



พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว
ระบบอัดแรงภายนอก

FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH
EXTERNAL POSTTENSION GFRP REBARS

ก้องทัฬห ชินวานิช¹, ชนะชัย ทองโฉม^{2*}, ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี³ และเพ็ญพิชชา สนิทอินทร์^{4*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

^{2*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

^{4*}อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

*Corresponding author, E Mail: tchanach@engr.tu.ac.th, fengppcs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีการเสริมกำลังโดยวิธีอัดแรงภายนอกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในปัจจุบัน การเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาทดแทนลวดเหล็กอัดแรง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการกัดกร่อน และเพิ่มความทนทาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วระบบอัดแรงภายนอก ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนร้อยละที่เหมาะสมกับการอัดแรง การทดสอบประกอบด้วยคานตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วยคานตัวอย่างควบคุม และอีกสองคานที่ได้รับเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว โดยขนาดของคานคอนกรีตเท่ากับ 150 x 300 x 2500 มิลลิเมตร สำหรับคานที่เสริมกำลังใช้การอัดแรงร้อยละ 20 และ 40 ของแรงประลัยสูงสุดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว สำหรับพฤติกรรมทดสอบประกอบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว การกระจายตัวของรอยร้าว และลักษณะการวิบัติจากผลการทดสอบพบว่า คานที่ได้รับการเสริมกำลังสามารถรับกำลังรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 41 การเสริมระบบอัดแรงภายนอกสามารถเพิ่มแรงกระทำที่ทำให้เกิดรอยร้าวเริ่มต้นร้อยละ 86

คำสำคัญ: อัดแรงภายนอก; โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก; พอลิเมอร์เสริมเส้นใย; ลวดเหล็กอัดแรง; ลักษณะการวิบัติ

Kongthap Shinwanit¹, Chanachai Thongchom^{2*}, Panuwat Joyklad³ and Penpichcha Sanit-in⁴

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand.

³ Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand.

⁴ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Thailand.

ABSTRACT

The method of reinforced concrete structures with external posttension has proven to be highly effective. In modern times, fiber-reinforced polymer has replaced traditional prestressed concrete steel strand, addressing concerns related to corrosion and durability. This research aimed to examine the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened using external posttension glass fiber-reinforced polymer tendons. The research focused on determining the appropriate percentage ratio for prestressing. Three beam specimens were tested: one without external prestressing (control beam) and two strengthened using external prestressing glass fiber-reinforced polymer tendons. The concrete beams measured $150 \times 300 \times 2500$ millimeter and were prestressed at 20% and 40% of the ultimate tensile stress of GFRP rebars. Test behavior includes Load-deflection curves, crack patterns, and the mode of failure. The results showed that the strengthened beams increased their flexural strength by 41%, and the external prestressing system raised the force that caused the first crack by 86%.

KEYWORD: External posttension; Reinforced concrete structures; Glass fiber-reinforced polymer; Prestressed concrete steel strand; Mode of failure

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีโครงสร้างสะพานและอาคารจำนวนมากที่มีความจำเป็นจะต้องมีการเสริมกำลัง อาจเกิดจากหลากหลายปัจจัย เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้อาคาร การเสื่อมสภาพของวัสดุ และมีการออกแบบที่ผิดพลาดตั้งแต่ต้น เนื่องด้วยอาคารเหล่านี้ต้องได้รับการเสริมกำลัง หากต้องกล่าวในทางคุณสมบัติของโครงสร้างคอนกรีตเหล็ก สามารถแบ่งการรับแรงออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ คอนกรีตและเหล็กเสริม ในส่วนของคอนกรีตจะสามารถรับแรงอัดได้มากกว่าแรงดึงประมาณร้อยละ 90 และการเสริมแรงด้วยเหล็กเส้นจะช่วยลดข้อบกพร่องในคุณสมบัติรับแรงดึงของคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีการเสริมกำลังของโครงสร้างสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ เช่น วิธีการติดแผ่นเหล็กภายนอกคาน[1-2] วิธีการติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอกคาน[3-4] การเสริมกำลังบริเวณใกล้ผิว (Near Surface Mounted, NSM)[5-6] และวิธีการเสริมกำลังแบบระบบอัดแรงภายนอกคาน[7-11] โดยวิธีการอัดแรงภายนอกด้วยลวดเหล็ก (Prestressed Concrete Steel Strand, PC Strand) ได้รับการพัฒนาเพื่อเสริมกำลังให้โครงสร้างในช่วง ทศวรรษที่ผ่านมา [12-13] ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถลดพื้นที่หน้าตัดของคานในการร้อยลวดอัดแรงภายใน และสามารถลดน้ำหนักของคาน อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาของการเสริมกำลังด้วยลวดเหล็ก คือ เกิดการกัดกร่อน, น้ำหนักสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างมากในเรื่องความทนทาน และในการบำรุงรักษาในระยะยาว [14-17]

พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) เป็นหนึ่งในวัสดุทางเลือกในการเสริมกำลัง ซึ่งได้รับการพัฒนาและยอมรับมากขึ้น ข้อได้เปรียบในการเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ได้แก่ อัตราส่วนกำลังรับแรงดึงต่อน้ำหนักที่สูงมีความสามารถในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือมีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่กัดกร่อน น้ำหนักเบา ลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบและบำรุงรักษา และช่วยลดระยะเวลาในการซ่อมแซม[18]

การเสริมกำลังโครงสร้างอาคารด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีหลากหลายรูปแบบ อาจมีข้อจำกัดของในด้านวัสดุกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังนั้นการเพิ่มหรือเสริมกำลังในรูปแบบเดิมอาจไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ เนื่องจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ถึงจุดวิกฤติ ในกรณีที่ต้องการลดข้อจำกัดดังกล่าว ระบบอัดแรงภายนอกคานเป็นวิธีที่สามารถนำมาเสริมกำลังได้ทั้ง

โครงสร้างใหม่และโครงสร้างเก่า เพื่อเปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงในคอนกรีต โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วระบบอัดแรงภายนอก โดยใช้อัตราส่วนร้อยละของอัดแรงที่จุดวิบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะมีการศึกษาวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับระบบอัดแรงภายนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย อย่างไรก็ตามยังคงมีความจำเป็นในการศึกษาวิจัยเพื่อลดช่องว่างระหว่างปัญหาในการเสริมกำลังระบบอัดแรงภายนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในมิติอื่นๆ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ในต่อไป

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

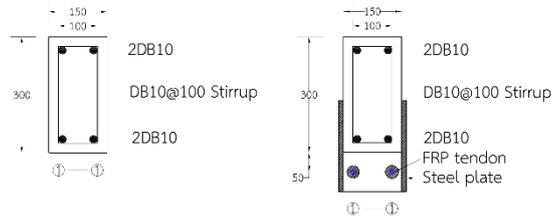
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ประเภทประกอบด้วย คอนกรีตที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเป็นคอนกรีตผสมสำเร็จ (Ready Mixed Concrete) โดยส่วนผสมได้มีการทดสอบตามมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 1 และการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตแบบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ที่ 28 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง มีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 30 MPa เหล็กเสริมคอนกรีตเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และสามารถรับแรงที่จุดครากได้ 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (SD40) ที่ใช้ได้นำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกล โดยตามมาตรฐาน ASTM A615 [19] ผลการทดสอบเฉลี่ย กำลังรับแรงดึงจุดคราก (Yield strength) เท่ากับ 600 MPa กำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เท่ากับ 690 MPa ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) เท่ากับ 28 GPa และสำหรับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจำนวน 3 ตัวอย่าง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D7205 [20] กำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 1,160 MPa และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 70 GPa

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตผสมเสร็จ ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

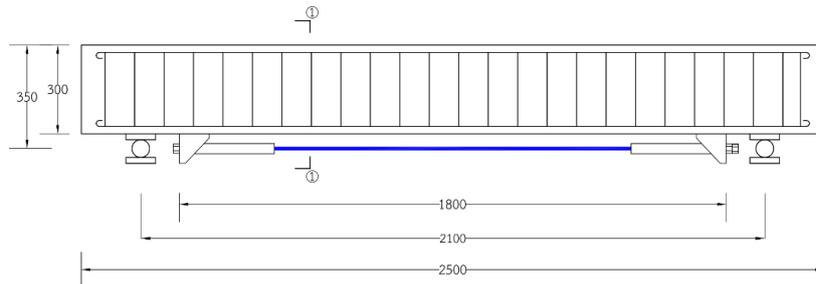
Portland type 1 cement (kg)	Sand (kg)	Limestone ¾" - #4 (kg)	Water (L)	Superplasticizer SCCO 1001 (mL)
425	770	1,070	163	1,913

2.2 ตัวอย่างคานทดสอบ

การศึกษาพฤติกรรมรับแรงคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วภายนอก มีจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความลึก 300 มิลลิเมตร ความยาว 2,500 มิลลิเมตร และมีความยาวในการทดสอบ 2,100 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 1 ส่วนของเหล็กเส้นรับแรงดึง และแรงอัด จะใช้เหล็กข้ออ้อย SD 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวนอย่างละ 2 เส้น คิดเป็นอัตราส่วนการเสริมเหล็กต่อหน้าตัดเท่ากับ 0.698 ส่วนเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ระยะห่าง 100 มิลลิเมตร ตลอดความยาวคาน ในส่วนพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีระยะอัดแรง ห่างจากผิวบนของคานคอนกรีตระยะ 350 มิลลิเมตร และขายึดแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอัดแรงเป็นแผ่นเหล็กSS400 (Steel plate) ความหนา 12 มิลลิเมตร รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2



(ก) กานตัวอย่าง BC (ข) กานตัวอย่าง B20 และ B40



(ค) หน้าตัดด้านข้างกานตัวอย่าง

รูปที่ 1 ตัวอย่างกานทดสอบ (หน่วย : มิลลิเมตร)

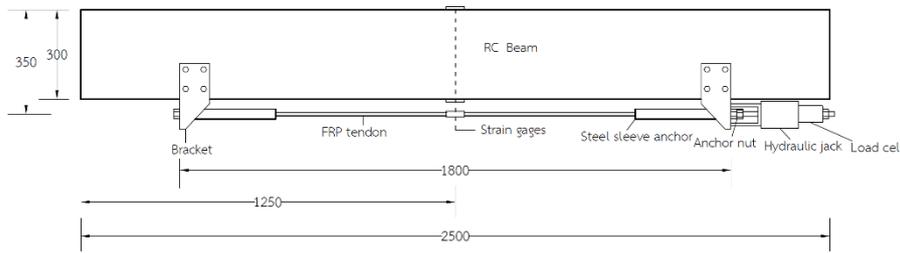
ตารางที่ 2 กานตัวอย่างการทดสอบ

กานตัวอย่าง	อัตราส่วนการเสริมกำลังหน้าตัด (%)	อัตราส่วนการอัดแรง (MPa)
BC	-	-
B20	0.127	232
B40	0.127	464

2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

2.3.1 การติดตั้งและขั้นตอนอัดแรงด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่ภายนอกคาน

ขั้นตอนในการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว โดยเริ่มจากการนำพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมาทำสมอที่ปลาย (End Anchored) ทั้งสองข้าง ขั้นตอนต่อมานำพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว มาติดตั้งกับขาเหล็กจากใต้คานคอนกรีตเสริมเหล็ก และขั้นตอนสุดท้ายนำไฮดรอลิครูทะเล (Hollow Jack) คึงที่ปลายข้างเดียว แล้วยึดด้วยน็อต (Nut) แสดงดังภาพที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (หน่วย : มิลลิเมตร)

2.3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด

การติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain gages) จะติดตั้งด้านบนและด้านล่างของคานคอนกรีต และการติดตั้งที่เหล็กเสริม โดยจะติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางของเหล็กเส้นทั้งในส่วนเหล็กรับแรงอัดและเหล็กรับแรงดึง แสดงดังรูปที่ 3 และการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดจะติดตั้ง โดยจะติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แสดงดังรูปที่ 4

2.4 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยพอลิเมอร์เส้นใยระบบอัดแรง

วิธีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง โดยมีพื้นฐานการคำนวณจากการวิเคราะห์การเสริมกำลังภายนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามมาตรฐาน ACI 440.4R ,BS 8110 ,JGJ 92-2004 เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและ ให้มีความสะดวกในการใช้งานมีการแก้ไขสัญลักษณ์และคำย่อที่แตกต่างกันให้เหมือนกันนำกำลังรับแรงดึงแต่ละมาตรฐาน ไปแทนในสมการที่ (5) ,(6) เพื่อทำนายกำลังรับแรงดัด

การออกแบบตามมาตรฐาน ACI 440.4 R [21] ในอดีตนักวิจัยพยายามหาวิธีการ ประมาณความเค้น (Stress) ในลวดอัดแรง ที่แตกต่างกันทุกสภาวะการรับน้ำหนักบรรทุก โดยเฉพาะในการรับแรงดัด สูงสุด ณ จุดวิบัติ ในคานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยระบบอัดแรงภายนอก ในปี ค.ศ.1987 [22] ได้เสนอวิธีการประมาณ ความเค้นที่จุดวิบัติของลวดอัดแรงเหล็กกล้า ในจุดที่กำลังรับแรงดัดสูงสุด (Maximum Moment) และในปี ค.ศ. 2002 [23] ได้มีการศึกษา เกี่ยวกับพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) โดยวิธีการปรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เสริมกำลังภายนอกแบบไม่ยึดเหนี่ยว โดยมีตัวแปรในการปรับค่าความเครียดให้อยู่ในแนวระนาบเดียว

$$f_p = f_{pe} + \Omega_u E_p \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{C_u} - 1 \right) \quad (1)$$

$$R_d = 1.14 - 0.005 \left(\frac{L}{d_p} \right) - 0.19 \left(\frac{S_d}{L} \right) \leq 1.0 \quad (2)$$

$$d_e = R_d d_p$$

การคำนวณความเค้นตามมาตรฐาน BS 8110 [24]

$$f_p = f_{pe} + \frac{7000 \left(1 - \frac{1.7 f_{pu} A_p}{f_c b d_p} \right)}{L / d_p} \leq 0.7 f_{pu} \quad (3)$$

การคำนวณความเค้นตามมาตรฐาน JGJ 92-2004 [25]

$$f_p = f_{pe} + (240 - 335 \xi_0) \left(0.45 + \frac{5.5 d}{L} \right) \quad (4)$$

$$\xi_0 = \frac{f_{pe} A_p + f_y A_s}{f_c b d_p} < 0.4 \quad (5)$$

กำลังรับแรงดึงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กเสริม และพอลิเมอร์เสริมเส้นใย นำมาคำนวณความต้านทานโมเมนต์ ในสมการที่ (6) และสามารถพิจารณาตาม สมดุลของแรง ในสมการที่ (7)

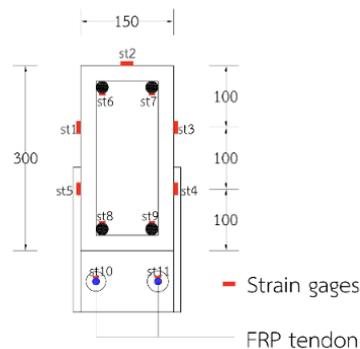
$$F_c = F_p + F_s \quad (6)$$

$$0.85 f'_c b \beta_1 C_u = A_p f_p + A_s f_y$$

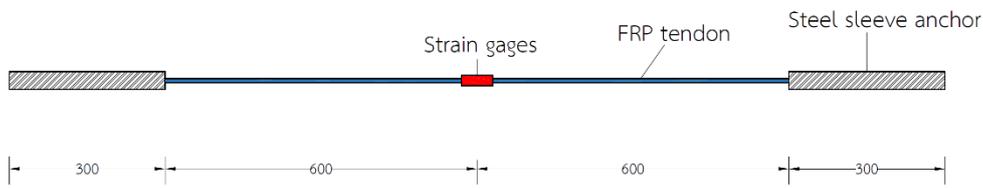
$$M_u = F_s \left(d - \frac{\beta_1 C_u}{2} \right) + F_p \left(d_p - \frac{\beta_1 C_u}{2} \right) \quad (7)$$

2.5 วิธีการทดสอบ

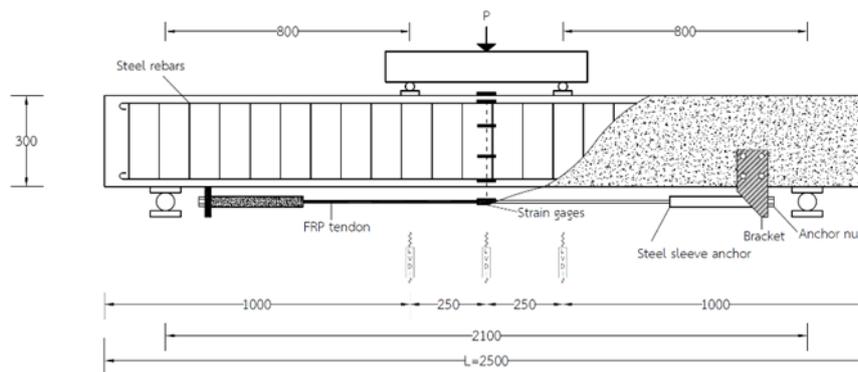
การติดตั้งเครื่องมือทดสอบแรงดัดแบบสี่ตำแหน่ง (Four-point bending test) จะความยาวทดสอบ 2,100 มิลลิเมตร โดยติดตั้งเครื่องมือวัดความแอ่นของคาน (Linear variable differential transformer, LVDT) ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง โดยมีระยะห่างจากกึ่งกลาง 250 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5 การทดสอบแรงดัดสี่ตำแหน่งลักษณะการให้แรงกระทำแบบต่อเนื่อง ทำการทดสอบโดยกำหนดอัตราแรงกระทำที่ 500 กิโลกรัมต่อนาที จนถึงการวิบัติ



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (หน่วย : มิลลิเมตร)

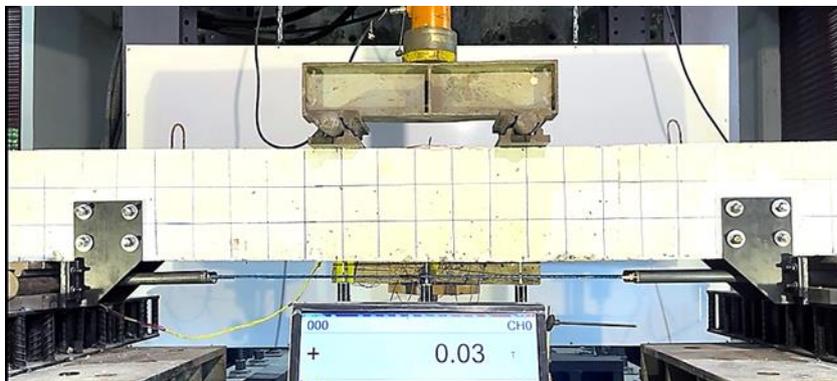


รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดที่พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (หน่วย : มิลลิเมตร)



(ก) ภาพร่าง (หน่วย : มิลลิเมตร)

รูปที่ 5 การติดตั้งเครื่องมือวัดระยะกับการทดสอบ



(ข) ภาพถ่าย

รูปที่ 5 การติดตั้งเครื่องมือวัดระยะกับการทดสอบ (ต่อ)

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอนตัวที่กึ่งกลางคาน

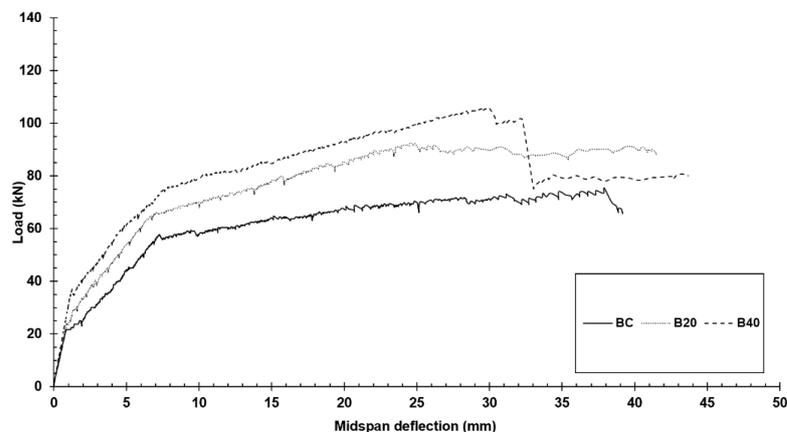
จากการทดสอบการเสริมกำลังของสำหรับทุกตัวอย่างการทดสอบจะบันทึก กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดรอยร้าว (Cracking load), สติฟเนส (Stiffness), กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดคราก (yielding load), กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด(Maximum load), การแอนตัวสูงสุด (Deflection corresponding to maximum load) และลักษณะการวิบัติของคาน (Failure modes)

จากผลการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 3 พฤติกรรมการเกิดรอยร้าวเริ่มต้นเมื่อให้แรงกระทำของคานคอนกรีตที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง (BC) เริ่มมีรอยร้าวเมื่อมีแรงกระทำประมาณ 21 กิโลนิวตัน โดยคานที่ได้รับการเสริมกำลังมีรอยร้าวเกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำประมาณ 21–39 กิโลนิวตัน เมื่อได้รับการเสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงภายนอก พบว่าการเสริมกำลัง พื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและอัดแรงเพิ่มมากขึ้นทำให้มีกำลังที่จุดคราก (Yield load) ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับคานไม่ได้รับการเสริมกำลัง จะเพิ่มขึ้น ร้อยละ 15 และ 31 สำหรับคาน B20 และ B40 ตามลำดับ และพบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับคานไม่ได้รับการเสริมกำลัง ร้อยละ 23 และ 41 สำหรับคาน B20 และ B40 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบของคานตัวอย่าง

Beam	Load crack (kN)	Stiffness (kN/mm)	Load yield (kN)	Load Max (kN)	Deflection at load max (kN)	Moment Max (kN.m)	Failure modes
BC	21	6.5	57	75	37.9	32.02	Crush in concrete
B20	24	8.0	66	92	24.5	39.24	Crush in concrete & GFRP tendons rupture
B40	39	8.7	75	106	29.9	45.05	Crush in concrete & GFRP tendons rupture

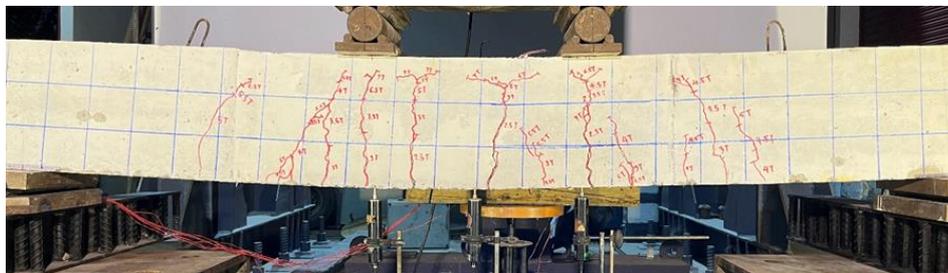
จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวกึ่งกลางคานของคานที่เสริมด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยอัดแรงที่จุดวิบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 20 และ 40 โดยมีค่าความชันในช่วง Uncracked stiffness เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.44 ค่าความชันช่วง Cracked stiffness เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.12 และในช่วง Post-yielding stiffness เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.58 โดยทั้งคาน B20 และ B40 ได้วิบัติในคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ในช่วงที่เกิดการวิบัติที่ GFRP ค่าStiffness จะลดลงมีค่าใกล้เคียงคาน BC



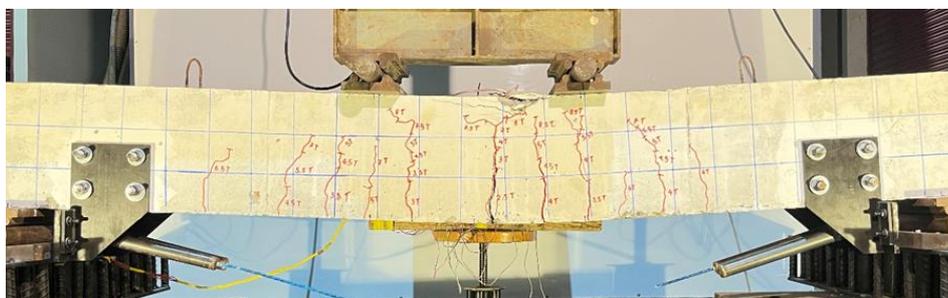
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

3.2 การกระจายตัวของรอยร้าวและลักษณะการวิบัติ

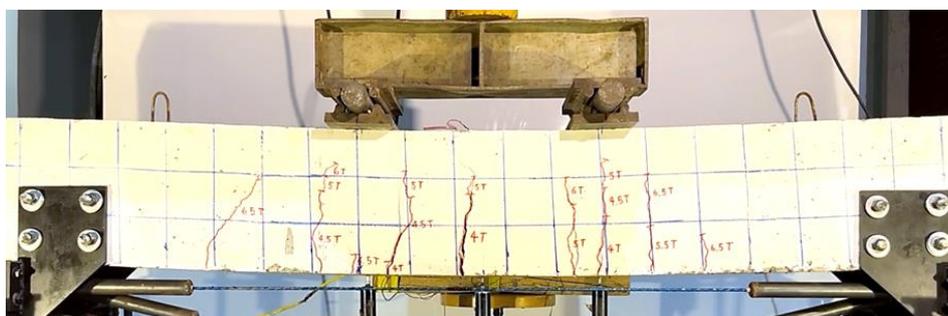
จากรูปที่ 7 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทั้งหมด ลักษณะของการเกิดรอยร้าวของคาน BC, B20 และ B40 จะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่รับกำลังรับแรงดัด (Moment Zone) โดยรอยร้าวแรกที่เริ่มร้าวที่บริเวณกึ่งกลางและผิวล่างของคาน BC, B20 และ B40 เกิดขึ้นเมื่อให้แรงกระทำที่ 21, 24 และ 39 กิโลนิวตัน ตามลำดับ โดยรอยร้าวจะมีแนวจากด้านล่างขึ้นไปผิวด้านบนในแนวตั้งฉากคาน เมื่อเหล็กเสริมรับแรงถึงจุดคราก (Yield Point) ทำให้เกิดรอยร้าว ในทิศทางที่ขนานผิวบนของคาน โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นของคาน BC, B20 และ B40 เกิดขึ้นเมื่อให้แรงกระทำที่ 55, 65 และ 75 กิโลนิวตัน ลักษณะการวิบัติของคาน B20 เกิดการวิบัติที่ผิวด้านบนของคานพร้อมเกิดการวิบัติที่พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP tendons) และคาน B40 เกิดการวิบัติที่บริเวณพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จำนวน 1 เส้นทำให้พฤติกรรมรับแรงลดลงทันทีของแรงกระทำ และเกิดการวิบัติที่ผิวด้านบนของคานพร้อมเกิดการวิบัติที่พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วในเส้นที่ 2 เมื่อระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 44 มิลลิเมตร



(ก) ตัวอย่างคาน BC



(ข) ตัวอย่างคาน B20

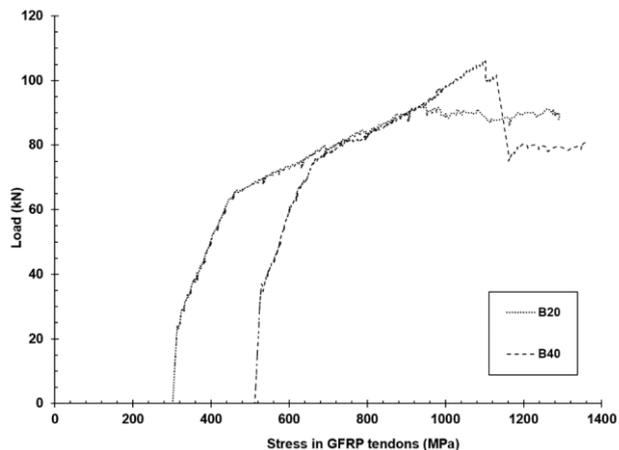


(ค) ตัวอย่างคาน B40

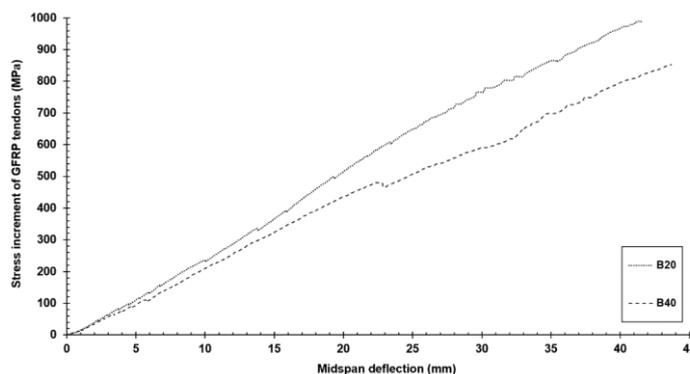
รูปที่ 7 ลักษณะการเกิดรอยร้าว

3.3 ความเค้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Stress in GFRP)

ความเค้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Stress in GFRP) สามารถคำนวณโดยนำค่าความเครียดที่เครื่องมือวัดความเครียด (Strain gages) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเค้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แสดงดังรูปที่ 8 โดยคาน B20 และ B40 มีจุดเปลี่ยนความชัน 2 ตำแหน่ง เมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าวเริ่มต้น ความเค้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วได้ใช้งานไปร้อยละ 27 และ 46 เมื่อเหล็กเสริมถึงจุดคราก ความเค้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วได้ใช้งานไปร้อยละ 41 และ 57 และเมื่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ความเค้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วได้ใช้งานไปร้อยละ 82 และ 95 ตามลำดับ ความชันของกราฟในช่วงเริ่มต้นก่อนเกิดรอยร้าวจะมีความชันที่ใกล้เคียงกัน โดยความเค้นของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาน B40 เพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับ B20 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความเครียดที่เพิ่มมากขึ้นกับอัตราส่วนอัดแรงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคานมีลักษณะคล้ายเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วทำงานได้เต็มประสิทธิภาพไม่เกิดการหลุดหรือเลื่อนไหลจากสมอเหล็ก แสดงดังรูปที่ 9 คล้ายกับข้อสรุปในงานวิจัยในอดีต [26]



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเค้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เพิ่มขึ้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและระยะแอนตัว

3.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลทดสอบและการคำนวณ

3.4.1 การคำนวณกำลังรับแรงดึงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

โดยศึกษาเปรียบเทียบผลทดสอบและผลการคำนวณตามมาตรฐาน ACI440.4R, BSI 8110 และ JGJ 92-2004 พบว่ากำลังรับแรงดึงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แสดงดังตารางที่ 4 โดยใช้สมการกำลังรับแรงดึงที่ (1)-(6)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

Beam	f_{ACI} (MPa)	f_{BS} (kN.m)	f_{JGJ} (kN.m)	f_{EXP} (kN.m)	$\frac{f_{EXP}}{f_{ACI}}$	$\frac{f_{EXP}}{f_{BS}}$	$\frac{f_{EXP}}{f_{JGJ}}$
B20	784.71	1266.85	492.68	947.52	0.83	1.34	0.52
B40	971.77	1498.94	721.42	1100.85	0.88	1.36	0.66

3.4.2 การคำนวณกำลังรับแรงดัดสูงสุด

โดยศึกษาผลทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคานเสริมกำลังภายนอกด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วตามผลการคำนวณตามมาตรฐาน ACI440.4R, BSI 8110 และ JGJ 92-2004 แสดงดังตารางที่ 5 โดยใช้สมการที่ (7) และ (8) มีอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

Beam	M_{ACI} (kN.m)	M_{BS} (kN.m)	M_{JGJ} (kN.m)	M_{EXP} (kN.m)	$\frac{M_{EXP}}{M_{ACI}}$	$\frac{M_{EXP}}{M_{BS}}$	$\frac{M_{EXP}}{M_{JGJ}}$
B20	38.94	39.43	33.72	39.24	0.99	1.00	0.86
B40	42.24	39.43	37.81	45.05	0.94	0.88	0.84

จากผลการคำนวณความเค้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และกำลังรับแรงดัดเปรียบเทียบผลทดสอบ พบว่าค่าที่คำนวณได้จากวิธีของ ACI440.4R มีความแม่นยำมากกว่า และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเฉลี่ย 0.866 และ 0.965 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสมการทุกมาตรฐานพบว่า BSI 8110 และ JGJ 92-2004 ไม่มีการพิจารณาถึงส่วนของระยะการติดตั้งการอัดแรงภายนอกเป็นผลให้มีความเค้นที่แตกต่างกับผลการทดลอง

4. สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงภายนอก โดยใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ที่อัดแรงร้อยละ 20 และ 40 ของแรงที่จุดวิกฤติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ด้วยการทดสอบแบบแรงดัดแบบสี่ตำแหน่ง จากการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การเสริมกำลังคานคอนกรีตด้วย GFRP ระบบอัดแรงภายนอก สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุก ช่วงรอยร้าวเริ่มต้น ช่วงจุดครากของเหล็กเสริม และ ช่วงจุดวิบัติ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 86, 31 และ 41 ของคานBC, B20 และB40
2. การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัดแรงของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีผลให้สามารถรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่มากขึ้นเช่นกัน
3. การคำนวณกำลังรับแรงคานเสริมกำลังและ ความเค้นสูงสุดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วทั้ง 3 วิธีแสดงให้เห็นว่าการคำนวณของ ACI440.4R มีประสิทธิภาพมากและใกล้เคียงกับผลทดสอบมากที่สุด เมื่อเปรียบอีก 2 วิธี เพราะ ACI440.4R มีการคำนวณปรับแก้สมการของระยะอัดแรงภายนอกที่มีระยะห่างจากผิวล่างของคานคอนกรีตเสริมกำลัง

ข้อเสนอแนะ การศึกษานี้พิจารณาเพียงอัตราส่วนการเสริมกำลังอัตราเดียวคือร้อยละ 0.127 และระยะความลึกของการเสริมกำลังที่ 350 มิลลิเมตร ในการใช้งานจริงอาจต้องพิจารณาเพิ่มเติมถึง ผลกระทบในด้านอัตราส่วนการเสริมกำลังของวัสดุ และระยะความลึกเพื่อความสะดวกในการเสริมแรงและการเสริมกำลังแบบอัดแรงภายนอกนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการเสริมแรงที่ต่ำ

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัท จีเอฟอาร์พี ลิงส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้การสนับสนุนพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hussain, M. et al. Flexural behavior of precracked reinforced concrete beams strengthened externally by steel plates. *Structural Journal*, 1995, 92 (1), pp. 14-23.
- [2] Aykac, S. et al. Strengthening and repair of reinforced concrete beams using external steel plates. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139 (6), pp. 929-939.
- [3] Saribiyik, A. and Caglar, N. Flexural strengthening of RC Beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP. *Struct. Eng. Mech*, 2016, 58 (5), pp. 825-845.
- [4] Al-Shamayleh, R. Al-Saoud, H. and Alqam, M. Shear and flexural strengthening of reinforced concrete beams with variable compressive strength values using externally bonded carbon fiber plates. *Results in Engineering*, 2022, 14, 100427.
- [5] Al-zu'bi, H. Abdel-Jaber, M. T. and Katkhuda, H. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with variable compressive strength using near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer strips [NSM-CFRP]. *Fibers*, 2022, 10 (10), 86.
- [6] Sokairge, H. Elgabbas, F. and Elshafie, H. Structural behavior of RC beams strengthened with prestressed near surface mounted technique using basalt FRP bars. *Engineering Structures*, 2022, 250, 113489.
- [7] Said, A. I. et al. Strengthening Behavior of Reinforced Concrete T-Beams Using External Prestress Tendons. *Applied Research Journal*, 2016, 2 (11).

- [8] Gao, D., Fang, D., You, P., Chen, G., & Tang, J. Flexural behavior of reinforced concrete one-way slabs strengthened via external post-tensioned FRP tendons. *Engineering Structures*, 2020, 216, 110718.
- [9] Yang, J. Q., Feng, P., Liu, B., Wang, H., Zhao, W., & Hu, L. Strengthening RC beams with mid-span supporting prestressed CFRP plates: An experimental investigation. *Engineering Structures*, 2022, 272, 115022.
- [10] Du, J. S., Yang, D., Ng, P. L., & Au, F. T. Response of concrete beams partially prestressed with external unbonded carbon fiber-reinforced polymer tendons. *Advanced Materials Research*, 2011, 150, 344-349.
- [11] Serega, S., & Faustmann, D. H. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using external tendons. *Engineering Structures*, 2022, 252, 113277.
- [12] Aravinthan T, Witchukreangkrai E, Mutsuyoshi H. Flexural behavior of twospan continuous prestressed concrete girders with highly eccentric external tendons. *ACI Struct J*, 2005, 102 (3) pp. 402-11.
- [13] Aparicio, A. C., Ramos, G., & Casas, J. R. Testing of externally prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 2002, 24 (1), pp. 73-84.
- [14] Pisani, M. A. A numerical survey on the behavior of beams pre-stressed with FRP cables. *Construction and Building Materials*, 1998, 12 (4), pp. 221-232.
- [15] Ghallab, A., & Beeby, A. W. Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27 (9-10), pp. 945-957.
- [16] Lou, T., Lopes, S. M., & Lopes, A. V. Factors affecting moment redistribution at ultimate in continuous beams prestressed with external CFRP tendons. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 66, pp. 136-146.
- [17] Lou, T., Lopes, S. M., & Lopes, A. V. Numerical analysis of behavior of concrete beams with external FRP tendons. *Construction and Building Materials*, 2012, 35, pp. 970-978.
- [18] Pisani, M. A. A numerical survey on the behavior of beams pre-stressed with FRP cables. *Construction and Building Materials*, 1998, 12 (4), pp. 221-232.
- [19] ASTM A615-20. Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement. West Conshohocken, 2020.
- [20] ASTM D7205. Standard test method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars. Pa: ASTM Int West Conshohocken, 2016.
- [21] ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington: American Concrete Institute, 2008.
- [22] Naaman, A. E. Partial Prestressing in the Rehabilitation of Concrete Bridges. *Proceedings of U.S. -European Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation*, 1987, pp. 392-406.
- [23] Naaman, A. E. Stresses in Unbonded Prestressing Tendons at Ultimate: Recommendation. *ACI Structural Journal*, 2002, pp. 518-529.
- [24] BS8110, B. S. Structural use of concrete, part 1: Code of practice for design and construction. British Standards Institution, 1997.
- [25] JGJ92-2004. Technical specification for unbonded prestressed concrete structures. China Academy of Building Research, 2004.
- [26] Ng, C. K. Flexural behavior of externally prestressed beams. Part I: Analytical model. *Engineering Structures*, 2006, 609-621.

