

พฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP และเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP

ที่คำนึงถึงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

Compressive Behavior of GFRP Reinforcing Bars and GFRP Reinforced Concrete Short Columns Considering Buckling of Longitudinal Bars

สมบุญ เชียงฉิน^{1*} อนันต์ ขมชอบไพโรพณา² วรพงศ์ หน่อแก้ว³ แสงหล้า มินา⁴ สุทธิวัส สิบชมภู⁵ และ ปรีดา ไชยมหาวัน⁶

¹⁻⁶สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: Somboon.sh@up.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเหล็กเส้น GFRP ได้ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างในวงกว้าง โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กจากคลอไรด์ เหล็กเส้น GFRP มีคุณสมบัติเด่นคือกำลังรับแรงดึงได้สูงกว่าเหล็ก แต่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าเหล็กถึง 3.3 เท่า จึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP มีพฤติกรรมที่ด้อยลงเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็ก หากนำเหล็กเส้น GFRP มาใช้รับแรงดึงในโครงสร้างคอนกรีตจะเกิดรอยแตกกว้างที่กว้างกว่า และเมื่อรับแรงอัดร่วมกับคอนกรีตจะเกิดการโก่งเดาะได้ง่าย การศึกษานี้จึงได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP และศึกษาผลกระทบเมื่อนำมาใช้รับแรงอัดในเสาคอนกรีตสั้น ผลการศึกษพบว่ากำลังรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP จะต่ำกว่ากำลังรับแรงดึง 0.65-0.70 เท่า และเหล็กเส้น GFRP ที่มีช่วงความยาวการรับแรงอัดมากกว่า 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีกำลังอัดลดลงจากการโก่งเดาะ เมื่อนำเหล็กเส้น GFRP ไปใช้ในเสาสั้นคอนกรีต เหล็กที่โก่งเดาะจะดันคอนกรีตหุ้มให้แตกออก ดังนั้น การทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาสั้นที่เสริมเหล็กเส้น GFRP ต้องคำนึงถึงการโก่งเดาะด้วย

คำสำคัญ: เหล็กเส้น GFRP, เสาสั้นคอนกรีต, การโก่งเดาะเหล็กเสริมตามยาว

Abstract

Currently, GFRP bars are widely used in construction, especially in areas with a high risk of steel corrosion from chloride. GFRP bars have a prominent property of higher tensile strength than steel, but their elastic modulus is 3.3 times lower than steel. This results in reinforced concrete structures with GFRP bars having inferior behavior compared to reinforced concrete structures with steel. If used to reinforce tensile stress in concrete structures, wider cracks will occur, and when subjected to compressive forces together with concrete, they

tend to buckle easily. Therefore, this study conducted tests to investigate the compressive behavior of GFRP bars and the effects when used to reinforce compressive stress in short concrete columns. The results revealed that the compressive strength of GFRP bars is 0.65-0.70 times lower than their tensile strength. Moreover, GFRP bars with a compression length greater than six times their diameter experience reduced compressive strength due to buckling. When GFRP bars are used in short concrete columns, the buckled bars push the concrete cover outward, causing it to spall off. Hence, predicting the compressive strength of short columns reinforced with GFRP bars must take buckling into account.

Keywords: GFRP bars, short concrete column, buckling of longitudinal bars

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นรูปแบบโครงสร้างที่ใช้ในการก่อสร้างในประเทศไทยเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีความแข็งแรงและมั่นคงสูง โดยคอนกรีตรับแรงอัดได้ดีแต่จะรับแรงดึงไม่ได้จากการแตกร้าว ดังนั้นส่วนโครงสร้างบริเวณใดที่เกิดแรงดึงจะต้องทำการเสริมเหล็ก แต่เมื่อนำไปก่อสร้างในบริเวณที่อยู่ในน้ำที่มีคลอไรด์สูงจะเกิดการสะสมคลอไรด์ในคอนกรีตและทำให้เหล็กเส้นถูกกัดกร่อนเป็นสนิมได้ รูปที่ 1 แสดงบ้านพักอาศัยในพื้นที่ตำบลดงเจน อำเภอกงหรา จังหวัดพะเยา ที่เหล็กเส้นในโครงสร้างเสาถูกกัดกร่อนเป็นสนิมและดันคอนกรีตหุ้มให้แตกออก จากการสำรวจในพื้นที่เบื้องต้น มีระดับน้ำใต้ดินประมาณ 1 เมตร จากผิวดิน น้ำในบ่อมีปริมาณคลอไรด์ที่สูงประมาณ 845 mg/l และคอนกรีตจากตัวอย่างเสา มีปริมาณคลอไรด์ประมาณ 1.6%



รูปที่ 1 โครงสร้างเสาที่เหล็กเส้นถูกกัดกร่อนเป็นสนิมและต้นคอนกรีตหุ้มแตก

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการกัดกร่อนเหล็กเส้นในโครงสร้างเสาจนเป็นสนิม จำเป็นต้องใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer) มาทำเป็นเหล็กเส้นเพื่อใช้ทดแทนเหล็กเส้นจริง มาตรฐานอุตสาหกรรม เลขที่ 2973 (มอก.2973) กำหนดให้เหล็กเส้นที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมี 3 ประเภท คือ เหล็กเส้น AFRP (Aramid-Fiber Reinforced Polymer) เหล็กเส้น CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polymer) และเหล็กเส้น GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer) [1] เหล็กเส้น CFRP จะมีกำลังรับแรงดึงสูงสุดมากกว่า 1,100 MPa และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 140 GPa ในขณะที่เหล็กเส้น GFRP ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้ในประเทศไทยมากที่สุด มีกำลังดึงในช่วง 450-750 MPa ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 60 GPa หากเทียบคุณสมบัติเชิงกลดังกล่าว เหล็กเส้น CFRP น่าจะคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กเส้นจริงมากกว่า เหล็กเส้น GFRP แต่เหล็กเส้น CFRP มีต้นทุนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมที่สูงกว่า อีกทั้งเหล็กเส้น GFRP มีกำลังดึงที่สูงกว่าเหล็กเส้นจริงอยู่แล้ว จึงทำให้เหล็กเส้น GFRP เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่เสริมเหล็กเส้น FRP นั้น มีแนวทางการออกแบบตามมาตรฐาน ACI440 ซึ่งให้แนวทางการออกแบบโครงสร้างที่รับแรงดัดและแรงเฉือน แต่ไม่มีแนวทางการออกแบบโครงสร้างที่รับแรงอัด โดย ACI440.1 ไม่แนะนำให้คำนวณค่าความเค้นในเหล็กเส้น FRP มาออกแบบให้รับแรงอัด [2] ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างรับแรงอัดจึงพิจารณาเฉพาะความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากเหล็กเส้น FRP มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าเหล็กเส้นจริง โดยเฉพาะเหล็กเส้น GFRP ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กถึง 3.3 เท่า จึงอาจส่งผลให้เหล็กเส้น GFRP เมื่อรับความเค้นอัดในโครงสร้างเสาแล้วเกิดการโก่งเดาะได้ง่าย ซึ่งอาจทำให้กำลังรับแรงอัดของเสามีค่าน้อยลงได้ การวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของโครงสร้างเสาที่เสริมเหล็กเส้น GFRP เพื่อหาแนวทางการออกแบบโครงสร้างเสาที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP ด้วยวิธีการทดสอบ

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กเส้น GFRP ด้วยวิธีการทดสอบ

1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP โดยคำนึงการโก่งเดาะ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจึงจะมีสมมติฐานว่าคอนกรีตและเหล็กเส้นตามยาวหดตัวเท่ากัน หรือมีความเครียดอัดในคอนกรีตและเหล็กเส้นตามยาวเท่ากัน เนื่องจากที่ความเครียดอัดประลัยของคอนกรีต (ประมาณ 0.003) คอนกรีตจะถูกอัดแตกและเหล็กเสริมตามยาวจะถูกอัดจนเลยจุดครากโดยที่ไม่มีการโก่งเดาะของเหล็กเส้นตามยาว กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาเส้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามมาตรฐาน ACI318 [3] จึงให้คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s \quad (1)$$

โดยที่ P_0 คือ กำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก f'_c คือหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต f_y คือ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา และ A_s คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริม

ในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น FRP หากยึดตามมาตรฐานการออกแบบ ACI440 กำลังอัดของเสาคอนกรีตจะรับโดยคอนกรีตเพียงอย่างเดียว โดยไม่คิดผลของเหล็กเส้น GFRP ช่วยรับแรงอัด ดังนั้น สมการการคำนวณกำลังรับแรงอัดจึงเขียนได้ตามสมการที่ (2)

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) \quad (2)$$

Tobbi et al. [4] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสา คอนกรีตขนาด 350x350 mm เสริมเหล็กตามยาวและเหล็กปลอกด้วยเหล็กเส้น GFRP แต่เหล็กตามยาวเป็นเหล็กเส้น GFRP ขนาด 19 mm และ 15.9 mm เหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้น GFRP ขนาด 12.7 mm ระยะเรียง 120 mm ถึงแม้ว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้น GFRP ในการศึกษานี้จะแตกต่างจากเหล็กเส้นจริง 4 เท่า แต่เนื่องจากใช้เหล็กปลอกขนาดใหญ่และเรียงถี่ ทำให้อัตราส่วนความเค้นของเหล็กเสริมตามยาว L/D ในช่วง 6.3-7.5 จึงทำให้ช่วยชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวและโอบรัดแกนคอนกรีตได้ดี และพบว่ากำลังอัดหากไม่คิดผลของเหล็กเส้น GFRP ตามสมการที่ (2) จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง จึงให้เหล็กเส้น GFRP ที่เป็นเหล็กเสริมตามยาวมีส่วนร่วมในการรับแรงอัดโดยให้ใช้กำลังอัดเพียง 0.35 เท่าของกำลังรับแรงดึง ตามสมการที่ (3) แต่มีข้อสังเกตว่าการวิจัยนี้ใช้เหล็กปลอกขนาดใหญ่ในการยึดรั้งป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้ดี อีกทั้งโอบรัดแกนคอนกรีตได้ดีด้วย

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) + 0.35f_u A_s \quad (3)$$

Abbas et al. [5] ทดสอบเสาคอนกรีตขนาด 250x250 mm เสริมเหล็กตามยาวเป็นเหล็กเส้น GFRP ขนาด 8 mm และ 12 mm แต่เสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นจริงขนาด 8 mm โดยมีระยะเรียง 6 8 และ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเหล็กปลอกที่เป็นเหล็กจริงมีความแข็งแรงที่โอบรัดและป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้เป็นอย่างดี สมการทำนายกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเพิ่มส่วนของเหล็กเส้น GFRP รับแรงอัดได้ดังสมการที่ (4) โดยที่ E_f คือ มอดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้น GFRP และ ε_f คือ ความเครียดอัดของเหล็กเส้น GFRP ที่จุดวิบัติของเสา

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_s) + E_f\varepsilon_fA_s \quad (4)$$

ในกรณีที่เหล็กปลอกโอบรัดแกนคอนกรีตได้ดี ความเครียดอัดที่จุดวิบัติจะมีค่ามากกว่า 0.003 Abbas et al. จึงเสนอให้ใช้ ε_f เท่ากับ 0.003 ในการทำนายกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP ทั้งนี้ต้องมั่นใจว่าเหล็กปลอกมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว GFRP และควรมีระยะเรียงไม่เกิน 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว [4]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามยาวและเหล็กปลอกด้วยเหล็กเส้น GFRP โดยให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะโดยการทดสอบ การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบให้แรงดึงและแรงอัดกับเหล็กเส้น GFRP ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบเสาคอนกรีตขนาด 250x250 mm เสริมเหล็กเส้น GFRP ให้รับแรงอัดตามแนวแกน พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ จำนวนเหล็กเสริมตามยาว และระยะเรียงของเหล็กปลอก โดยเหล็กปลอก GFRP จะมีขนาดที่เล็กกว่างานวิจัยอื่นเพื่อให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ



รูปที่ 2 การทดสอบรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

3.1 วิธีการทดสอบให้แรงดึงและแรงอัดกับเหล็กเส้น GFRP

การทดสอบรับแรงดึงจะทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำเหล็กเส้น GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เท่ากับ 16 mm ไปกลึงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเป็น 9 mm เป็นระยะ 100 mm เพื่อให้เกิดการขาดในช่วง

นี้เมื่อทำการทดสอบ การทดสอบจะติดตั้งเครื่องมือวัดระยะยืด (Extensometer) ในช่วง 50 mm เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น การทดสอบจะให้แรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังรูปที่ 2

การทดสอบการรับแรงอัดทำการนำเหล็ก GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เท่ากับ 16 mm ไปตัดด้วยการกลึงให้ผิวหน้าตัดเรียบและมีความยาว L เท่ากับ 125 175 200 250 และ 350 mm การทดสอบจะทำการสวมหัวจับที่ปลายตัวอย่าง หัวจับมีรูกลึง 50 mm จึงทำให้ช่วงการโก่งเดาะของตัวอย่างเหล็กเส้น GFRP ลดลงเป็น L_e เท่ากับ 25 75 100 150 และ 250 mm ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวช่วงการโก่งเดาะต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง L_e/d เท่ากับ 1.56 4.68 6.25 9.37 และ 15.62 ตามลำดับ การให้แรงกดใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทดสอบรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

3.2 วิธีการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก GFRP

การศึกษานี้จะทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตทั้งหมด 4 ตัวอย่าง เสามิขนาดหน้าตัด 250x250 mm มีความสูง 450 mm และเสริมเหล็ก GFRP ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D เท่ากับ 16 mm เป็นเหล็กเสริมตามยาว และเสริมเหล็ก GFRP เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm เป็นเหล็กปลอกโดยมีระยะเรียงแตกต่างกัน ดังแสดงตารางที่ 1 รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 4 กำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วันจะมีค่ากำลังอัดทรงกระบอกเฉลี่ย 37 MPa

การทดสอบจะนำตัวอย่างไปให้แรงอัดด้วยเครื่องกดขนาด 3000 kN ดังแสดงในรูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของแท่นอัดจะวัดโดยใช้อุปกรณ์ LVDT นอกจากนี้ที่ผิวคอนกรีตจะติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauge) เพื่อตรวจสอบการกระเทาะออกของคอนกรีตหุ้ม ค่าแรงอัด ระยะการเคลื่อนที่ของแท่นอัด และความเครียดอัดจะถูกบันทึกไว้

ตารางที่ 1 การเสริมเหล็กเส้น GFRP ในเสาคอนกรีต

ตัวอย่างเสา	เหล็กตามยาว	เหล็กปลอก
CL4S75	GFRP 4 เส้น ϕ 16 mm	GFRP ϕ 6 mm@75mm
CL4S150	GFRP 4 เส้น ϕ 16 mm	GFRP ϕ 6 mm@150mm
CL4S250	GFRP 4 เส้น ϕ 16 mm	GFRP ϕ 6 mm@250mm
CL8S150	GFRP 8 เส้น ϕ 16 mm	GFRP ϕ 6 mm@150mm



รูปที่ 4 รายละเอียดการเสริมเหล็กเส้น GFRP



รูปที่ 5 การทดสอบรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP

4. ผลการวิจัย

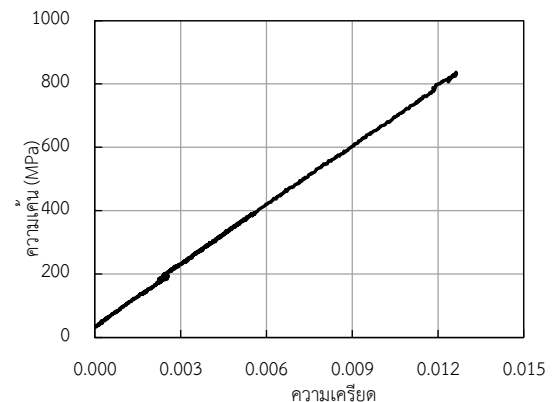
4.1 พฤติกรรมการรับแรงดึงและแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP

การทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้น GFRP จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 6 กำลังรับแรงดึงสูงสุด (f_u) เท่ากับ 837.56 MPa และมอดูลัสยืดหยุ่น (E_f) เท่ากับ 62.9 GPa ซึ่งเป็นไปตามมอก. 2973 ชั้นคุณภาพ ค.

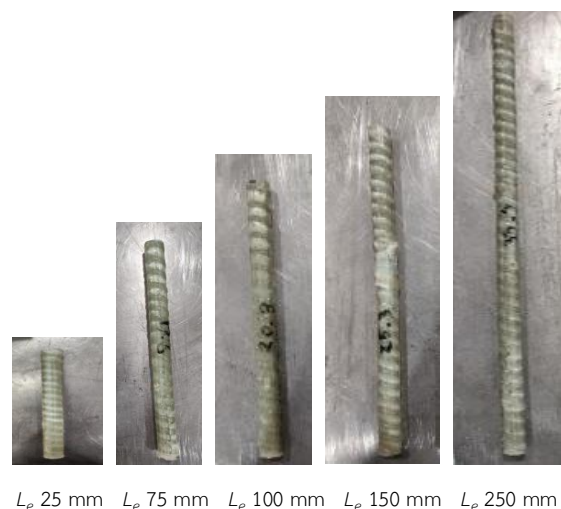
การทดสอบแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP ที่ความยาว L_e ต่าง ๆ ได้ค่าแรงอัดซึ่งนำมาคำนวณเป็นความเค้นโดยนำแรงอัดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดความเค้นอัดสูงสุด f'_u ที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 และมีลักษณะการวิบัติดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงดึง f_u หากพิจารณาการวิบัติของตัวอย่างเหล็กเส้น GFRP ที่มีช่วงโง่เกาะสั้น L_e เท่ากับ 25 75 และ 100 mm การวิบัติจะเกิด

จากการรับแรงอัดโดยมีผลของการโง่เกาะน้อย กำลังรับแรงอัดในช่วงนี้จะมีค่าประมาณ 0.65-0.70 เท่าของกำลังรับแรงดึง การวิบัติเกิดขึ้นที่หน้าตัดปลายเหล็กเส้นจะถูกอัดจนแตก ในขณะที่เหล็กเส้น GFRP ที่มีช่วงโง่เกาะยาว L_e เท่ากับ 150 และ 250 mm กำลังรับแรงอัดลดลงมากเหลือเพียง 0.57 และ 0.26 เท่าของกำลังรับแรงดึง เนื่องจากการทดสอบจะเห็นการวิบัติจากการดัดที่กลางช่วงหรือการดัดที่ฐานหัวจับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ในตัวอย่างที่ L_e เท่ากับ 75 mm ระหว่างการทดสอบได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะหด (Extensometer) จึงทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัดได้ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นด้านรับแรงอัด E'_f เท่ากับ 50.3 GPa ซึ่งคิดเป็น 0.80 เท่าของมอดูลัสยืดหยุ่นด้านรับแรงดึง เมื่อนำผลการทดสอบของตัวอย่าง L_e เท่ากับ 150 และ 250 mm ที่เกิดการโง่เกาะมาพิจารณาเพื่อประมาณกำลังรับแรงอัดโดยดัดแปลงจากสมการของออยเลอร์ [6] ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

$$f'_u = 0.0874 \frac{\pi^2 E'_f}{(L_e/D)^2} \quad (5)$$

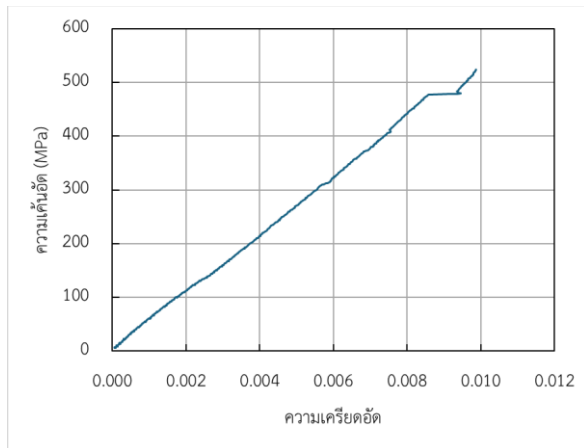


รูปที่ 6 ความเค้นและความเครียดดึงของตัวอย่างเหล็กเส้น GFRP



L_e 25 mm L_e 75 mm L_e 100 mm L_e 150 mm L_e 250 mm

รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของเหล็กเส้น GFRP รับแรงอัด



รูปที่ 8 กราฟความเค้นและความยาวของตัวอย่าง L_e เท่ากับ 75 mm

ตารางที่ 2 รายละเอียดแสดงขนาดความยาวแต่ละตัวอย่างไป

L (mm)	L_e (mm)	L_e/D	P'_{max} (kN)	f'_u (MPa)	f'_u/f_u
125	25	1.56	116.35	578.7	0.69
175	75	4.69	109.16	542.9	0.65
200	100	6.25	118.16	587.7	0.70
250	150	9.37	96.22	478.6	0.57
350	250	15.62	44.49	221.3	0.26

4.2 พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น GFRP

ตัวอย่างเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กเส้น GFRP ในการศึกษาที่ใช้เหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้น GFRP ขนาด 6 mm ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอจะป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว การวัดของตัวอย่างเสาคอนกรีตทุกตัวอย่างจึงมีลักษณะการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวและดันคอนกรีตหุ้มให้แตกออก โดยสังเกตเห็นรอยแตกกว้างในแนวตั้งของคอนกรีตหุ้ม รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างเสาหลังจากทำการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตหุ้มแตกออกและเหล็กเส้นตามยาวโก่งตัว

ตัวอย่างเสา CL4S250 จะโก่งเดาะช่วงยาว L_e เท่ากับ 250 mm ในขณะที่ตัวอย่าง CL4S150 จะโก่งเดาะช่วงยาว L_e เท่ากับ 150 mm ตามระยะเรียงเหล็กปลอก ในขณะที่ตัวอย่าง CL4S75 ซึ่งมีระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ 75 mm แต่เหล็กปลอกไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะให้เหล็กตามยาวโก่งเดาะช่วง L_e เท่ากับ 75 mm (ดูรูปที่ 9 จะเห็นว่าเหล็กปลอกขาด) จึงทำให้เหล็กเส้นในตัวอย่างนี้โก่งเดาะในช่วงความยาว 2 เท่าของระยะเรียง นั่นคือ L_e เท่ากับ 150 mm สำหรับตัวอย่าง CL8S150 ที่มีเหล็กเสริมตามยาวเพิ่มขึ้นทำให้เหล็กปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมให้โก่งเดาะที่ความยาว L_e เท่ากับ 150 mm ไม่ได้ จึงทำให้เกิดการโก่งเดาะในช่วง 2 เท่าของระยะเรียง ดังนั้น ช่วงการโก่งเดาะจึงเป็น L_e เท่ากับ 300 mm



(ก) CL4S75



(ข) CL4S150



(ค) CL4S250



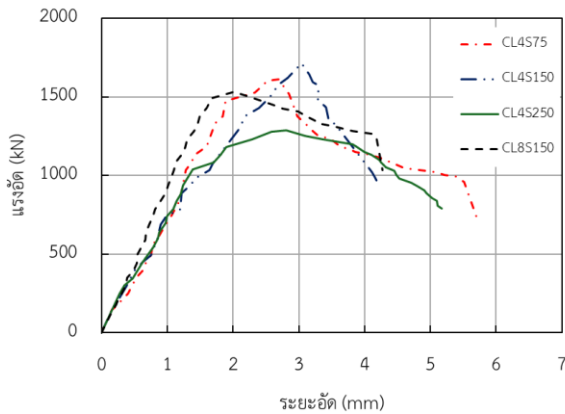
(ง) CL8S150

รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา

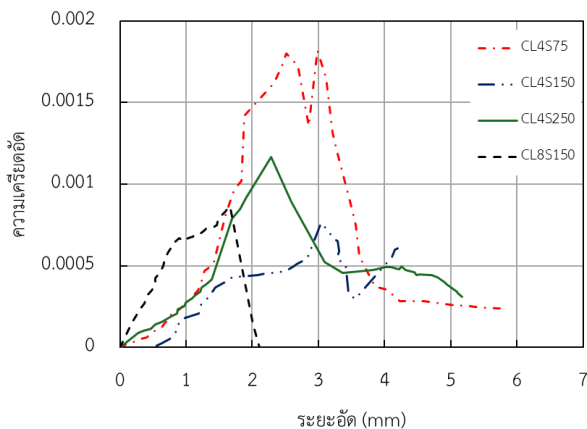
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะอัดวัดจาก LVDT จะเห็นว่าตัวอย่างเสา CL4S250 ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างเสาอื่น และตัวอย่างเสาอื่นมีกำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนรูปที่ 11 เป็นค่าความเครียดจากก่อดัดความเครียดที่ผิวคอนกรีต จะเห็นว่าความเครียดอัดจะเพิ่มขึ้นตามแรงอัดและเมื่อคอนกรีตหุ้มถูกเหล็กเส้นที่โก่งเดาะดันให้แตก ความเครียดอัดจะลดลงซึ่งตรงกับจุดที่ได้แรงอัดสูงสุด เนื่องจากที่แรงอัดสูงสุดเหล็กเส้นตามแนวยาวได้ดันคอนกรีตหุ้มให้แตกออกแล้ว ดังนั้นคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดจึงควรพิจารณาเฉพาะแกนคอนกรีตเท่านั้น และ

กำลังอัดของเหล็กเส้น f_u' ที่นำมาคำนวณควรเป็นไปตามสมการที่ (5) ดังนั้น กำลังอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตที่เกิดการโก่งเดาะจะคำนวณได้ตามสมการที่ (6) โดยที่ A_{core} คือพื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต

$$P_0 = 0.85f_c'(A_{core} - A_s) + f_u'A_s \quad (6)$$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะเคลื่อนที่อัดจาก LDVT



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและระยะเคลื่อนที่อัดจาก LDVT

ตารางที่ 3 กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก GFRP ที่เกิดการโก่งเดาะ

ตัวอย่างเสา	แรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ, $P_{0,exp}$ (kN)	ความยาวช่วงการโก่งเดาะ L_e (mm)	แรงอัดสูงสุดจากสมการ (6), $P_{0,predict}$ (kN)	$P_{0,predict}/P_{0,exp}$
CL4S75	1609	150	1605	0.997
CL4S150	1713	150	1605	0.937
CL4S250	1286	250	1351	1.050
CL8S150	1530	300	1381	0.903

ตัวอย่างเสาที่มีระยะคอนกรีตหุ้ม 20 mm และเหล็กปลอกขนาด 6 mm ดังนั้น ความกว้างของแกนคอนกรีตเท่ากับ 198 mm ได้พื้นที่หน้าตัดแกนคอนกรีต A_{core} เท่ากับ 39,204 mm² สำหรับแรงอัดในเหล็กเส้นจะ

ขึ้นอยู่กับความยาวช่วงการโก่งเดาะ L_e ตามสมการที่ (5) ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกำลังอัดจากการทดสอบและค่าที่ทำนายได้โดยใช้สมการที่ (6) จะเห็นได้ว่าทำนายได้ใกล้เคียงกับการทดสอบในงานวิจัยนี้

5. สรุปผล

ข้อมูลการทดสอบในงานวิจัยนี้ยังคงมีน้อย และเป็นข้อมูลเบื้องต้นให้เข้าใจพฤติกรรมของเสาที่เสริมเหล็กเส้น GFRP ในอนาคตยังคงต้องมีการทดสอบอีกมากเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งขึ้น จากข้อมูลการทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถนำมาสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเหล็กเส้น GFRP พบว่าเหล็กเส้นที่มีความขรุขระ L/D ไม่เกิน 6 จะไม่เกิดการโก่งเดาะ และมีกำลังอัดประมาณ 0.65-0.70 เท่าของกำลังรับแรงดึง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงอัดจะมีค่า 0.80 เท่าของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงดึง
2. ตัวอย่างเสาในการศึกษานี้เสริมเหล็กปลอก GFRP ขนาดเล็ก ถึงแม้จะมีระยะเรียงถี่แต่ไม่สามารถควบคุมไม่ให้เกิดการโก่งเดาะได้ โดยเหล็กเส้น GFRP จะโก่งเดาะแล้วดันคอนกรีตหุ้มให้แตกออกด้านข้าง การวิจัยนี้จึงเสนอให้การทำนายกำลังอัดสูงสุดต้องไม่คำนึงถึงคอนกรีตหุ้ม และกำลังอัดของเหล็กเส้น GFRP ต้องพิจารณาการโก่งเดาะด้วย
3. เสาตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว 8 เส้น โดยมีเหล็กเส้นตามยาวบางเส้นไม่ได้ยึดด้วยเหล็กปลอก จะทำให้กำลังอัดลดลงเร็วกว่าตัวอย่างที่มีเหล็กตามยาว 4 เส้น ดังนั้น เหล็กตามยาวทุกเส้นควรมีเหล็กปลอกยึดรั้งป้องกันการโก่งเดาะ

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนทุนการทำโครงการทางวิศวกรรมโยธาปีการศึกษา 2567

ขอขอบคุณ บริษัท รีบาร์ ไฟเบอร์ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่สนับสนุนจัดหาเหล็กเส้น GFRP ให้ใช้ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 2973. (2562). พอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [2] ACI Committee 440. (2006). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. American concrete institute.
- [3] ACI Committee 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American concrete institute.
- [4] Tobbi, H., Farghaly, A. S. and Benmokrane, B. (2012). Concrete columns reinforced longitudinally and transversally with glass fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*, 109(4), pp.551-558.

- [5] Abbas, H., Alanzi, M.A., Elsanadedy, H., Almusallam, T., Abadel, A. and Al-Salloum, Y. (2023). Effect of tie spacing and GFRP rebar diameter on compression behavior of concrete columns. *Journal of Building Engineering*, 72, 106740, pp. 1-21.
- [6] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. (1961). *Theory of elastic stability*, McGraw-Hill.