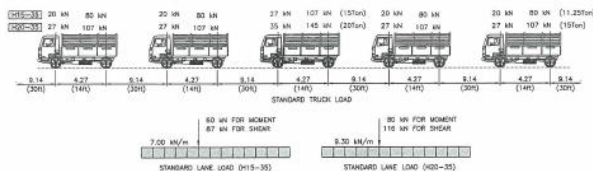


รูปที่ 1 ความเสียหายในสายเคเบิล

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานตามมาตรฐาน AASHTO

ในการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ของมาตรฐาน AASHTO 2007 [1] วิเคราะห์จากน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกมาตรฐานแบบ 2 เพลา (H20-35) ที่เสนอในมาตรฐาน AASHTO ปี 1935 [2] เพื่อจำลองน้ำหนักให้มีความใกล้เคียงกับปี้ออกแบบมากที่สุด



รูปที่ 2 รถบรรทุกขนาด 2 เพลา วิ่งเป็นขบวนต่อเนื่อง (Truck Train) [2] [3]

นอกจากนี้ ตามข้อกำหนดของ AASHTO ยังระบุให้พิจารณาผลกระทบจากแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ค่าแรงกระแทก (Dynamic Load Allowance) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Dynamic Load Allowance} = 1 + \frac{IM}{100} \quad (1)$$

โดยที่ IM คือเปอร์เซ็นต์ของแรงกระแทกที่พิจารณาเพิ่มเข้าไปจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ซึ่งสำหรับกรณีรถบรรทุก H20-35 จะกำหนดค่า IM เท่ากับ 33% สำหรับชิ้นส่วนทั่วไป ทั้งนี้ สัมประสิทธิ์แรงกระแทกไม่สามารถนำไปใช้กับน้ำหนักบรรทุกจรแบบ Lane Load ได้ (ใช้ได้สำหรับ Truck และ Tandem Load เท่านั้น)

2.2 การศึกษาผลกระทบจากการสูญเสียสายเคเบิลต่อพฤติกรรมโครงสร้าง

เมื่อเกิดการสูญเสียสายเคเบิลบางเส้นในโครงสร้างสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึด แรงที่เคยส่งผ่านสายเคเบิลเส้นนั้นจะถูกถ่ายเข้าสู่สายเคเบิลอื่นที่ยังคงอยู่ในระบบแทน [6] อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นมักไม่กระจายอย่างสมมาตรหรือทั่วถึง แต่จะกระจุกตัวอยู่ในสายเคเบิลที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่เกิดการสูญเสียมากที่สุด ซึ่งเป็นลักษณะที่เรียกว่า การถ่ายแรงเฉพาะกลุ่ม (Localized Load Redistribution) [6] ในกรณีที่สายเคเบิลที่เหลืออยู่ไม่สามารถรองรับแรงที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเพียงพออาจนำไปสู่ความเสียหายแบบต่อเนื่อง โดยมีโอกาสที่สายเคเบิลใกล้เคียงจะเกิดความเสียหายตามมาหรือองค์ประกอบโครงสร้างหลัก เช่น คานสะพาน (Tied Girder) หรือคานโค้ง (Arch Rib) จะเกิดการเสียรูปเกินขีดจำกัดของวัสดุ [6] ซึ่งกลไกนี้อาจพัฒนาไปสู่การวิบัติแบบต่อเนื่องได้ [7] นอกจากนี้ แนวทางการกระจายแรงยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดวางของสายเคเบิล เช่น

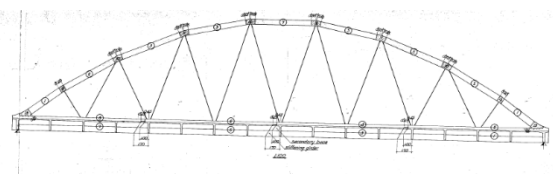
สายเคเบิลที่มีมุมเอียงมากมักมีความแข็งแรงมากกว่าและมีแนวโน้มที่จะรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการสูญเสียสายเคเบิลใกล้เคียง ขณะที่สายเคเบิลในตำแหน่งกึ่งกลางหรือมีมุมเอียงน้อย อาจตอบสนองต่อแรงกระทำในรูปแบบที่แตกต่างออกไป [6] ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์ผลกระทบจากการสูญเสียสายเคเบิลจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อประเมินความเสี่ยงของระบบโครงสร้าง และใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบที่สามารถรองรับเหตุการณ์ไม่คาดคิดได้โดยไม่เกิดกลไกการวิบัติแบบต่อเนื่อง [6] [7]

2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ

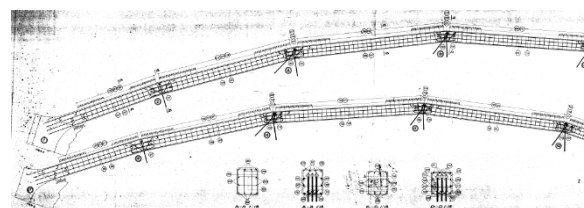
โดยทั่วไป พฤติกรรมของโครงสร้างจะเริ่มต้นจากพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Behavior) แต่เมื่อเกิดความเสียหายหรือแตกร้าวในองค์ประกอบบางส่วน พฤติกรรมของโครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ซึ่งทำให้กระบวนการวิเคราะห์มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของโครงสร้างสะพานที่มีองค์ประกอบหลายประเภททำงานร่วมกัน เช่น คานโค้งและสายเคเบิล เพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำและสามารถสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของโครงสร้างสะพานภายใต้สถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิล จึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [8] ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองสะพานโค้งด้วยโปรแกรม GiD Simulation สำหรับเตรียมแบบจำลองเรขาคณิตและนิยามคุณสมบัติวัสดุและใช้โปรแกรม ATENA Studio ในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้าง

2.2.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม GiD Simulation

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของสะพานโค้งอ้างอิงรายละเอียดจากแบบก่อสร้างดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 สำหรับคุณสมบัติของวัสดุ กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 15.9 MPa ซึ่งได้จากผลการทดสอบในปัจจุบัน รายละเอียดของคุณสมบัติคอนกรีตแสดงไว้ใน ตารางที่ 1 นอกจากนี้ ยังได้กำหนดค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งแสดงไว้ในตารางเดียวกัน เพื่อใช้ในการนิยามพฤติกรรมของวัสดุในแบบจำลองการวิเคราะห์



รูปที่ 3 ภาพตัดตามยาวของสะพานโค้ง [9]



รูปที่ 4 ภาพตัดตามยาวรายละเอียดการเสริมเหล็กของคานโค้ง [9]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีต และคุณสมบัติของเหล็กเสริม [4]

คอนกรีต	
กำลังอัดของคอนกรีต, f_c' (MPa)	15.9
มอดุลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)	19.1
ความหนาแน่น, Density (kg/m^3)	2,320
เหล็กเสริม	
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (MPa)	
เหล็กเสริมหลัก (RB25)	273
เหล็กปลอก (RB9)	273
มอดุลัสยืดหยุ่น, E_s (GPa)	200

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสายเคเบิล [5]

สายเคเบิล	
มอดุลัสยืดหยุ่น, E_s (GPa)	200
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (MPa)	828
กำลังรับแรงดึงที่จุดประลัย, f_u (MPa)	1,035

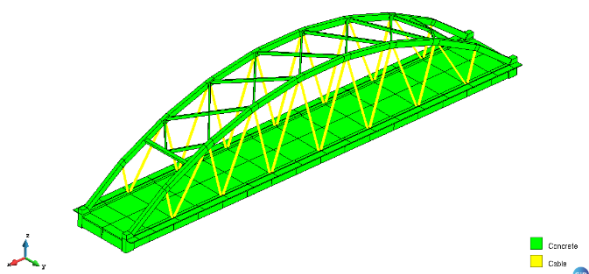
สายเคเบิลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM A722/A722M [5] ซึ่งเป็นมาตรฐานวัสดุสำหรับเหล็กกล้าความต้านทานสูงที่ใช้ในงานโครงสร้าง

ในแบบจำลองได้มีการสร้างแผ่นเหล็กบริเวณตำแหน่งล้อของรถบรรทุกขนาด 2 เพลา เพื่อจำลองการถ่ายแรงจากล้อลงสู่พื้นสะพาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกระจายแรงกระทำให้สม่ำเสมอบริเวณจุดสัมผัสและลดการรวมตัวของแรงในบริเวณพื้นที่เล็ก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ แผ่นเหล็กที่ใช้กำหนดให้เป็นวัสดุ Solid Steel และใช้แบบจำลองพฤติกรรมแบบ Von Mises 3D [10] รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงไว้ใน ตารางที่ 3

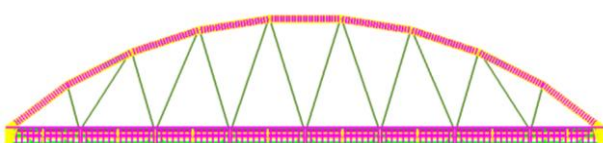
ตารางที่ 3 คุณสมบัติแผ่นเหล็ก [10]

แผ่นเหล็ก	
กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก, f_y (MPa)	550
มอดุลัสยืดหยุ่น, E_s (GPa)	200
อัตราส่วนปัวซอง	0.3

โดยรายละเอียดแบบจำลองคอนกรีตและแบบจำลองการเสริมเหล็กในคอนกรีตมีรายละเอียดดังรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 แบบจำลองคอนกรีต



รูปที่ 6 แบบจำลองเหล็กเสริม

2.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม ATENA Studio

หลังจากดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม GiD Simulation แล้ว ได้ดำเนินการนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าสู่โปรแกรม ATENA Studio [8] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis) ที่สามารถจำลองพฤติกรรมวัสดุได้อย่างละเอียด ทั้งในส่วนของคอนกรีต เหล็กเสริมและสายเคเบิล ในบทความนี้ได้ใช้การวิเคราะห์แบบ Static Analysis ภายใต้โหลดคงที่ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการสูญเสียสายเคเบิลในตำแหน่งต่าง ๆ การวิเคราะห์ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมกับสภาพจริงของโครงสร้าง โดยกำหนดให้จุดรองรับมีลักษณะเป็น Fixed Support ที่ปลายคานและบรรทุกน้ำหนักจากล้อรถลงบนแผ่นเหล็กเพื่อกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอบนพื้นสะพาน ในแต่ละกรณีของการสูญเสียสายเคเบิล ได้มีการติดตามผลการกระจายแรงภายในโครงสร้าง พฤติกรรมการเสียรูป รอยร้าวที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของแรงในสายเคเบิลเส้นอื่นที่ยังคงอยู่ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดกลไกการวิบัติแบบต่อเนื่อง

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 การกำหนดน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO 2007

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานภายใต้แรงกระทำจากยานพาหนะ จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่เหมาะสมและสอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบสะพาน โดยในบทความนี้ได้คำนวณน้ำหนักกระทำล้อของรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ซึ่งกำหนดให้ใช้รถบรรทุกแบบ H20-35 เป็นตัวแทนของรถบรรทุกมาตรฐาน น้ำหนักบรรทุกที่กระทำล้อแต่ละข้าง คำนวณจากค่าที่ระบุในมาตรฐาน และมีการคูณด้วยค่าแรงกระแทก (Impact Factor) เพื่อสะท้อนผลกระทบพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของรถขณะใช้งานจริง ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แรงที่ถ่ายลงยังองค์ประกอบของโครงสร้างสะพาน เช่น สายเคเบิล คานโค้ง และคานสะพาน

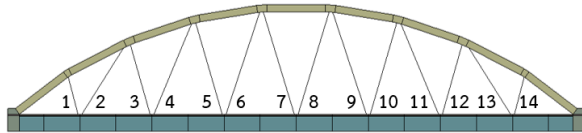
ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007

รถบรรทุก	น้ำหนักบรรทุก (kN)			น้ำหนักแผ่กระจาย
	เพลานที่ 1	เพลานที่ 2	เพลานที่ 3	
H20-35	35.6	142.3	-	-

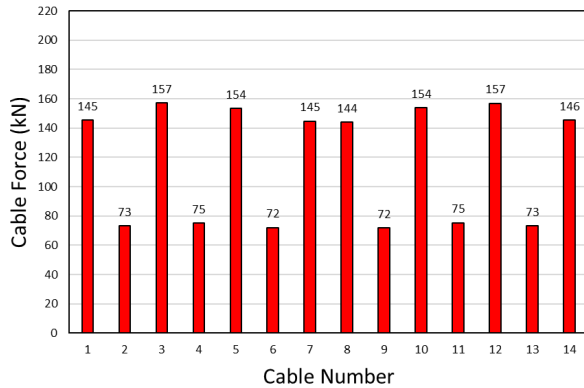
ในบทความนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิลของสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึด (Tied-Arch Bridge) เพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมและเสถียรภาพของโครงสร้าง โดยพิจารณากรณีศึกษาบริเวณสะพานโค้ง ซึ่งตรวจพบความเสียหายของสายเคเบิลบางเส้นจากการสำรวจภาคสนาม การสูญเสียสายเคเบิลในแบบจำลองดำเนินการในลักษณะการปลดองค์ประกอบสายเคเบิลออกจากระบบทันที (Instantaneous Cable Removal) โดยไม่มีการลดแรงล่วงหน้า ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบโดยตรงที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้าง เมื่อสายเคเบิลบางเส้นขาดหายไปจากระบบโดยฉับพลัน เช่น การเปลี่ยนแปลงของแนวถ่ายแรง (Load Path), การเพิ่มแรงในสายเคเบิลที่เหลือ และพฤติกรรมการเสียรูปขององค์ประกอบอื่น รูปแบบของการปลดสายเคเบิลแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) การขาดสายเคเบิลเส้นเดียว (Single Cable Loss)
- 2) การขาดสายเคเบิลต่อเนื่อง (Sequential Cable Loss)

ผลที่ได้จากแต่ละกรณีถูกนำมาเปรียบเทียบกับสภาพโครงสร้างปกติเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดกลไกการวิบัติแบบต่อเนื่อง

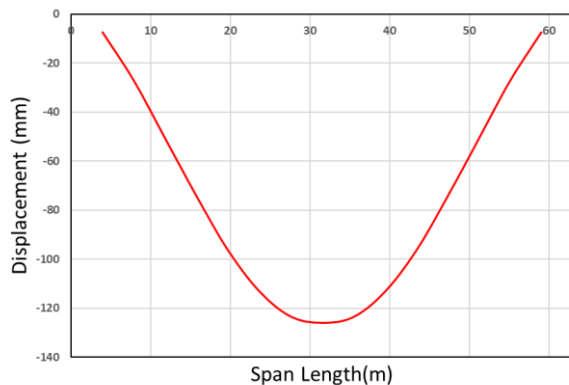


รูปที่ 7 แบบจำลองสะพานเคเบิลแบบมีตัวดึงยึด



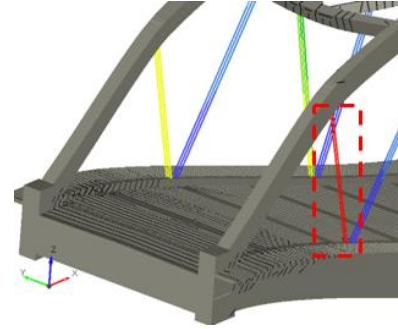
รูปที่ 8 แรงในสายเคเบิลแต่ละเส้นก่อนปลดสายเคเบิล

รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์แรงในสายเคเบิลของสะพานเคเบิลแบบมีตัวดึงยึดภายใต้สภาวะที่ไม่มีการสูญเสียสายเคเบิล (No Cable Loss) พบว่าแรงที่กระทำในสายเคเบิลมีลักษณะเป็นแรงดึง (Tension) โดยมีค่าแรงแตกต่างกันไปตามตำแหน่งของสายแต่ละเส้น ผลการคำนวณจากแบบจำลอง Finite Element ด้วยโปรแกรม ATENA Studio แสดงให้เห็นว่าสายเคเบิลกลุ่มที่ 3 และ 12 เป็นสายที่รับแรงดึงสูงสุด มีค่าประมาณ 157 kN

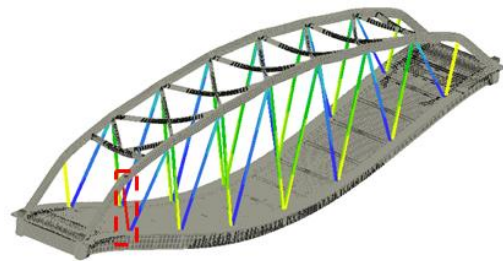


รูปที่ 9 Displacement ของคานสะพานภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ

รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของคานสะพาน (Tied Girder) ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นผ่านโปรแกรม ATENA Studio ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นรูปแบบการเสียรูปของโครงสร้างตลอดช่วงสะพาน โดยพบว่าคานสะพานมีการทรุดตัวในแนวตั้ง โดยจุดที่เกิดการเสียรูปมากที่สุดอยู่บริเวณกึ่งกลางช่วง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

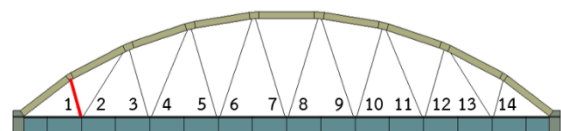


รูปที่ 10 ปลดสายเคเบิลออก 1 เส้นในกลุ่มแรก

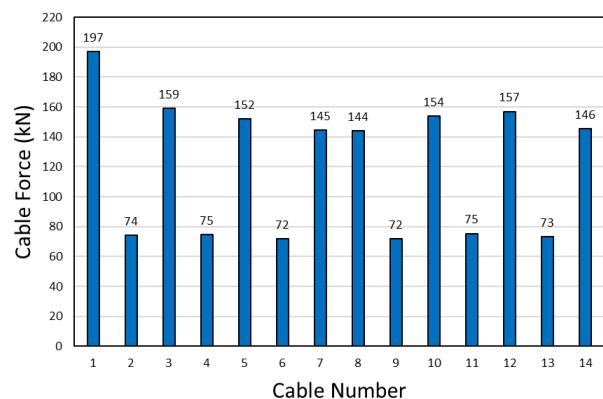


รูปที่ 11 ปลดสายเคเบิลออก 1 เส้นในกลุ่มแรก

เพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างจากการสูญเสียสายเคเบิลบางเส้นในระบบสะพานเคเบิลแบบมีตัวดึงยึด ได้ดำเนินการจำลองกรณีศึกษาการปลดสายเคเบิล 1 เส้น (Single Cable Loss) ออกจากแบบจำลอง โดยทำการลบองค์ประกอบของสายเคเบิลเป้าหมายออกจากระบบการวิเคราะห์อย่างฉับพลัน เพื่อสะท้อนสภาวะที่สายเคเบิลเกิดความเสียหายหรือขาดในสถานการณ์จริง ในกรณีนี้ ได้เลือกสายเคเบิลแต่ละเส้นทำการปลดทีละเส้น พร้อมวิเคราะห์พฤติกรรมของสายเคเบิลที่เหลือและการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงในระบบโครงสร้างหลังการสูญเสียสายเคเบิล เพื่อประเมินแนวโน้มของการกระจายแรงใหม่ (Load Redistribution) และตรวจสอบตำแหน่งที่มีความเสี่ยงต่อการวิบัติ

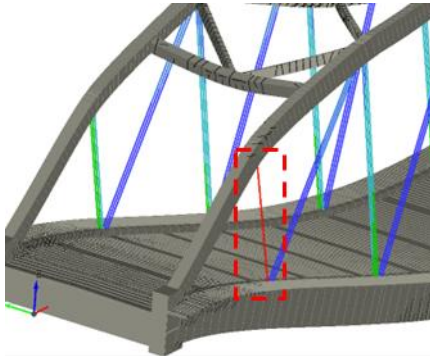


รูปที่ 12 ปลดสายเคเบิลออก 1 เส้นในกลุ่มแรก

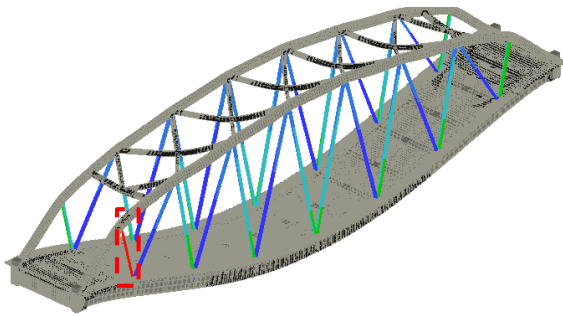


รูปที่ 13 แรงในสายเคเบิลแต่ละเส้นหลังปลดสายเคเบิล 1 เส้น

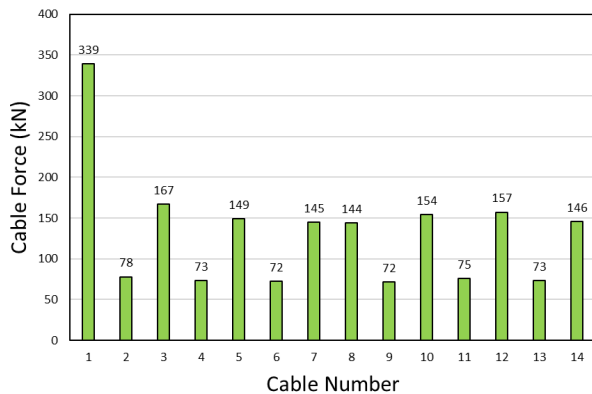
รูปที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์กรณีปลดสายเคเบิลในกลุ่มแรก แสดงให้เห็นว่าแรงที่สูญเสียไปจากสายเคเบิลเส้นดังกล่าว ไม่ได้กระจายไปทั่วระบบ แต่กลับถ่ายเข้าสู่สายเคเบิลที่อยู่ใกล้เคียงหรือกลุ่มเดียวกันเท่านั้น



รูปที่ 14 ปลดสายเคเบิลออก 2 เส้นในกลุ่มแรก

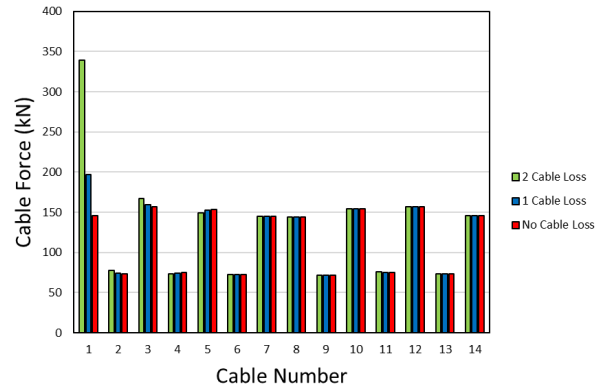


รูปที่ 15 ปลดสายเคเบิลออก 2 เส้นในกลุ่มแรก



รูปที่ 16 แรงในสายเคเบิลแต่ละเส้นหลังปลดสายเคเบิล 2 เส้น

รูปที่ 16 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA Studio พบว่าสายเคเบิลในกลุ่มที่ 1 ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณสายเคเบิลที่ถูกปลดมากที่สุด กลายเป็นสายที่ต้องรับแรงเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยมีค่าแรงดึง (Tension) สูงถึงประมาณ 339 kN ซึ่งถือเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงในสถานะการใช้งานปกติที่อยู่ประมาณ 157 kN

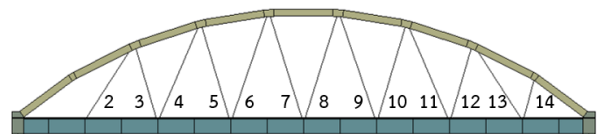


รูปที่ 17 การเปรียบเทียบแรงในสายเคเบิลภายใต้สถานะการสูญเสียสายเคเบิลต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์แรงในสายเคเบิลแต่ละเส้น ภายใต้ 3 สถานการณ์ ได้แก่

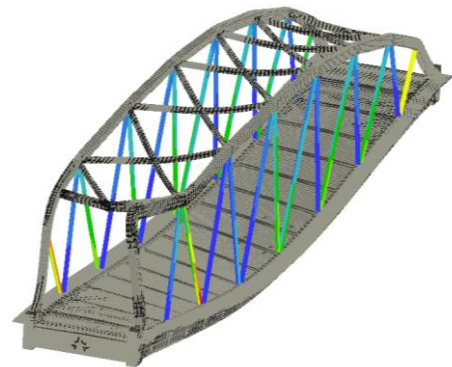
- 1) สถานะการใช้งานปกติ (No Cable Loss)
- 2) การสูญเสียสายเคเบิล 1 เส้น (1 Cable Loss)
- 3) การสูญเสียสายเคเบิล 2 เส้น (2 Cable Loss)

ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 17 พบว่าแรงในสายเคเบิลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกลุ่มสายเคเบิลที่อยู่ใกล้ตำแหน่งที่เกิดการสูญเสีย กลุ่มที่ 1 เป็นตำแหน่งที่มีการตอบสนองต่อการสูญเสียได้อย่างชัดเจน โดยในกรณีที่เกิดการสูญเสียสายเคเบิล 2 เส้น พบว่าแรงในสายเคเบิลของกลุ่มที่ 1 เพิ่มขึ้นสูงสุดถึงประมาณ 339 kN เมื่อเทียบกับเพียง 157 kN ในสถานะปกติ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงพฤติกรรมการถ่ายแรงที่กระจุกตัวในบริเวณใกล้จุดที่เกิดความเสียหาย หรือที่เรียกว่าการกระจายแรงแบบเฉพาะกลุ่ม (Localized Load Redistribution) ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของพฤติกรรมโครงสร้างสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึดภายใต้สถานะไม่สมบูรณ์

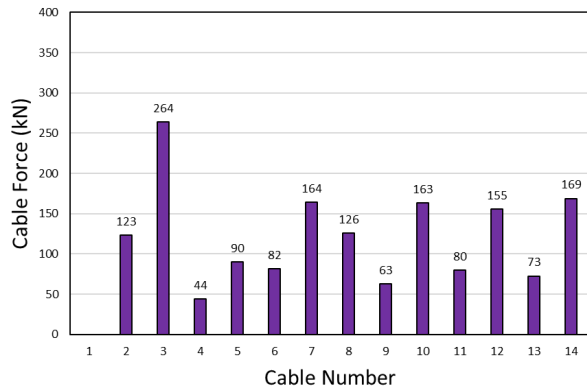


รูปที่ 18 แบบจำลองการปลดสายเคเบิลออก 1 กลุ่ม

รูปที่ 18 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึด (Tied-Arch Bridge) ภายใต้กรณีศึกษาการปลดสายเคเบิลออกจากแบบจำลองจำนวน 1 กลุ่ม



รูปที่ 19 ปลดสายเคเบิลออก 1 กลุ่ม



รูปที่ 20 แรงในสายเคเบิลแต่ละเส้นหลังปลดสายเคเบิล 1 กลุ่ม

จากการจำลองการปลดสายเคเบิลจำนวน 3 เส้นในกลุ่มที่ 1 ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายสุดของสะพาน พบพฤติกรรมที่น่าสนใจเกี่ยวกับแนวการถ่ายแรงภายในระบบ กล่าวคือแรงที่สูญเสียไปจากสายเคเบิลในกลุ่มที่ 1 ไม่ได้กระจายเข้าสู่สายเคเบิลกลุ่มที่ 2 ซึ่งอยู่ถัดมาโดยตรง แต่กลับพบว่าแรงส่วนใหญ่ถูกถ่ายเข้าไปยังสายเคเบิลในกลุ่มที่ 3 แทน ลักษณะการถ่ายแรงแบบ “ข้ามกลุ่ม” ดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่าระบบโครงสร้างสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึดมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเสียหายที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) และไม่สอดคล้องกับการคาดการณ์เชิงลำดับทางกายภาพ ซึ่งสะท้อนว่าแรงในระบบไม่ได้ถ่ายแรงต่อเนื่องแบบเส้นตรง แต่ถูกควบคุมโดยแนวถ่ายแรงตามโครงสร้างโค้งและตำแหน่งขององค์ประกอบหลัก พฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้สายเคเบิลในกลุ่มที่ 3 ต้องรับแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่สายเคเบิลในกลุ่มที่ 2 รับแรงเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงความไม่สมดุลในการถ่ายแรงภายหลังการสูญเสียสายเคเบิลแบบกลุ่ม และเป็นข้อพิจารณาสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโครงสร้าง รวมถึงการวางแผนเสริมกำลังเพื่อป้องกันการวิบัติแบบต่อเนื่อง

4. บทสรุป

บทความนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพานโค้งแบบมีตัวตั้งยึดภายใต้สถานการณ์การสูญเสียสายเคเบิล โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) ผ่านการสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม GiD Simulation และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA Studio เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบโครงสร้างสะพานทั้งในด้านแรงภายใน การเสียรูป และความเสี่ยงของการเกิดกลไกการวิบัติแบบต่อเนื่อง จากผลการวิเคราะห์พบว่า การสูญเสียสายเคเบิลเพียงเส้นเดียวสามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในสายเคเบิลอื่น โดยเฉพาะในสายเคเบิลที่อยู่ใกล้บริเวณที่เกิดความเสียหาย ซึ่งต้องรับแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อมีการสูญเสียสายเคเบิลมากกว่าหนึ่งเส้น แรงภายในโครงสร้างจะถูกกระจายไปยังสายเคเบิลในกลุ่มอื่นแบบไม่สมมาตร และบางกรณียังพบพฤติกรรมการถ่ายแรงข้ามกลุ่ม ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะการตอบสนองของโครงสร้างที่ไม่เป็นเชิงเส้นและซับซ้อน ผลลัพธ์จากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการประเมินพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้สถานการณ์ไม่พึงประสงค์ เช่น การสูญเสียสายเคเบิล เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการซ่อมแซม เสริมกำลัง หรือบูรณะสะพานที่มีอายุการใช้งานยาวนานให้สามารถใช้งานได้อย่างมั่นคงและปลอดภัยในระยะยาว

อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มความครอบคลุมและความสมบูรณ์ของการวิเคราะห์ ควรดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโอกาสและความน่าจะเป็น

ของการสูญเสียสายเคเบิลในลักษณะต่าง ๆ ตลอดจนการพิจารณากรณีศึกษาที่มีรูปแบบการสูญเสียสายเคเบิลแบบสลับเส้น เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างในสถานะที่ซับซ้อนและใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ กรมทางหลวง และบุคลากรที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลของสะพาน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในความเอื้อเฟื้ออุปการภ์ และเครื่องมือทดสอบตลอดจนเป็นสถานที่ในการศึกษาปฏิบัติการตั้งแต่นั้นจนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 4th Edition*. Washington, DC.
- [2] Department of Highways. (1935). *Design Specifications for Highway Bridges and Incidental Structures*, Olympia, Washington.
- [3] รศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว, มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา. (2558). *การออกแบบสะพาน*. กรุงเทพฯ: บริษัท จูน พับลิชชิง จำกัด.
- [4] สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง. (2563). *โครงการศึกษาจัดทำแนวทางบูรณะสะพานก่อนประวัติศาสตร์ของกรมทางหลวงที่ก่อสร้างก่อนปี พ.ศ.2500*. บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด.
- [5] ASTM. (2012). *Standard specification for uncoated high-strength steel bars for prestressing concrete*. ASTM A722/A722M.
- [6] Chen, Q., Wang, H., El-Tawil, S., Agrawal, A. K., Bhattacharya, B., & Wong, W. (2024). *Behavior of a Network Tied-Arch Bridge Subjected to Sudden Hanger Loss Scenarios*. Journal of Bridge Engineering.
- [7] Nakamura, S., & Miyachi, K. (2021). *Ultimate Strength and Chain-Reaction Failure of Hangers in Tied-Arch Bridges*. Structural Engineering International.
- [8] Zdenka Procházková, Jan Červenka, Zdeněk Janda, Dobromil Pryl, Jitka Mikolášková. (2019). *ATENA Program Documentation (ATENA Science – GiD Tutorial)*, Červenka Consulting s.r.o.
- [9] กองแบบแผน, กรมทางหลวง, *แบบก่อสร้างสะพาน*.
- [10] Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka. (2022). *ATENA Program Documentation (Theory)*, Červenka Consulting s.r.o.