

การเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานด้วยพลาสติกเสริมด้วยเส้นใยแก้ว

ทรงกลด วงศ์เจริญ¹ ทวีวัฒน์ คงพัฒน์กิจ² ยศพนธ์ ชัยทอง³ และ พิชชา จงจวิวัฒน์กุล⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ด้วยวิธีการฝังผ่านหน้าตัด (Embedded Through-Section; ETS) โดยใช้ GFRP ฝังทะลุถึงกลางของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและใช้อีพอกซีช่วยในการยึดติดระหว่างคอนกรีตกับ GFRP โดยทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างคาน ซึ่งมีตัวแปรศึกษา ได้แก่ การเสริมกำลังด้วย GFRP ชนิดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวแท่ง GFRP (ได้แก่ เหล็ก และ GFRP) และ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (27 MPa และ 43 MPa) จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมด้วยแท่ง GFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของคานได้ 28% และเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามชนิดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว; วิธีฝังผ่านหน้าตัด; อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวแท่ง GFRP

Abstract

The purpose of the research is to study the shear capacity of reinforced concrete (RC) beam strengthened by glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar using embedded thought-section method (ETS). This method used GFRP to embed thought the section of the RC, and GFRP rebar was bonded with surrounding concrete by epoxy. Five RC beams were tested. The parameter includes the presence of GFRP, type of anchorages (steel and GFRP nuts), and compressive strength of the concrete (27 MPa and 43 MPa). The results show that shear capacity of RC beams increased by 28% with the presence of GFRP. In addition, shear capacity increased with the increased in compressive strength of concrete. Nevertheless, the type of anchorage did not significantly affect shear strength.

Keywords: Glass fiber reinforced polymer ; Embedded through-section ; Anchorage

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาผ่านไปส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตรับแรงได้น้อยลง จึงมีการคิดค้นวิธีต่างๆ เพื่อเสริมความแข็งแรงของคอนกรีตในกลับตังเดิม อาทิ การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber reinforced polymer; FRP) ด้วยวิธี Externally bonded reinforcement (ERB) หรือ Near surface mounted (NSM) แต่วิธีที่ได้การยอมรับว่ามีประสิทธิภาพที่สุดนั้นก็คือวิธีฝังผ่านหน้าตัด (Embedded through section; ETS) [1]

ในปัจจุบันวิธี ETS ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุเป็นแท่งเหล็กมาติดตั้งที่คานคอนกรีตและทำการยึดด้วยน็อตเพื่อช่วยในการรับกำลังแรงเฉือน และม้งานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้เหล็กเพื่อให้อวิธี ETS มีประสิทธิภาพมากขึ้น [2] อย่างไรก็ตามยังมีความกังวลว่าการเสริมกำลังด้วยเหล็กอาจทำให้เกิดสนิมขึ้นได้ ส่งผลให้กำลังการรับแรงลดลง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเหล็ก ได้แก่ แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass fiber reinforced polymer; GFRP) ซึ่งมี tensile strength และ tensile modulus ที่สูง ใช้การบำรุงรักษาน้อย ไม่นำความร้อนหรือกระแสไฟฟ้า มีน้ำหนักที่เบา และไม่เกิดสนิม [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเรื่องการนำ GFRP มาใช้ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี ETS โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการคานที่ไม่ได้เสริม อีกทั้งยังศึกษาว่าถึงอิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และ ผลของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วย GFRP สามารถสรุปเป็นวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่เสริมด้วยวัสดุ GFRP

2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังอัดของคอนกรีตและผลของการติดตั้งอุปกรณ์ยึดที่ปลายแท่ง GFRP ต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย GFRP

3) เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานที่คำนวณจากวิธีต่างๆ กับค่าที่ได้จากการทดสอบ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP)

โพลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) โดยปกติจะใช้ผลิตเป็นวัสดุผสมโดยการเพิ่มเส้นใย 0.5% ถึง 2.0% วัสดุประเภท GFRP มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในส่วนประกอบของโครงสร้าง ได้แก่ สะพาน อาคาร โครงถักและโคม และส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้าง ได้แก่ ผนังก้ออิฐ เบร็ง และเฟือง [4]

วัสดุประเภท GFRP มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี มีน้ำหนักเบาและสามารถติดตั้งได้สะดวก [5] ดังนั้นวัสดุประเภท GFRP จึงถูกนำไปใช้สร้างสะพานโครงถักสำหรับท่าเทียบเรือซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายไปยังสถานที่ใดก็ได้ ไม่ต้องการการบำรุงรักษา สามารถใช้เป็นระบบกันชนสำหรับต่อม่อสะพาน นอกจากนี้วัสดุนี้ยังใช้ในระบบผนังกันดินสำหรับบังน้ำในบริเวณชายฝั่ง ซึ่งช่วยป้องกันผนังจากการกัดกร่อนของน้ำทะเล รวมถึงมืองค์ประกอบของโครงสร้างที่ดีขึ้น ทำให้การบำรุงรักษาน้อยกว่าผนังเหล็ก

2.2 วิธีฝังผ่านหน้าตัด (ETS)

ในการเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงเฉือนมีเทคนิคมากมายที่สามารถนำไปเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ Deep embedment (DE) หรือ Embedded through-section (ETS) เทคนิคนี้เป็นการเสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กหรือ GFRP ผ่านรูที่เปิดผ่านหน้าตัดของคานและยึดติดกับคอนกรีตด้วยวัสดุคาน

ข้อดีของเทคนิค DE หรือ ETS คือ ขั้นตอนการทำงานของเทคนิค ETS ทำงานในการติดตั้ง ไม่ต้องใช้คนที่มีประสบการณ์สูง และไม่ต้องเตรียมพื้นผิว นอกจากนี้เทคนิคนี้มีการปิดผิวคอนกรีตอย่างเพียงพอในการฝัง ETS ผ่านแกนคอนกรีตของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นเทคนิค ETS สามารถป้องกัน GFRP จากการโดนไฟและผลกระทบที่เป็นอันตรายซึ่งเกิดขึ้นจากการกัดกร่อนหรือปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีการยึดเกาะที่แข็งแรงกว่าเทคนิคอื่นและยังให้ความสามารถในการเสริมแรงเฉือนและความต้านทานการเสียวรูปที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเทคนิคอื่นสรุปได้ว่า Failure mode ของการเสริมกำลังด้วยวิธี ETS ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเหนียวมากกว่าวิธี EBR และ NSM โดยสามารถเปลี่ยนจาก Shear failure เป็น Flexural failure ได้ [6,7]

2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

กำลังรับแรงเฉือนของคานเกิดขึ้นจาก 3 ส่วนได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก (V_s) และกำลังรับแรงเฉือนของ GFRP (V_f) โดยสามารถคำนวณค่าจากมาตรฐาน ACI [8] และ JSCE [9,10] อีกทั้งมีการคิด Modified Average Strain ที่อ้างอิงจากงานวิจัย Linh et al. [11]

2.3.1 กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง

กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง (V_{exp}) สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$V_{exp} = \frac{P}{2} \quad (1)$$

โดยที่ P คือ Peak Load

2.3.2 การคำนวณ V_c , V_s และ V_f ตามมาตรฐาน ACI

แรงเฉือนในคอนกรีต (V_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$V_c = \left[0.17\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d \quad (2)$$

โดยที่ $N_u = 0$ เนื่องจากไม่มีแรงตามแนวแกน (Axial Force), f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีต (MPa), A_g คือพื้นที่รวมของส่วนคอนกรีต (mm^2), b_w คือความกว้างของคาน (mm) และ d คือความลึกประสิทธิภาพ (mm)

แรงเฉือนในเหล็กปลอก (V_s) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (3)$$

โดยที่ A_v คือพื้นที่ของการเสริมรับแรงเฉือนภายในระยะห่าง s (mm^2), f_y คือความเค้น ณ จุดครากของเหล็กตามขวาง (MPa), d คือความลึกประสิทธิภาพ (mm) และ s คือระยะกึ่งกลางถึงกึ่งกลางของเหล็กตามขวาง (mm)

แรงเฉือนใน GFRP (V_f) ซึ่งเสริมตั้งฉากกับเหล็กเสริมตามยาว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$V_f = \frac{A_f f_{fr} d}{s} \quad (4)$$

โดยที่ A_f คือพื้นที่การรับแรงเฉือนของ FRP (mm^2), f_{fr} คือกำลังรับแรงดึงของ FRP (MPa), d คือความลึกประสิทธิภาพ (mm) และ s คือระยะกึ่งกลางถึงกึ่งกลางของ GFRP (mm)

2.3.3 การคำนวณ V_c , V_s และ V_f ตามมาตรฐาน JSCE

แรงเฉือนในคอนกรีต (V_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$V_c = 0.2\sqrt{f'_c} \sqrt[4]{\frac{1000}{d}} \sqrt[3]{100\rho_w} b_w d \quad (5)$$

$$\rho_w = \frac{A_s}{b_w d} \quad (6)$$

โดยที่ f'_c คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa), b_w คือความกว้างของคาน (mm), d คือความลึกประสิทธิภาพ และ ρ_w คืออัตราส่วนแรงดึงหรือเหล็กตามยาวดังสมการที่ 6

แรงเฉือนในเหล็กปลอก (V_s) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$V_s = \frac{7A_v f_y d}{8s} \quad (7)$$

โดยที่ A_v คือพื้นที่ของการเสริมรับแรงเฉือนภายในระยะห่าง s (mm^2), f_y คือความเค้น ณ จุดครากของเหล็กตามขวาง (MPa), d คือความลึกประสิทธิภาพ (mm) และ s คือระยะกึ่งกลางถึงกึ่งกลางของเหล็กตามขวาง (mm)

แรงเฉือนใน GFRP (V_f) ซึ่งเสริมตั้งฉากกับเหล็กเสริมตามยาว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$V_f = \frac{7A_f f_{fv} d}{8s} \quad (8)$$

โดยที่ A_f คือพื้นที่การรับแรงเฉือนของ FRP (mm^2), f_{fv} คือกำลังรับแรงดึงของ FRP (MPa), d คือความลึกประสิทธิภาพ (mm) และ s คือระยะกึ่งกลางถึงกึ่งกลางของ GFRP (mm)

2.3.4 Modified Average Strain

ความเค้นแรงดึงเฉลี่ยสำหรับการเสริมแรงเฉือนในบริเวณ Shear Cracking ($\bar{\epsilon}_{web}$) สามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$\bar{\epsilon}_{web} = -0.00127 + 0.0162 \frac{\sqrt{f_c'}}{\sqrt{a/d} + 1} e^{\frac{-1000}{\rho_w E_w} - 0.05 \sqrt{\rho_f E_f + \rho_v E_v}} \quad (9)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w s} \quad (10)$$

$$\rho_v = \frac{A_v}{b_w s} \quad (11)$$

$$\rho_w = \frac{A_s}{b_w d} \quad (12)$$

โดยที่ ρ_f คืออัตราส่วนการเสริมแรงเฉือนของ FRP ในช่วง s ดังสมการที่ 10, ρ_v คืออัตราส่วนเหล็กปลอกดังสมการที่ 11, ρ_w คืออัตราส่วนแรงดึงหรือเหล็กตามยาวดังสมการที่ 12, E_f คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของแท่ง FRP (MPa), E_v คือโมดูลัสของเหล็กตามขวาง (MPa), E_w คือโมดูลัสของการเสริมแรงดึง (MPa), A_f คือพื้นที่การรับแรงเฉือนของ FRP (mm^2), A_v คือพื้นที่ของการเสริมรับแรงเฉือนภายในระยะห่าง s (mm^2), A_s คือพื้นที่ของการเสริมรับแรงดึง (mm^2), f_c' คือกำลังอัดของคอนกรีต (MPa), a คือช่วงรับแรงเฉือนของคาน (mm), d คือความลึกประสิทธิภาพ (mm), s คือระยะกึ่งกลางถึงกึ่งกลางของเหล็กเสริมตามขวาง (mm) (สมการ 10), s คือระยะกึ่งกลางถึงกึ่งกลางของเหล็กเสริมตามขวาง (mm) (สมการ 11) และ b_w คือความกว้างของคาน (mm)

3. วิธีการทดลอง

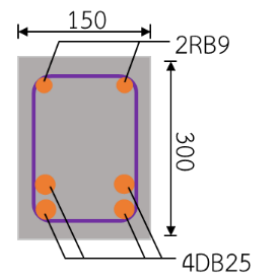
หัวข้อนี้กล่าวถึงรายละเอียดชิ้นงานทดสอบ ขั้นตอนการเสริมกำลังด้วยเทคนิค ETS และขั้นตอนการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 รูปแบบคานที่ใช้ทดลอง

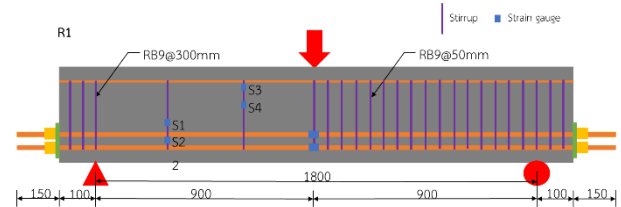
ตัวอย่างคานทดสอบทั้งหมด ประกอบด้วย คานคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 5 คาน มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 3.6 มี Span Length เท่ากับ 1.8 เมตร โดยมีตัวแปรศึกษา ได้แก่ การเสริมกำลังด้วย GFRP ชนิดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวแท่ง GFRP (ได้แก่ เหล็ก และ GFRP) และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (27 MPa และ 43 MPa) จึงกำหนดคานที่ใช้ทดสอบตามรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 1-5

ตารางที่ 1 กรณีคานทดสอบ

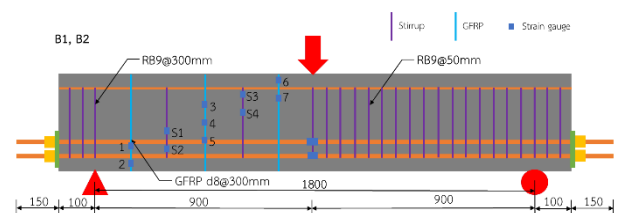
คานทดสอบ	f_c' (MPa)	การเสริม ETS	จำนวน Anchorage nuts/ข้าง
R1	27	-	-
B1	27	Yes	0
B2	43	Yes	0
B3	27	Yes	2 steel nuts
B4	27	Yes	2 GFRP nuts



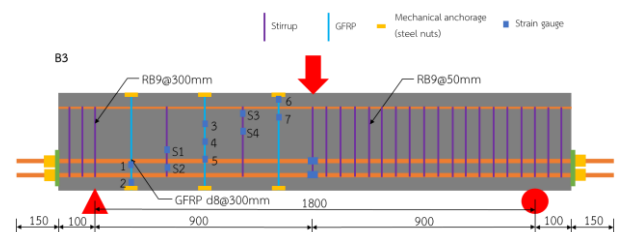
รูปที่ 1 หน้าตัดคานทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)



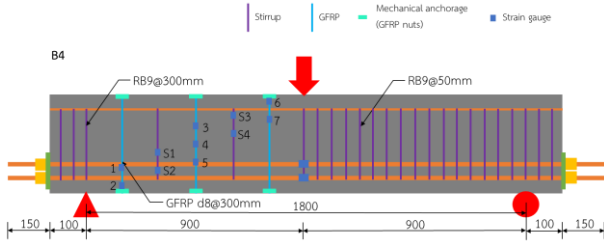
รูปที่ 2 รายละเอียดของคาน R1 (หน่วย มิลลิเมตร)



รูปที่ 3 รายละเอียดของคาน B1 และ B2 (หน่วย มิลลิเมตร)



รูปที่ 4 รายละเอียดของคาน B3 (หน่วย มิลลิเมตร)



รูปที่ 5 รายละเอียดของคาน B4 (หน่วย มิลลิเมตร)

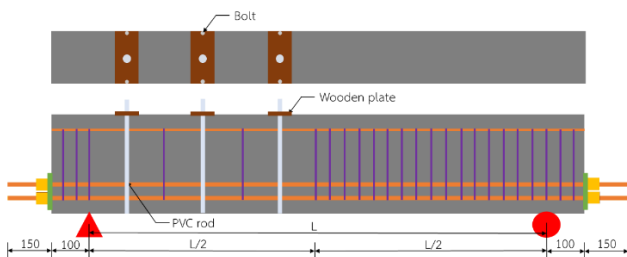
3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

กำลังของคอนกรีตที่ใช้มีค่าเท่ากับ 27 MPa และ 43 MPa ความดันครากของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง (DB25 และ RB9) เท่ากับ 235 MPa และ 390 MPa ตามลำดับ [12] แท่ง GFRP ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. มีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 862 MPa (ตามข้อมูลที่ระบุโดยผู้ผลิต) วัสดุที่ใช้สำหรับการยึดระหว่าง GFRP กับพื้นผิวคอนกรีตคืออีพ็อกซี (Sikudur-30)

3.3 การเตรียมคานทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเสริมความแข็งแรงโดยใช้ Embedded through-section (ETS) มาใช้ โดยมีขั้นตอนการเตรียมคานทดสอบดังนี้

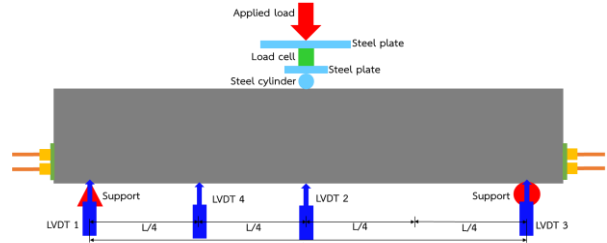
- 1) มีการเตรียมแบบหล่อคอนกรีตของคานทดสอบ
- 2) ทำการผูกเหล็กตามยาวและตามขวาง
- 3) ทำการเตรียมรูสำหรับแท่งเสริมความแข็งแรง ETS โดยการใส่ท่อพีวีซีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่ง GFRP ในตำแหน่งที่ต้องการก่อนการหล่อคอนกรีตและใช้แผ่นไม้วางที่ด้านบนของชิ้นส่วนเพื่อป้องกันไม่ให้ท่อพีวีซีเลื่อนจากตำแหน่งเมื่อเทคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 6 ท่อพีวีซีจะถูกถอดออกเมื่อคอนกรีตแข็งตัวประมาณ 1.5 ถึง 2 ชม.
- 4) หลังจากบ่มคอนกรีต 28 วัน ทำการเจาะรูและติดตั้งคานด้านล่าง จากนั้นค่อยๆใส่อีพ็อกซีเรซินลงไป ในรู หลังจากนั้นนำแท่ง GFRP ที่มีหรือไม่มีน็อดยึดที่ปลาย ทำการติดตั้งตามวิธี ETS โดยค่อยๆสอดเข้าไปในรู จากนั้นนำอีพ็อกซีเรซินส่วนเกินออกจากคาน
- 5) ทิ้งไว้ 7 วันเพื่อให้อีพ็อกซีเรซินแข็งตัว



รูปที่ 6 รายละเอียดขั้นตอนการการเสริมกำลังโดยวิธี ETS

3.4 การทดสอบ

ตัวอย่างคานอยู่ภายใต้การทดสอบการโหลดทั้งหมดสามจุด รายละเอียดของระบบการติดตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 7 ในการวัดค่าการโก่งตัวของคานที่ทดสอบจะใช้ตัวแปลงสัญญาณความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเชิงเส้น (LVDT) สี่ตัว ติดตั้งบริเวณระยะ L/4 L/2 และ Support ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อ L คือระยะห่างระหว่าง support สำหรับแรงกระทำวัดโดย load cell



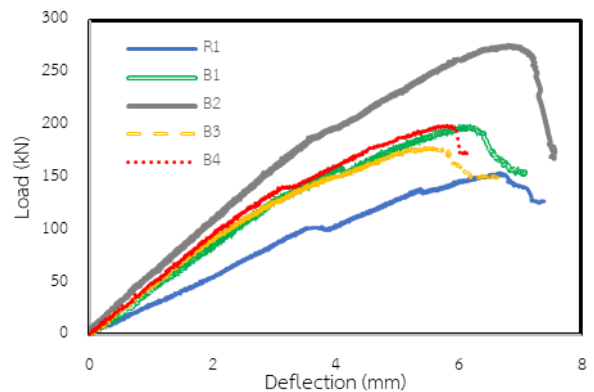
รูปที่ 7 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ

นอกจากนี้จะติดตั้งวัดความเครียดเพื่อวัดค่าความเครียดเหล็กเสริมตามยาว เหล็กเสริมตามขวาง และ GFRP ตำแหน่งของมาตรวัดความเครียดทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 มาตรวัดความเครียดสำหรับแท่งเหล็กปลอกและแท่ง GFRP ถูกติดตั้งในทิศทางที่คาดว่าจะเกิดรอยร้าวแยงซึ่งวางตัวจาก Support ไปยังจุดที่ใส่แรงกระทำ

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 พฤติกรรมการรับแรง

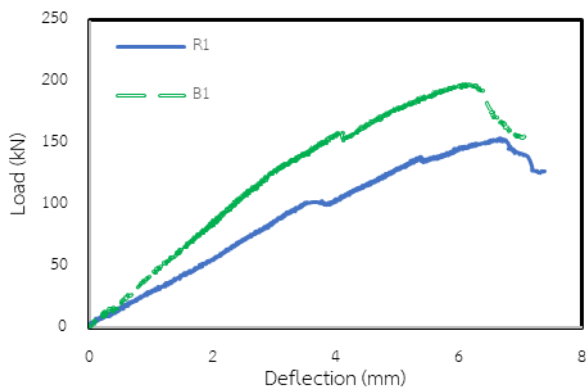
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการเสียรูปของทุกตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าคาน B2 มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้มากที่สุด เนื่องจากคาน B2 เป็นคานที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงกว่าคานอื่น และลำดับต่อมาเป็นคาน B4 และ B1 ที่ค่ามีความใกล้เคียงกัน ส่วน B3 เป็นลำดับรองสุดท้าย และลำดับท้ายสุดเป็นคาน R1 ซึ่งจากข้อมูลสามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่า คานที่มีการเสริมแท่ง GFRP นั้นมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้มากขึ้นกว่าเดิม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของแรงกับค่าการเสียรูปทุกตัวอย่างการทดลอง

4.2 อิทธิพลการเสริม GFRP

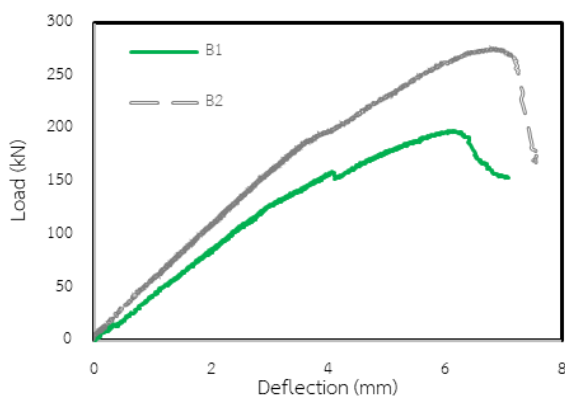
เมื่อพิจารณาคาน B1 ซึ่งเป็นคานที่ลักษณะเหมือนกับคาน R1 เพียงแต่มีการเสริมกำลังด้วย GFRP ดังแสดงในรูปที่ 9 ผลปรากฏว่า คาน B1 สามารถรับกำลังสูงสุดได้มากกว่าคานที่ใช้เปรียบเทียบ อีกทั้งความชันของกราฟคาน B1 นั้นมีค่ามากกว่าคาน R1 สรุปได้ว่า ความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของคาน B1 มีค่ามากกว่าคาน R1 และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงเฉือนพบว่าค่าของคาน B1 มีมากกว่าคาน R1 28.53% โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) และเหล็กปลอกของ (V_s) ทั้ง 2 คานนั้นมีความใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าคานที่มีการเสริม GFRP นั้นสามารถมีความสามารถในการรับแรงเฉือนได้มากขึ้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าการเสียรูปของคาน R1 และ B1

4.3 อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาคานคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแตกต่างกัน (รูปที่ 10) ผลปรากฏว่า คาน B2 นั้นสามารถรับกำลังสูงสุดได้มากกว่าคาน B1 คิดเป็น 28.07% อีกทั้งความชันของกราฟคาน B2 มีค่ามากกว่าคาน B1 สรุปได้ว่า ความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของคาน B2 มีค่ามากกว่าคาน B1



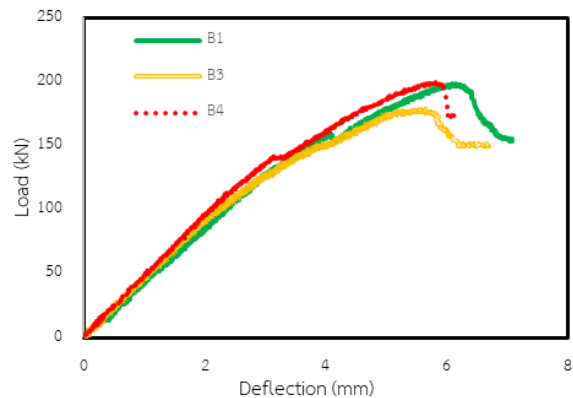
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าการเสียรูปของคาน B1 และ B2

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองพบว่าคาน B2 นั้นมีค่ามากกว่าคาน B1 แต่ไม่สามารถสรุปค่ากำลังรับแรงเฉือนของ GFRP (V_f) ได้ทันทีเนื่องจากความสามารถรับแรงเฉือนอาจเป็นผลมาจากกำลังของคอนกรีตที่สูงกว่า ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

(V_c) สูงกว่า อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่สามารถคำนวณค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของ GFRP (V_f) จากการทดลองได้โดยตรงเนื่องจากไม่มีคานที่ใช้อ้างอิง และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) ตามที่ได้คำนวณจากกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ACI และ JSCE พบว่าค่า V_c ที่ได้นั้นมีค่าต่างกันไม่มาก (10.66% สำหรับ ACI และ 7.24% สำหรับ JSCE) และค่าความสามารถการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก (V_s) ที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI และ JSCE ทั้งสองคานมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนของทั้งคานนั้นคือค่า V_f ดังนั้นสรุปได้ว่า การเสริมกำลังด้วย GFRP โดยวิธี ETS ในคอนกรีตกำลังสูง นั้นมีความสามารถในการรับแรงเฉือนดีกว่าการเสริมกำลังด้วย GFRP โดยวิธี ETS ในคอนกรีตกำลังปกติ

4.4 อิทธิพลจากการใส่อุปกรณ์ยึด

เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของการมีตัวยึดที่ปลายแท่ง GFRP และการใช้ตัวยึดต่างชนิดกัน ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลคานที่เสริมกำลังด้วย GFRP โดยวิธี ETS ไม่มีการยึดที่ปลายแท่ง GFRP (B1) ข้อมูลคานที่เสริมกำลังด้วย GFRP โดยวิธี ETS มีการยึดด้วยนอตเหล็กที่ปลายแท่ง GFRP (B3) และ ข้อมูลคานที่เสริมกำลังด้วย GFRP โดยวิธี ETS มีการยึดด้วยนอตที่ผลิตจาก GFRP ที่ปลายแท่ง GFRP (B4) ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าการเสียรูปของคาน B1, B3 และ B4

ผลปรากฏว่า ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของคาน B1 และ B4 ต่างกันน้อยมาก โดยกำลังรับแรงของ B4 มากกว่า B1 คิดเป็น 0.97 % ส่วนค่า B3 มีค่าต่ำที่สุด ต่อมาเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความชันของกราฟทั้งสามคาน พบว่า ค่าความชันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่า การมีตัวยึดที่ปลายแท่ง GFRP ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานอย่างมีนัยสำคัญ

4.5 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผู้วิจัยได้คำนวณค่า V_f จาก 2 วิธี ได้แก่ (1) ค่า V_f จากสมการ Modified Average Strain (สมการที่ (9)) ซึ่งจะเรียกค่าแรงเฉือนที่ได้จาก

วิธีนี้ว่า V_{f-eq} และ (2) ค่า V_f ที่คำนวณจากความเครียดที่ได้จากการทดสอบ โดยจะเรียกค่าแรงเฉือนที่ได้จากวิธีนี้ว่า V_{f-exp}

เมื่อนำค่า V_f ที่ได้มารวมกับค่า V_c และ V_s ที่คำนวณจากสมการของ ACI และ JSCE ทำให้ได้แรงเฉือนลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละคาน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$V_{cal-exp} = V_c + V_s + V_{f-exp} \quad (13)$$

$$V_{cal-eq} = V_c + V_s + V_{f-eq} \quad (14)$$

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบกับสมการคำนวณของ ACI code

Name	Experiment		Calculation (ACI)		$V_{cal-exp}$ $/N_{exp}$	V_{cal-eq} $/N_{exp}$
	V_{exp} (kN)	$V_{cal-exp}$ (kN)	V_{cal-eq} (kN)	V_{cal-eq} (kN)		
R1	77.19	58.04	58.04	58.04	0.75	0.75
B1	99.21	62.94	69.64	69.64	0.63	0.70
B2	137.93	88.32	81.92	81.92	0.64	0.59
B3	89.05	82.04	69.64	69.64	0.92	0.78
B4	100.18	74.44	69.64	69.64	0.74	0.70
Mean ratio					0.74	0.71
Coefficient of variation					0.16	0.10

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบกับสมการคำนวณของ JSCE code

Name	Experiment		Calculation (JSCE)		$V_{cal-exp}$ $/N_{exp}$	V_{cal-eq} $/N_{exp}$
	V_{exp} (kN)	$V_{cal-exp}$ (kN)	V_{cal-eq} (kN)	V_{cal-eq} (kN)		
R1	77.19	77.06	77.06	77.06	1.00	1.00
B1	99.21	81.35	87.16	87.16	0.82	0.88
B2	137.93	105.23	99.63	99.63	0.76	0.72
B3	89.05	98.06	87.16	87.16	1.10	0.98
B4	100.18	91.46	87.16	87.16	0.91	0.87
Mean ratio					0.92	0.89
Coefficient of variation					0.15	0.13

จาก**ตารางที่ 2** ค่าเฉลี่ย $V_{cal-exp}/V_{exp} = 0.74$ แสดงว่าแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าแรงเฉือนจากการคำนวณโดยใช้ความเครียดที่เกิดขึ้นจริง และค่าเฉลี่ย $V_{cal-eq}/V_{exp} = 0.71$ แสดงว่าแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าแรงเฉือนจากการคำนวณโดยใช้ความเครียดโดยวิธี modified average strain และเมื่อเปรียบเทียบการคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่ง GFRP จากวิธี modified average strain กับการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่ง GFRP โดยความเครียดที่ได้จากการทดสอบ จะเห็นได้ว่าใช้ความเครียดจากการทดลองจะได้แรงเฉือนลัพธ์ใกล้เคียงผลจากการทดลองมากกว่า

จาก**ตารางที่ 3** ค่าเฉลี่ย $V_{cal-exp}/V_{exp} = 0.92$ แสดงว่าแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าแรงเฉือนจากการคำนวณโดยใช้ความเครียดที่

เกิดขึ้นจริง และค่าเฉลี่ย V_{cal-eq}/V_{exp} เท่ากับ 0.89 แสดงว่าแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าแรงเฉือนจากการคำนวณโดยใช้ความเครียดโดยวิธี modified average strain และเมื่อเปรียบเทียบการคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่ง GFRP จากวิธี modified average strain กับการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่ง GFRP โดยความเครียดที่ได้จากการทดสอบ จะเห็นได้ว่าใช้ความเครียดจากการทดลองจะได้แรงเฉือนลัพธ์ใกล้เคียงผลจากการทดลองมากกว่า

จาก**ตารางที่ 2 และ 3** พิจารณา ค่าเฉลี่ยสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณแรงเฉือนโดยวิธี ACI code ให้ค่าที่ต่ำกว่าวิธี JSCE code จึงบ่งบอกว่า JSCE code นั้นสามารถคาดการณ์ค่าแรงเฉือนที่จะเกิดขึ้นในคานได้ดีกว่า ACI code และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนค่าแรงเฉือนจากการคำนวณต่อค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงของแต่ละคานในแต่ละวิธีแล้ว จะเห็นได้ว่าค่าของคาน B2 นั้นน้อยกว่าคานตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งเราอาจสรุปได้ว่าหากคอนกรีตมีกำลังที่มากกว่าปกติแล้วการคาดการณ์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานจากมาตรฐาน ACI และ JSCE จะได้ผลที่คาดเคลื่อนมากขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการนำ GFRP มาใช้ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีฝังผ่านหน้าตัด (ETS) โดยมีตัวแปรศึกษาได้แก่ การเสริมกำลังด้วย GFRP กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (27 MPa และ 43 MPa) และการใช้อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่ปลายแท่ง GFRP เป็น steel nut และ GFRP nut โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการคานที่ไม่ได้เสริม จากผลการทดสอบพบว่า การเสริมด้วยแท่ง GFRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของคานได้ 28.53% และเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงเฉือนของคานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามชนิดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ

การคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่ง GFRP โดยความเครียดที่ได้จากการทดสอบ จะได้แรงเฉือนลัพธ์ใกล้เคียงผลจากการทดลองมากกว่า การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่ง GFRP จากวิธี modified average strain ดังนั้นการคำนวณด้วย modified average strain จึงควรมีการวิจัยเพื่อพัฒนาสมการให้มีความแม่นยำที่มากขึ้นต่อไป

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถโดยรวมของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานด้วย GFRP ดังนั้นในอนาคตควรมีการศึกษาเชิงลึกในแต่ละหัวข้อมากขึ้นอันได้แก่ การศึกษาผลของกำลังคอนกรีตโดยมีความแตกต่างที่มากขึ้น การศึกษาผลของจำนวนอุปกรณ์ยึดปลายแท่ง GFRP โดยมีจำนวนที่แตกต่างมากขึ้น เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนคานด้วย GFRP โดยวิธี ETS ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของสมการจากมาตรฐานการออกแบบเพื่อพัฒนาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา วิศวกรทางวิศวกรรม รองศาสตราจารย์ ดร. พิษชา จงวิวัฒน์กุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นอย่างสูงสำหรับการให้ความรู้ทางด้านวิชาการ คำปรึกษาและ

คำแนะนำในการดำเนินโครงการ รวมถึงการดูแลเอาใจใส่จนโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจากหน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaallal, O., Mofidi, A., Benmokrane, B., and Neale, K. (2011). Embedded through-section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: performance and comparison with existing techniques. *Journal of Composites for Construction*, 15(3), 374-383. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000174](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000174)
- [2] Breveglieri, M., Aprile, A., and Barros, J. A. O. (2014). Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars. *Engineering Structures*, 81, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.026>
- [3] Mugahed Amran, Y. H., Alyousef, R., Rashid, R. S. M., Alabduljabbar, H., & Hung, C.-C. (2018). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. *Structures*, 16, 208-238. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>
- [4] Fang, H., Bai, Y., Liu, W., Qi, Y., and Wang, J. (2019). Connections and structural applications of fibre reinforced polymer composites for civil infrastructure in aggressive environments. *Composites Part B: Engineering*, 164, 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.047>
- [5] Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., and Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258-1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- [6] Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., and M.I., A. A. (1998). Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members. *Journal of Composites for Construction*, 195-202.
- [7] Szabó, Z. K., and L. Balázs, G. (2007). Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 51(1). <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2007-1.05>
- [8] ACI 318-19. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI318-19). ACI (American Concrete Institute).
- [9] JSCE. (1997). Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. JSCE (Japan Society of Civil Engineers).
- [10] JSCE. (2007). Standard specifications for concrete structures-2007 "Design". JSCE (Japan Society of Civil Engineers).
- [11] Van Hong Bui, L., Stitmannaitum, B., and Ueda, T. (2020). Experimental investigation of concrete beams strengthened with embedded through-section steel and FRP bars. *Journal of Composites for Construction*, 24(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001055](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001055)
- [12] TIS24-2548. (2003). Steel bars for reinforced concrete: deformed bars. Thai Industrial Standards Institute (TISI).