

# การใช้แถบยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดเสาตอม่อ สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชิษญาส์ บุญมี<sup>1</sup> ปรัชญา ยอดดำรงค์<sup>2\*</sup> ณัฐวุฒิ ไชยวิโน<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร,  
ประเทศไทย

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
วิทยาเขตอุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

<sup>3</sup>ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, ประเทศไทย

\*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : pruchaya\_yo@rmutto.ac.th

รับต้นฉบับ : 1 เมษายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 16 กรกฎาคม 2567; ตอปรับบทความ : 7 สิงหาคม 2567

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2567

## บทคัดย่อ

การซ่อมบำรุงและเสริมกำลังเสาตอม่อสะพานที่ชำรุดจากการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมนั้นได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง มีการนำเสนอวิธีการหลายวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเสริมกำลังมีราคาค่อนข้างสูง ในบางกรณีการใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาง่ายและมีราคาต่ำเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนเสาตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรง โดยจำลองเสาที่มีขนาดเทียบเท่าเสาตอม่อของสะพานที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของกรมทางหลวง เสาตัวอย่างควบคุมมีปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ 1.2% ซึ่งเป็นปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดในเสาตอม่อที่ใช้งานจริง ตัวอย่างเสา 3 ต้น ถูกทดสอบภายใต้แรงดัดและแรงอัดตามแนวแกน โดยแต่ละตัวอย่างมีวิธีการเสริมกำลังแตกต่างกัน ประกอบด้วย การเสริมเหล็ก 100% ของปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด การเสริมเหล็ก 25% ของปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด และการเสริมเหล็ก 25% ของปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดพร้อมทั้งเสริมแถบยางพาราอัดแรง จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรงสามารถเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดได้ถึง 46.5% และผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองโดยโปรแกรม Response-2000 แสดงค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ

**คำสำคัญ :** สะพาน แผ่นยางพารา การเสริมกำลัง



# The Use of Prestressed Rubber Pads for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Pier

Chichaya Boonmee<sup>1</sup> Pruchaya Yoddumrong<sup>2\*</sup> Natawut Chaiwino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

<sup>2\*</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthen Thawai Campus, Bangkok, Thailand

<sup>3</sup>Department of Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

\*Corresponding Author. E-mail address: pruchaya\_yo@rmutto.ac.th

Received: 1 April 2024; Revised: 16 July 2024; Accepted: 7 August 2024

Published online: 26 December 2024

## Abstract

Repairing and strengthening damaged bridge piers with the loss of the cross-sectional area of the rebar due to rusting has been studied extensively. Several effective methods have been proposed and are widely used. However, most of the materials used for strengthening are quite expensive. Locally available and low-cost materials sometimes are more appropriate alternatives for structural reinforcement. This research aims to study flexural behavior of reinforced concrete bridge piers strengthened using prestressed rubber pads. Samples replicated existing piers of bridges under the responsibility of the Department of Highways were constructed. The percentage of rebars in the control specimen is 1.2%, equal to the minimum percentage of rebars in the existing bridge piers. Three samples were tested under flexure and axial load. Each test specimen had a different reinforcement quantity and approach consisting of 100% of the minimum steel reinforcement amount, 25% of the minimum steel reinforcement amount, and 25% of the minimum steel reinforcement amount along with prestressed rubber pads. The test results showed that strengthening of bridge piers using prestressed rubber pads can increase flexural strength by 46.5% and the analysis results from Response-2000 software provided the flexural capacities of the specimens relevant to those from the experiment.

**Keywords:** Bridge, Rubber pad, Strengthening

## 1) บทนำ

ในปัจจุบันภาครัฐให้ความสำคัญกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างมาก โดยเฉพาะการสร้างระบบโครงสร้างเพื่อการคมนาคม ได้แก่ ถนน อุโมงค์ สะพาน เป็นต้น ในประเทศไทย สะพานถือเป็นหนึ่งในสิ่งก่อสร้างที่มีการสร้างขึ้นจำนวนมากและหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสะพานเหล่านี้ได้มีการก่อสร้างและใช้งานมาอย่างยาวนานส่งผลให้โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพ

เป็นที่ทราบกันดีว่าปริมาณการใช้งานและน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น หรือบางครั้งมีการบรรทุกเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด รวมถึงผลกระทบจากภัยธรรมชาติ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ความสามารถใช้งาน ตลอดจนความทนทานของสะพาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องซ่อมบำรุงสะพานด้วยการเสริมกำลังโครงสร้าง ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงและเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก โดยมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีแฉีกเกิดคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีแฉีกเกิดเหล็ก วิธีลวดอัดแรงภายนอก เป็นต้น [1]–[4] อย่างไรก็ตามวิธีที่ได้รับการยอมรับสูงในปัจจุบันคือการใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนเสริมกำลัง (Carbon fiber reinforced polymer: CFRP) เพราะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทนทานและติดตั้งง่าย อีกทั้งมีงานวิจัยจำนวนมากบ่งชี้ว่าเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการเสริมกำลังสามารถใช้ได้กับโครงสร้างหลายประเภทและต้านทานแรงกระทำได้หลายชนิดทั้งแรงอัด แรงดัดและแรงเฉือน [5]–[10] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างโดยการนำแถบเส้นใยคาร์บอนมาอัดแรง (Prestressed CFRP plate) เพื่อให้ระบบการเสริมกำลังทำงานทันทีซึ่งเป็นการเสริมกำลังเชิงรุก (Active strengthening) และเพื่อดัดศักยภาพของวัสดุมาใช้ งานได้มากขึ้น [11], [12] แต่ข้อเสียคือแผ่นเส้นใยคาร์บอนมีราคาสูงมาก จึงไม่เหมาะกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีงบประมาณจำกัด

สะพานในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงจำนวนมากที่ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลหรือแม่น้ำประสบปัญหาการแตกร้าวและหลุดล่อนของคอนกรีตต่อม่อสะพาน ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักและความปลอดภัยในการใช้งานสะพาน โดยหนึ่งในสาเหตุหลักเกิดจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมถูกกัดกร่อนและเป็นสนิม ปริมาตรของเหล็กที่เป็นสนิมจะเพิ่มขึ้นจึงเกิดแรงดันคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแตกและหลุดล่อนจากภายใน ดังแสดงในรูปที่ 1

การป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมจากการแทรกซึมของคลอไรด์เพื่อแก้ปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตต่อม่อสะพานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้มีความที่บ่มมากขึ้นโดยใส่สารผสมเพิ่มการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยสารกันน้ำจำพวกซิลาน (Silane) [13] หรือการป้องกันเหล็กเสริมโดยตรง เช่น การใช้เหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซี (Epoxy) หรือการใช้เหล็กเสริมกัลวาไนซ์ (Galvanized steel) อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูงและเหมาะกับงานก่อสร้างใหม่ เมื่อนำมาใช้กับงานซ่อมแซมมักเกิดความบกพร่องในการเชื่อมประสานโครงสร้างใหม่กับโครงสร้างเดิม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันเหล็กเสริมของแต่ละวิธีมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นการนำวิธีดังกล่าวมาใช้ซ่อมต่อม่อสะพานที่แตกร้าวเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเสาเรียงขนาดเล็กหน้าตัด  $40 \times 40$  ซม. สำหรับรองรับสะพานช่วงสั้นจึงไม่คุ้มค่า ปัจจุบันกรมทางหลวงซ่อมต่อม่อสะพานประเภทเสาเรียงด้วยวิธีการสกัดคอนกรีตส่วนที่แตกร้าวออก ในกรณีที่จำเป็นจะทำการตัดต่อเปลี่ยนเหล็กเสริมที่เกิดสนิม จากนั้นจะเทคอนกรีตซ่อมแซมส่วนที่สกัดออกโดยเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตให้หนาขึ้นเพื่อชะลอการแทรกซึมของคลอไรด์ที่จะไปสู่เหล็กเสริม อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้แก่โครงสร้างด้วย อีกทั้งคอนกรีตบริเวณที่เพิ่มระยะหุ้มมีความเสี่ยงที่จะแตกร้าวเนื่องจากการโก่งตัวของเสา ซึ่งจะทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตง่ายขึ้น การป้องกันด้วยวิธีนี้จึงยังไม่เห็นผลชัดเจนต่อม่อเสาเรียงหลายแห่งที่ได้รับการซ่อมแซมโดยการเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตยังคงแตกร้าวเนื่องจากคลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมหลังจากซ่อมแซมเสร็จได้เพียงไม่นาน



รูปที่ 1 : การแตกร้าวของคอนกรีตต่อม่อสะพาน

การซ่อมบำรุงสะพานจำเป็นที่จะต้องของงบประมาณประจำปี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาค่อนข้างมาก ทำให้สะพานที่ชำรุดบางแห่งต้องปิดการใช้งานหรือจำกัดการใช้งานเพื่อความปลอดภัย ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างหรือซ่อมแซมสะพานแบบชั่วคราวแต่เร่งด่วนจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยวิธีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมนั้นต้องไม่ซับซ้อนและหน่วยงานราชการที่รับผิดชอบสามารถดำเนินการได้ทันทีโดยไม่ต้องรออนุมัติงบประมาณในการจ้างบุคคลภายนอก

การนำวัสดุที่หาง่ายและมีราคาถูกในประเทศมาใช้ทดแทนในการเสริมกำลังชิ้นส่วนต่อม่อสะพานแบบชั่วคราวถือเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ดี ซึ่งในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับการนำยางพารามาใช้ประโยชน์กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากยางพารามีราคาถูกภาครัฐจึงให้ความสำคัญในการพัฒนาวัสดุยางพาราเพื่อนำมาเพิ่มมูลค่า อีกทั้งยางพาราเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสามารถเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น ช่วยลดการแตกร้าวของชิ้นส่วนโครงสร้าง และช่วยลดการสั่นไหวของคานได้ [14], [15] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนายางพาราเพื่อนำมาเสริมกำลังโครงสร้างยังมีอยู่อย่างจำกัด

เสาตอม่อสะพานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นโครงสร้างสะพานที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานและแพร่หลายทั่วประเทศ การออกแบบวิธีการเสริมกำลังเบื้องต้นให้กับสะพานชนิดนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ทำให้สะพานสามารถใช้งานต่อได้ชั่วคราวอย่างปลอดภัยระหว่างรออนุมัติงบประมาณในการซ่อมแซมอย่างถาวรต่อไป

## 2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำวัสดุยางพาราอัดแรงมาใช้เสริมกำลังของโครงสร้างเสาสะพานโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ภายใต้แรงดัดของชิ้นส่วนเสาตอม่อสะพานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เหล็กเสริมภายในเกิดความเสียหายรุนแรงแต่ไม่มีการเสริมกำลัง และเหล็กเสริมภายในเกิดความเสียหายรุนแรงแล้วมีการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราอัดแรง โดยเปรียบเทียบกับเสาตอม่อสะพานที่ไม่มีความเสียหายรวมถึงเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาตอม่อสะพานโดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ

## 3) วิธีดำเนินการวิจัย

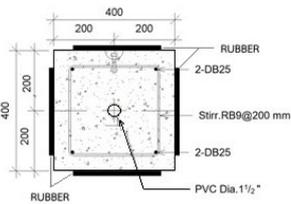
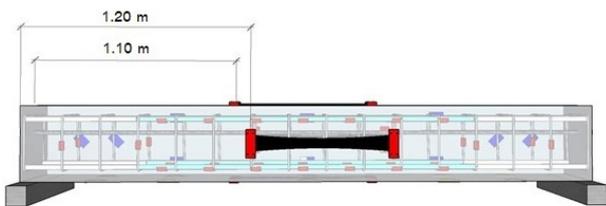
เสาที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ซึ่งกำหนดขนาดตามขนาดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของสะพานจากกรมทางหลวงเท่ากับ  $40 \times 40 \times 300$  ซม. การเสริมเหล็กตามยาวและเหล็กตามขวางในงานวิจัยนี้เป็นไปตามแบบก่อสร้างของกรมทางหลวงโดยมีการกลึงลดขนาดเหล็กเสริมตามยาวช่วงกึ่งกลางเสาในบางตัวอย่างทดสอบเพื่อจำลองความเสียหายและการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริม เหล็กเสริมตามยาวและตามขวางเป็นเหล็กเกรด SD40 และ SR24 ตามลำดับ เสาตัวอย่างควบคุมมีจำนวน 1 ต้น (รหัสตัวอย่างคือ C-100) ซึ่งไม่ได้กลึงลดขนาดเหล็กเสริมและมีปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ 1.2% การกลึงลดขนาดเหล็กเสริมให้พื้นที่หน้าตัดลดลงเหลือ 25% จะทำในช่วงกึ่งกลางเสาเป็นระยะเท่ากับ 60 ซม. และทาสีลิโคเนในช่วงที่กลึงลดขนาดเพื่อลดแรงยึดเกาะระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต เหล็กเสริมที่กลึงแล้วแสดงดังรูปที่ 2 ตัวอย่างเสาทดสอบที่ลดปริมาณเหล็กเสริมมีจำนวน 2 ต้น โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเสาที่ไม่มีการเสริมและมีการเสริมแถบยางพาราอัดแรง (รหัสตัวอย่างทดสอบคือ C-25 และ C-25R ตามลำดับ) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้แถบยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังโครงสร้างเสา ตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 3 ต้น รับแรงอัดตามแนวแกน 4 ต้น จากลวดอัดแรงเพื่อจำลองการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน รายละเอียดตัวอย่างเสาแสดงในตารางที่ 1 และรายละเอียดตัวอย่าง C-25 แสดงดังรูปที่ 3 การเสริมกำลังชิ้นส่วนสะพานด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงได้ถูกออกแบบและทดสอบการใช้งานมาแล้วหลายรูปแบบจนกระทั่งได้วิธีการที่เหมาะสม โดยแผ่นยางพาราจำนวน 4 แผ่น ซึ่งเป็นแผ่นยางเกรด Hardness 60 ขนาดกว้าง 20 ซม. x ยาว 50 ซม. x หนา 4 ซม. ถูกติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางเสาคอนกรีตตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน โดยขั้นตอนการติดตั้งเริ่มจากการนำแผ่นยางพารามาตั้งให้มีการยึดตัวเป็น 2 เท่า จากความยาวเดิมด้วยแม่แรงไฮดรอลิกและติดอุปกรณ์จับยึดแบบชั่วคราวเพื่อให้แผ่นยางมีการยึดตัวค้างไว้ จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์จับยึดแบบถาวรอีกชุดเพื่อยึดแผ่นยางกับตัวอย่างทดสอบด้วยสลักเกลียว แล้วจึงปลดอุปกรณ์จับยึดชั่วคราวออกเพื่อให้แผ่นยางพาราคืนตัวและถ่ายแรงเข้าสู่เสา แถบยางพาราที่ติดตั้งด้านบนและด้านล่างจะตรงกันและมีตำแหน่งเยื้องจากแถบยางที่ติดตั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นระยะ 10 ซม. เพื่อป้องกันการเกาะของคอนกรีตหุ้มเสา ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 : รายละเอียดตัวอย่างเสาทดสอบ

| ตัวอย่างทดสอบ | ขนาดเสาทดสอบ (ซม.) | เหล็กเสริมตามยาว | ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวช่วงกลางเสา (ซม <sup>2</sup> ) | เหล็กเสริมตามขวาง | แรงอัดตามแนวแกน (ตัน) | จำนวนแผ่นยางพาราอัดแรง |
|---------------|--------------------|------------------|--|-------------------|-----------------------|------------------------|
| C-100         | 40x40x300          | 4-DB25           | 19.6   | RB9@20 ซม.        | 4                     | -                      |
| C-25          | 40x40x300          | 4-DB25           | 4.9  | RB9@20 ซม.        | 4                     | -                      |
| C-25R         | 40x40x300          | 4-DB25           | 4.9  | RB9@20 ซม.        | 4                     | 4                      |



รูปที่ 2 : เหล็กเสริมที่กลึงช่วงกึ่งกลาง



รูปที่ 3 : รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

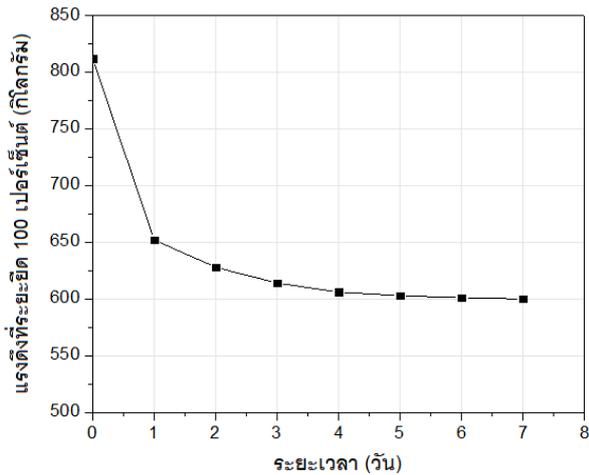


รูปที่ 4 : ตัวอย่างทดสอบที่ติดตั้งแผ่นยางพาราอัดแรง

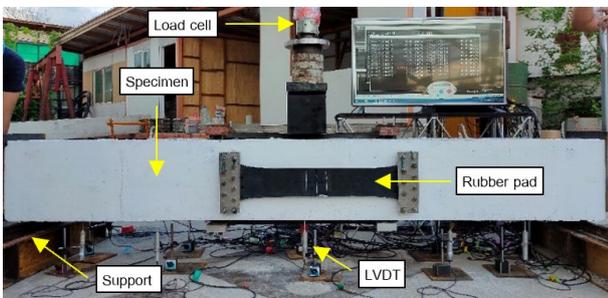
ตารางที่ 2 : คุณสมบัติของวัสดุ

| คุณสมบัติ                                       | ค่าเฉลี่ย (กก./ซม <sup>2</sup> ) |
|---|----------------------------------|
| กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ( $f'_c$ )             | 242                              |
| กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว ( $f_y$ ) | 5074                             |
| กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมตามยาว ( $f_u$ )     | 6110                             |
| กำลังดึงประลัยของแผ่นยางพารา ( $f_{u,r}$ )      | 10.2                             |

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยกำลังอัดประลัยเฉลี่ยของคอนกรีต กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยที่จุดครากและกำลังรับแรงดึงประลัยเฉลี่ยของเหล็กเสริม รวมถึงกำลังรับแรงดึงประลัยของแถบยางพาราที่ได้จากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบแถบยางพารา 3 ตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่าแถบยางพาราสามารถรับแรงดึงได้ประมาณ 800 กิโลกรัม ที่ระยะยืด 100% โดยหากยืดเกินระยะนี้แผ่นยางจะเสียรูปมาก ทำให้ไม่เหมาะต่อการติดตั้งกับโครงสร้าง [15] ในการใช้งานจริงแถบยางพาราจะถูกยึดติดกับโครงสร้างเป็นระยะเวลานาน เมื่อเวลาผ่านไปแผ่นยางพาราที่ถูกดึงค้างไว้จะมีการเสื่อมถอยของแรงดึงหรือมีการคลายตัวของแผ่นยาง จากการทดสอบการค้างแรงดึงเป็นเวลา 7 วัน พบว่าแรงดึงในแผ่นยางลดลงมากในช่วง 3 วันแรก และค่อนข้างคงที่เมื่อผ่านไป 5 วัน โดยแรงดึงลดลงเหลือ 75% ของแรงดึงตั้งต้นเมื่อครบ 7 วัน [16] ดังนั้นในการใช้งานจริงจะพิจารณาแรงดึงในแถบยางเท่ากับ 600 กิโลกรัม รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ลดลงในแผ่นยางและระยะเวลาหลังจากเริ่มดึงแผ่นยาง



รูปที่ 5 : ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงแผ่นยางและเวลา [16]



รูปที่ 6 : การติดตั้งการทดสอบ

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของเสาสะพานถูกออกแบบให้ตัวอย่างเสารับแรงอัดคงที่จากลวดอัดแรง และรับโมเมนต์ดัดโดยวางเสาในแนวราบและให้แรงกระทำในแนวตั้งที่กึ่งกลางเสาด้วยแม่แรงไฮดรอลิก เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการควบคุมการทดสอบ ตัวอย่างเสาวางบนฐานรองรับซึ่งอยู่ที่ปลายทั้งสองด้านโดยไม่ได้ยึดติดกับฐานรองรับ ทำให้สามารถหมุนและเคลื่อนที่ในแนวราบได้จึงมีลักษณะเหมือนคานอย่างง่าย ระยะการแอนตัวของเสาถูกวัดด้วย LVDT (Linear variable differential transformer) ซึ่งติดตั้งทั้งหมด 5 ตัว ที่บริเวณฐานรองรับทั้ง 2 ฝั่ง บริเวณห่างจากฐานรองรับ 1 ใน 4 ของความยาวเสา และบริเวณกึ่งกลางเสา การติดตั้งการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 การทดสอบเริ่มโดยให้แรงกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงขึ้นอย่างช้า ๆ กระทั่งเสาไม่สามารถรับแรงกระทำเพิ่มได้อีก แรงกระทำและระยะแอนตัวของเสาถูกบันทึกตลอดช่วงการทดสอบเพื่อนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและระยะแอนตัว นอกจากนี้

รูปแบบและขนาดของรอยร้าวของเสาถูกบันทึกและใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างด้วย

ในการศึกษานี้นอกจากการทดสอบแล้วได้มีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดและระยะแอนตัวของตัวอย่างเสาทดสอบทั้ง 3 แบบถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Response-2000 ที่พัฒนาโดย Evan C. Bentz ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์หน้าตัดแบบไม่เชิงเส้นบนพื้นฐานของทฤษฎี Modified compressive field theory โดยมีสมมติฐานว่าระยะหน้าตัดของชิ้นส่วนยังคงรักษาระนาบภายใต้แรงกระทำ และความเค้นอัดหลักของคอนกรีต  $f_{c2}$  สัมพันธ์กับทั้งความเครียดอัดหลัก  $\epsilon_2$  และความเครียดดึงหลัก  $\epsilon_1$  [17] โดยความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (1)

$$f_{c2} = \frac{f'_c}{0.8+170\epsilon_1} \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon'_c} \right) - \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

เมื่อ  $f'_c$  คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ  $\epsilon'_c$  คือความเครียดที่กำลังอัดประลัยโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ -0.002

ในการจำลองนี้กำหนดให้มวลรวมหยาบของคอนกรีตมีขนาด 19 ม.ม. (3/4 นิ้ว) และใช้แบบจำลอง Popovics Thorenfeldt และ Collins ทำนายพฤติกรรมของคอนกรีต กำหนดให้กำลังสูงสุดของเหล็กเสริมสูงกว่ากำลังที่จุดคราก 50% และความเครียดเท่ากับ 10% ที่ความเค้นสูงสุด [18] ลวดอัดแรงจำลองด้วยแรงอัดตามแนวแกน 4 ต้น กระทำที่จุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดเสา แผ่นยางพาราอัดแรงที่ผิวด้านข้างของเสาถูกจำลองอย่างง่ายด้วยแรงอัดตามแนวแกนที่จุดเซนทรอยด์และโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงกระทำเอียงศูนย์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเสามีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงทั้ง 4 ด้าน จึงทำให้โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงเอียงศูนย์หักล้างกันหมด การจำลองการเสริมกำลังอย่างง่ายนี้ไม่ได้คำนึงถึงหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปในแผ่นยางเมื่อเสามีการแอนตัว เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นยางพารามีค่าต่ำมากและการเสียรูปของแผ่นยางเกิดขึ้นน้อยทำให้การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในแผ่นยางมีค่าน้อยมากสำหรับเหล็กเสริมตามยาวที่มีการสูญเสียหน้าตัดเฉพาะช่วงกลางเสาได้ถูกจำลองโดยการลดพื้นที่หน้าตัดตลอดทั้งเส้น โดยถือว่าการจำลองอย่างง่ายนี้มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการวิเคราะห์กำลังของหน้าตัดที่กึ่งกลางเสาซึ่งเป็นหน้าตัดที่จะเกิดการวิบัติ การวิเคราะห์นี้ไม่พิจารณาการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตช่วงกึ่งกลางเสาเนื่องจากมีผลกระทบน้อยและโปรแกรมมีข้อจำกัดในการกำหนดค่าแรงยึดเหนี่ยว

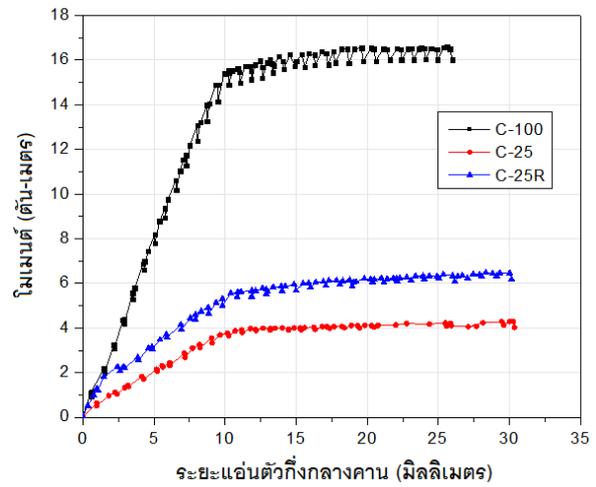
4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1) แรงดัดสูงสุดและรูปแบบการแตกร้าวจากการทดสอบ

แรงดัดหรือโมเมนต์ดัดที่ตัวอย่างเสาทดสอบสามารถรับได้จะสัมพันธ์กับความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาต่อม่อสะพานในสภาพการใช้งานจริง ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะแอนตัวของตัวอย่างเสาที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 เส้นกราฟของเสาทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง มีพฤติกรรมคล้ายกันโดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น 2 ช่วง ที่มีความชันไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาในช่วงแรกเส้นกราฟระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะแอนตัวที่กึ่งกลางของเสา C-100 มีความชันมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุดทำให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ในขณะที่ C-25R มีความชันรองลงมาเนื่องจากมีปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ C-25 แต่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงทำให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่า C-25 อย่างไรก็ตามในแง่ของความแข็งตึง (Stiffness) การเสริมแผ่นยางพาราอัดแรงไม่สามารถทดแทนปริมาณเหล็กเสริมของเสาที่ลดลงเหลือ 25% ได้เมื่อเพิ่มแรงดัดมากขึ้นกระทั่งระยะแอนตัวที่กึ่งกลางของเสามีค่าประมาณ 10 มม. เส้นกราฟของทุกตัวอย่างทดสอบมีความชันลดลงฉับพลันเนื่องจากแรงดัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมสูงขึ้นถึงค่าความเครียดดัดประลัย (Ultimate tensile strain) จากเส้นกราฟในช่วงที่ 2 พฤติกรรมของทุกตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเหมือนกันคือมีการแอนตัวเพิ่มขึ้นมากเมื่อเพิ่มแรงดัดเพียงเล็กน้อย และเมื่อแรงกระทำเพิ่มถึงจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสา เสาทดสอบทุกต้นไม่เกิดการวิบัติแบบฉับพลันซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมแบบเหนียว โดยเกิดการครากของเหล็กเสริมภายในเสาทุกต้นก่อนเกิดการวิบัติของเสา

กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของเสาตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 จากข้อมูลพบว่าตัวอย่างเสา C-25 ซึ่งเหล็กเสริมภายในมีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ทำให้มีกำลังรับโมเมนต์

ดัดประลัยลดลง 73.8% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม C-100 ในขณะที่ตัวอย่าง C-25R ซึ่งเหล็กเสริมภายในเกิดความเสียหายรุนแรงและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเช่นเดียวกัน แต่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรง มีกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยสูงกว่า C-25 เท่ากับ 2 ตัน-เมตร หรือคิดเป็น 46.5% ดังนั้นสำหรับเสาต่อม่อสะพานที่เหล็กเสริมภายในมีความเสียหายรุนแรง การใช้แผ่นยางพาราอัดแรงมาเสริมกำลังสามารถเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดได้ดี



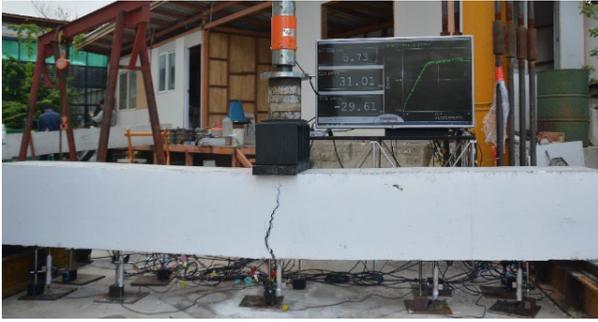
รูปที่ 7 : ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะแอนตัว



รูปที่ 8 : รูปแบบการแตกร้าวของ C-100 ที่กำลังดัดประลัย

ตารางที่ 3 : ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

| ตัวอย่างทดสอบ | กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่กึ่งกลางเสา (การทดสอบ), $M_{exp}$ , ตัน-เมตร | กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดที่กึ่งกลางเสา (แบบจำลอง), $M_{num}$ , ตัน-เมตร | ความคลาดเคลื่อน, $M_{num}/M_{exp}$ |
|---------------|---|---|------------------------------------|
| C-100         | 16.4  | 16.7  | 1.02                               |
| C-25          | 4.3   | 5.1   | 1.19                               |
| C-25R         | 6.3   | 5.7   | 0.90                               |



รูปที่ 9 : รูปแบบการแตกร้าวของ C-25 ที่กำลังตัดประลัย



รูปที่ 10 : รูปแบบการแตกร้าวของ C-25R ที่กำลังตัดประลัย

รูปแบบและการพัฒนารอยร้าวของตัวอย่าง C-100 เริ่มจากเกิดรอยร้าวขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางเสา จากนั้นรอยร้าวเพิ่มจำนวนและมีขนาดยาวขึ้นเมื่อเพิ่มแรงกระทำ โดยขยายจากด้านล่างสู่ด้านบนเป็นแนวตรงซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัด เมื่อแรงกระทำเพิ่มถึงจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดประลัยพบว่ามียอยร้าวจำนวนมากกระจายเป็นบริเวณกว้างแต่มีลักษณะเอียงและขยายตัวเข้าสู่กึ่งกลางเสา ซึ่งเป็นการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 8 ตัวอย่างเสา C-25 มียอยร้าวเกิดขึ้นบริเวณกลางเสาในช่วงต้นของการทดสอบ รอยร้าวมีขนาดกว้างขึ้นและขยายยาวขึ้นด้านบนเป็นแนวตรงเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัด อย่างไรก็ตามรอยร้าวจะเกิดเฉพาะบริเวณกึ่งกลางเสาและมีความกว้างมากกว่ารอยร้าวของ C-100 ดังแสดงในรูปที่ 9 สาเหตุที่รอยร้าวไม่กระจายตัวเนื่องจากเหล็กเสริมช่วงกลางเสา C-25 สูญเสียพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต ทำให้มีความเครียดดึงสูงกว่าบริเวณอื่น ในขณะที่เสาเสริมกำลัง C-25R มียอยร้าวเริ่มต้นที่บริเวณกึ่งกลางเสา และเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นพบว่ารอยร้าวขยายตัวจากด้านล่างสู่ด้านบนเป็นแนวตรงซึ่งเป็นผลจากโมเมนต์ดัด เมื่อเพิ่มแรงจนสิ้นสุดการทดสอบพบว่ามียอยร้าวขนาดใหญ่บริเวณกึ่งกลางเสาคือรอยร้าวของ C-25 แต่มีรอยร้าวขนาดเล็ก

กระจายตัวนอกบริเวณที่มีการเสริมแผ่นยางพาราด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 สาเหตุเนื่องจากแรงอัดจากแผ่นยางพาราช่วยลดความเครียดดึงช่วงกลางเสา ทำให้เกิดการชะลอการแตกร้าวในช่วงดังกล่าว

#### 4.2) การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการแสดงในตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบและจากแบบจำลองของตัวอย่างเสาทดสอบ C-100 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงด้วยค่าอัตราส่วน  $M_{num}/M_{exp}$  เท่ากับ 1.02 โดยค่า 1.00 หมายถึงมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดหรือค่าที่ได้จากการทดสอบเท่ากับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ขณะที่ตัวอย่าง C-25 และ C-25R มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 1.19 และ 0.90 ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนของตัวอย่าง C-25 เป็นผลจากการกำหนดให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตในแบบจำลองเป็นแรงยึดเหนี่ยวแบบสมบูรณ์ แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจึงสามารถถ่ายไปที่คอนกรีตบริเวณใกล้เคียงได้ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ สำหรับตัวอย่าง C-25R ที่มีค่าอัตราส่วนความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1.00 แปลว่าค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดจากแบบจำลองต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งวิธีการจำลองแผ่นยางพาราอัดแรงอย่างง่ายที่ใช้ในนั้นทำให้อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนจาก 1.19 เป็น 0.90 คิดเป็น 24.4% แสดงให้เห็นว่าวิธีการจำลองแผ่นยางพาราอัดแรงมีความแม่นยำไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามการจำลองอย่างง่ายนี้มีความสะดวกรวดเร็วและมีความคลาดเคลื่อนไปในทางที่ปลอดภัย

#### 5) สรุปผล

จากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข การนำแถบยางพาราอัดแรงมาใช้เสริมกำลังเสาตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมภายในเสาตอม่อสะพานสามารถส่งผลให้กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยและความแข็งดึงของเสาตกลงมาก แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความเหนียวของเสาอย่างมีนัยสำคัญ
2. การนำแผ่นยางพาราอัดแรงมาใช้ในการเสริมกำลังเสาตอม่อคอนกรีตที่เหล็กเสริมภายในเสียหายรุนแรงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ

โดยสามารถเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของเสาได้ถึง 46.5% เมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้รับการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง

3. การเสริมกำลังเสาตอม่อด้วยแผ่นยางพาราอัดแรงทำให้ความแข็งแรงของเสาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นยางพารามีค่าต่ำมาก

4. รูปแบบการแตกร้าวของทุกเสาทดสอบมีความแตกต่างกัน การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมภายในทำให้เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่และเกิดเฉพาะบริเวณที่เหล็กเสริมเสียหาย การเสริมแผ่นยางพาราอัดแรงสามารถลดขนาดรอยร้าวและชะลอการแตกร้าวในบริเวณที่เสริมกำลังได้

5. ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในด้านกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยมีความสอดคล้องกันดี โดยเฉพาะตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราอัดแรง สำหรับวิธีการจำลองแผ่นยางพาราอัดแรงที่ใช้จนถึงแม้จะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำไม่สูงมาก แต่การจำลองอย่างง่ายนี้ช่วยลดความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองและลดเวลาในการประมวลผล อีกทั้งแบบจำลองอย่างง่ายนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อนไปในทางที่ปลอดภัย

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมทางหลวง ผู้สนับสนุนทุนวิจัย และทีมนักวิจัยจากศูนย์วิจัยเฉพาะทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่มีส่วนช่วยในการทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยนี้

#### REFERENCES

- [1] A. M. Sayed, M. M. Rashawn, and M. E. Helmy, "Experimental behavior of cracked reinforced concrete columns strengthened with reinforced concrete jacketing," *Materials*, vol. 13, no. 12, Jun. 2020, Art. no. 2832.
- [2] A. He, J. Cai, Q.-J. Chen, X. Liu, and J. Xu, "Behavior of steel-jacket retrofitted RC columns with preload effects," *Thin-Walled Struct.*, vol. 109, pp. 25–39, Dec. 2016.
- [3] S. Raza, M. K. I. Khan, S. J. Menegon, H.-H. Tsang, and J. L. Wilson, "Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: State-of-the-art review," *Sustainability*, vol. 11, no. 11, Jun. 2019, Art. no. 3208.
- [4] L. Leicht, C. L. Roberts-Wollmann, I. Koutouros, M. H. Hebdon, and O. Mosig, "Experimental and analytical investigation of a 64-year-old prestressed beam retrofitted with external posttensioning," *J. Bridge Eng.*, vol. 27, no. 4, Apr. 2022, Art. no. 04022015.
- [5] A. S. Mosallam and K. M. Mosalam, "Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates," *Construction Building Mater.*, vol. 17, no. 1, pp. 43–54, Feb. 2003.
- [6] M. Di Ludovico, A. Prota, G. Manfredi, and E. Cosenza, "FRP strengthening of full-scale PC girders," *J. Composites Construction*, vol. 14, no. 5, pp. 510–520, Feb. 2010.
- [7] A. Godat and O. Chaallal, "Strut-and-tie method for externally bonded FRP shear-strengthened large-scale RC beams," *Composite Struct.*, vol. 99, pp. 327–338, May 2013.
- [8] Y. Yang *et al.*, "Emergency repair of an RC bridge column with fractured bars using externally bonded prefabricated thin CFRP laminates and CFRP strips," *Composite Struct.*, vol. 133, pp. 727–738, Dec. 2015.
- [9] M. Chellapandian and S. S. Prakash, "Rapid repair of severely damaged reinforced concrete columns under combined axial compression and flexure: An experimental study," *Construction Building Mater.*, vol. 173, pp. 368–380, Jun. 2018.
- [10] C. Tan, J. Xu, and R. S. Aboutaha, "Bridge pier extension with carbon-fiber reinforced polymer flexural reinforcement: Experimental tests and three-dimensional finite element modeling," *ACI Struct. J.*, vol. 118, no. 1, pp. 251–262, Jan. 2021.
- [11] J. Michels *et al.*, "Prestressed CFRP strips for concrete bridge girder retrofitting: Application and static loading test," *J. Bridge Eng.*, vol. 21, no. 5, 2016, Art. no. 04016003.
- [12] Y. Deng *et al.*, "Strain driven mode-switching analytical framework for estimating flexural strength of RC box girders strengthened by prestressed CFRP plates with experimental validation," *Eng. Struct.*, vol. 286, Jul. 2023, Art. no. 116084.
- [13] J. Bao *et al.*, "Influence of exposure environments and moisture content on water repellency of surface impregnation of cement-based materials," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 12115–12125, 2020.



- [14] N. Channarong and K. Rodsin, "The application of pre-tensioned rubber pads in vibration suppression of prestressed concrete beams," (in Thai), in *Proc. 28th Nat. Conv. Civil Eng.*, Phuket, Thailand, May 2023, pp. 576–581.
- [15] C. Boonmee and K. Rodsin, "Static behavior of a plank girder strengthening by pre-stressed rubber pads," (in Thai), *J. Ind. Technol. Suan Sunandha Rajabhat Univ.*, vol. 7, no. 1, pp. 71–82, 2019.
- [16] S. Somboonbab and K. Rodsin, "Strengthening of a PC-plank girder using pre-stressed rubber pads," in *Proc. 24th Nat. Conv. Civil Eng.*, Udonthani, Thailand, Jul. 2019, pp. 162–167.
- [17] F. J. Vecchio and M. P. Collins, "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear," *ACI J.*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986.
- [18] E. C. Bentz, "Sectional analysis of reinforced concrete members," Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng., Univ. Toronto, Ontario, Canada, 2000. [Online]. Available: <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/13811/1/NQ49840.pdf>