ประสิทธิภาพการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

Axial compressive performance of reinforced-concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets

ชานน อนันต์ศุภมงคล* ชนะชัย ทองโฉม และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: chanon.anan@dome.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) โดยตัวแปรการศึกษาประกอบด้วยรูปแบบการเสริมกำลังของแผ่น CFRP และปริมาณการติดตั้ง CFRP ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 250×250×1000 มม. ทุกตัวอย่างเสามีอัตราส่วนเหล็กเสริมคอนกรีต 3.0 เปอร์เซ็นต์ ทำการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาตัวอย่าง รวมถึงลักษณะการวิบัติ จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างมีกำลังเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP โดยตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมกำลังที่ตำแหน่งเหล็กปลอก 3 รอบ มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 23.2% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยการวิบัติของตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างเกิดจากการวิบัติของคอนกรีต

คำสำคัญ: เสาสั้น, คอนกรีตเสริมเหล็ก, แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, การเสริมกำลัง, กำลังรับแรงอัด

Abstract

This study investigates the axial behavior of short rectangular reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets, with a focus on the effect of different levels of confinement and CFRP layers. The dimensions of the columns are 250×250×1000 mm. with a steel reinforcement ratio of 3.0% and externally CFRP bonded strengthening. Load-carrying capacity and failure mode are examined experimentally in this work. The results show that partial confinement with three layers of stirrups produces the highest increase in ultimate axial strength, at 23.2% compared to the control column. The failure mode for all specimens is due to concrete failure.

Keywords: short columns, reinforced concrete, carbon fiber reinforced polymer sheets, strengthening, axial load

1. บทนำ

เสาเป็นองค์อาคารที่เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างเนื่องจากต้องรับน้ำหนักจากพื้นและคาน หากเสาเกิดการวิบัติหรือความเสียหายขึ้นทำให้ความสามารถมารถในการรับแรงอัดหรือโมเมนต์ลดลง อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอื่นๆตามมา อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้อาคารได้ สาเหตุของความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นได้ อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชั่นการใช้งาน อายุของอาคาร หรือการเสื่อมสภาพตามสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เป็นต้น ดังนั้น การเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงจึงเป็นสิ่งจำเป็น วิธีการเสริมกำลังชิ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีหลายวิธี เช่น การเพิ่มหน้าตัดเสา การใช้เหล็กเสริม หรือการใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันการใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเสริมกำลังภายนอกมีได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจาก เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ใช้งานง่ายสะดวกในการติดตั้ง มีความแข็งแรง ทนต่อแรงดึงได้ดี

จากผลทดสอบของวิจัยในอดีต พบว่า เสาที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน มีความสามารถในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ [1-3] มีการศึกษารูปแบบการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย รวมไปถึงมีงานวิจัยได้เปรียบเทียบผลของการรับแรงอัดระหว่างการใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ผลการทดสอบพบว่า การใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน มีผลที่ดีกว่าการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีกำลังรับแรงดึงที่สูงกว่า [3]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสั้นที่เสริมกำลังภายนอกโดยใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ตัวเปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย รูปแบบการเสริมกำลังของแผ่น CFRP และปริมาณการติดตั้งแผ่น CFRP โดยเสาตัวอย่างทั้งหมดจะทำการทดสอบแบบตรงศูนย์จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ สำหรับพฤติกรรมที่ได้ทำการศึกษา ประกอบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างการรับ

แรงอัดและการเสียรูป ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงอัดและความเครียด รวมไปถึง ลักษณะการวิบัติ เป็นต้น

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุ

2.1.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้สำหรับตัวอย่างในการทดสอบจะเป็นคอนกรีตกำลังอัดปรกติ หรือ Ordinary Portland concrete (OPC) คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 264 กก./ตร.ซม จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 150×300 มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง

2.1.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้มี 2 ประเภท คือ เหล็กข้ออ้อย (Deformed bar, DB) คุณภาพชั้น SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 มม. (DB20) จากการทดสอบแรงดึง พบว่าเหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก และกำลังรับแรงแรงสูงสุด เท่ากับ 5,412 และ 6,716 กก./ตร.ซม ตามลำดับ สำหรับเหล็กกลม (Round bar, RB) คุณภาพชั้น SR24 จากการทดสอบแรงดึงพบว่าเหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก และกำลังรับแรงแรงสูงสุดเท่ากับ 3,114 และ 4,217 กก./ตร.ซม ตามลำดับ

2.1.3 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

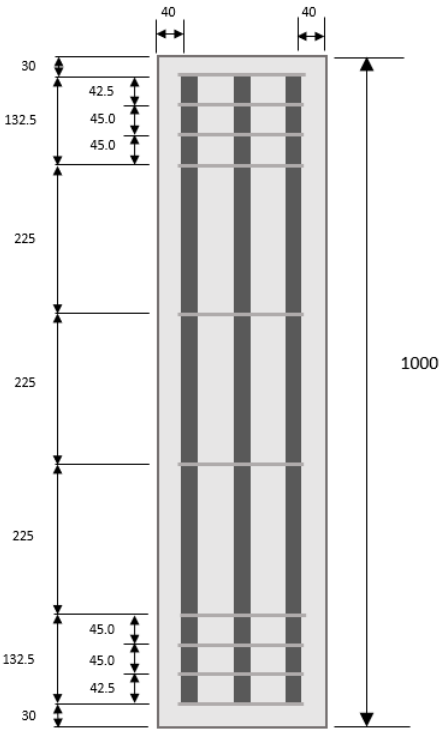
แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน SikaWarp®-230C มีความหนาเท่ากับ 0.129 มม. มีกำลังรับแรงดึงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 3500 MPa และ 220 GPa ตามลำดับ [4] โดยใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด Sikadur®-330 [5]

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

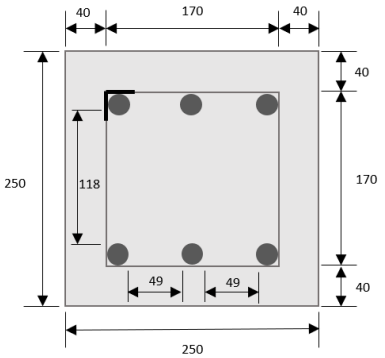
ตัวอย่างเสาทดสอบในงานวิจัยนี้มีจำนวน 5 ตัวอย่าง ประกอบด้วยเสาควบคุม จำนวน 1 ตัวอย่าง (CC) เสาที่เสริมกำลังมีจำนวน 4 ตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมกำลังที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ตำแหน่งการเสริมการเสริมกำลังระหว่างเหล็กปลอกจำนวน 2 รอบ (เสาตัวอย่าง CA2) จำนวน 3 รอบ (เสาตัวอย่าง CA3) และตำแหน่งเหล็กปลอกจำนวน 2 รอบ (เสาตัวอย่าง CB2) จำนวน 3 รอบ (เสาตัวอย่าง CB3)

2.2.1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

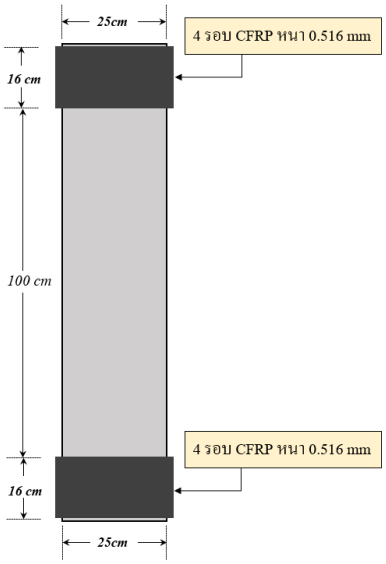
ในการทดสอบ การออกแบบตัวอย่างเสาอ้างอิงตามมาตรฐาน ACI318-95 [6] โดยจะใช้เป็นเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 25×25×100 ซม. ใช้เหล็กเสริมกำลังข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. (DB20) สำหรับเป็นเหล็กยืนของเสาคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนการเสริมเหล็กที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเหล็กปลอกของเสาตัวอย่างใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. มีระยะเรียงเท่ากับ 22.5 ซม. ในช่วงที่ทำการศึกษาสำหรับระยะหุ้มคอนกรีตที่ใช้มีค่าเท่ากับ 4.0 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 สำหรับเสาตัวอย่างควบคุมจะทำการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เพื่อป้องกันการวิบัติบริเวณพื้นที่การให้แรงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสาคอนกรีต



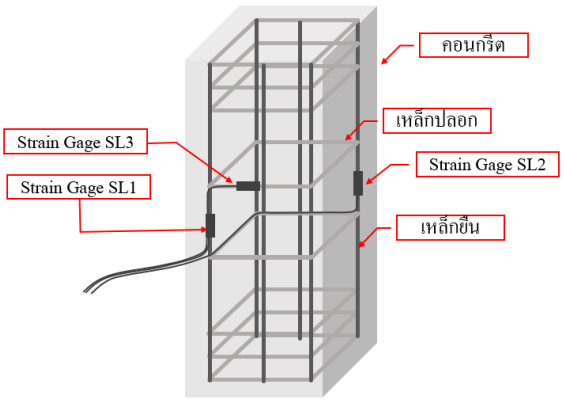
รูปที่ 2 หน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 3 เสาตัวอย่าง CC

2.2.2 การติดตั้งมาตรวัดความเครียด

ในการทดสอบ เสาตัวอย่างจะทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดจำนวน 3 ตำแหน่ง โดยมาตรวัดความเครียด 2 ตำแหน่ง (SL1 และSL2) เพื่อวัดค่าความเครียดตามแนวแกนบนเหล็กเสริมตามยาวและ มาตรวัดความเครียด 1 ตำแหน่ง (SL3) ติดตั้งที่บริเวณเหล็กปลอก ดังรูปที่ 4

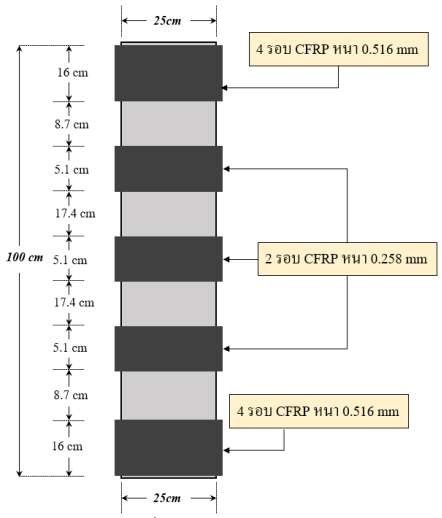


รูปที่ 4 ตำแหน่งของมาตรวัดความเครียด

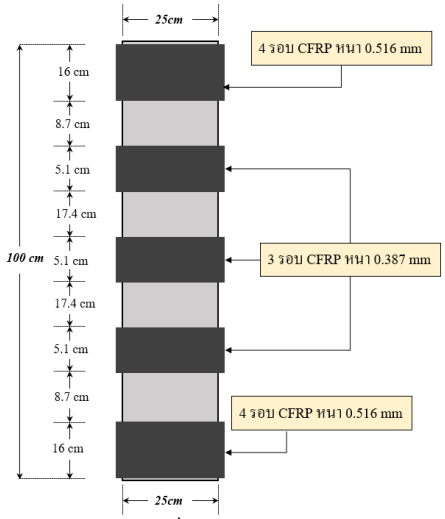
2.2.3 เสาตัวอย่างที่ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP

เสาที่เสริมกำลังมีจำนวน 4 ตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมกำลังที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ตำแหน่งการเสริมการเสริมกำลังระหว่างเหล็กปลอกจำนวน 2 รอบ (เสาตัวอย่าง CA2) ดังรูปที่ 5 เสาตัวอย่าง CA3 แสดงรายละเอียดการเสริมกำลังในรูปที่ 6 และสำหรับตัวอย่างเสาที่เสริมกำลังที่ตำแหน่งเหล็กปลอกจำนวน 2 รอบ (เสาตัวอย่าง CB2) และ 3 รอบ (เสาตัวอย่าง CB3) แสดงรายละเอียดการเสริมกำลังในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

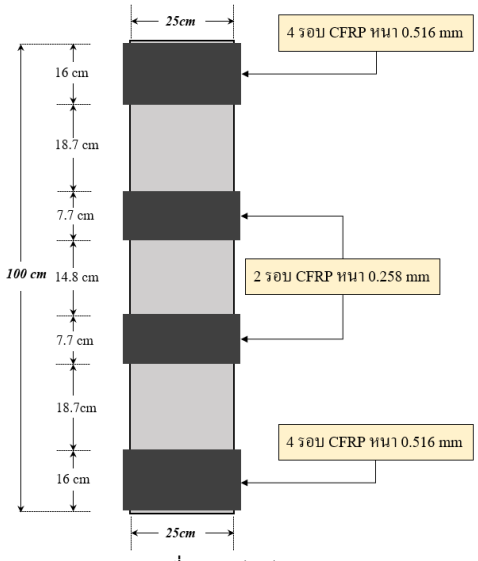
การติดตั้งวัสดุเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะติดตั้งหลังจากบ่มเสาคอนกรีตครบ 28 วัน เริ่มแรกจะเตรียมพื้นผิวตัวอย่างทดสอบ ก่อนทำการติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง ด้วยการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการขัด และทำการลบมุมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรัศมีเท่ากับ 2.5 ซ.ม. [7] หลังจากการเตรียมพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบแล้ว จะทำการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยวัสดุเชื่อมประสาน ชนิด Sikadur®-330 โดยมีระยะทาบเท่ากับ 15 ซม.[2] และจากนั้นทำการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 14 วัน เพื่อที่จะทดสอบการรับแรงอัดต่อไป



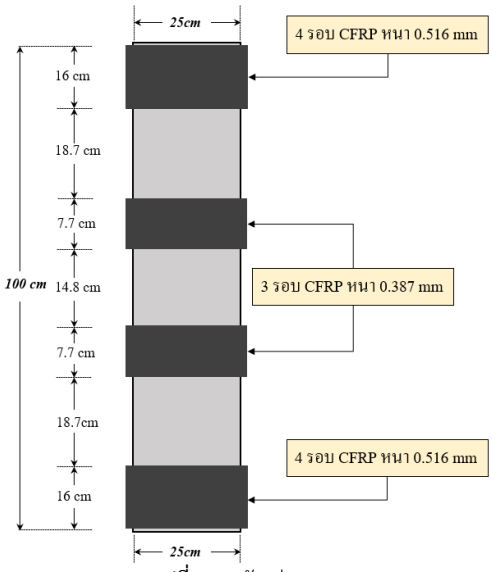
รูปที่ 5 เสาตัวอย่าง CA2



รูปที่ 6 เสาตัวอย่าง CA3



รูปที่ 7 เสาตัวอย่าง CB2



รูปที่ 8 เสาตัวอย่าง CB3

2.3 การทดสอบการรับแรงอัด

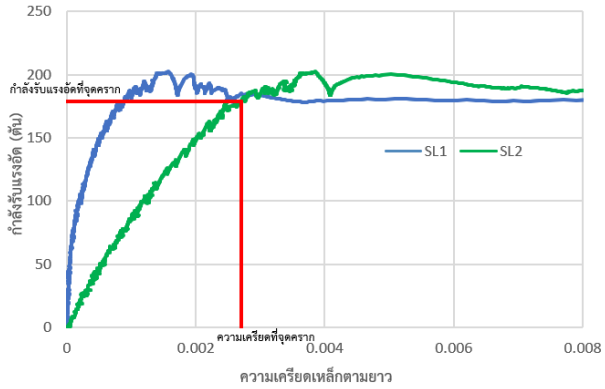
การทดสอบตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 5 ตัวอย่างได้แก่ เสาตัวอย่างควบคุมและเสาที่ได้รับการเสริมกำลัง จะถูกให้แรงกระทำตามแนวแกนผ่าน Load cell ขนาด 300 ตัน และติดตั้ง Linear Variable Differential Transformer (LVDT) 3 ตัว สำหรับวัดการหดตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างการทดสอบโดยติดตั้งบริเวณด้านข้างของเสา 2 ตัว และบริเวณหัวเสา 1 ตัว ซึ่งการให้น้ำหนักเป็นแบบ การควบคุมโดยการเคลื่อนตัวที่ 0.3 มม./นาที ในช่วงเริ่มต้นถึงช่วงกำลังอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังจากนั้นใช้การให้แรงอัดอัตราเร่งการให้แรงเท่ากับ 1.5 มม./นาที จนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กถึงสภาวะวิบัติ [8] การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสาตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 9 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสาตัวอย่าง

3. การทดสอบ

3.1 กำลังรับแรงอัด

ในงานวิจัยนี้หากำลังอัดที่จุดคราก และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับกำลังรับแรงอัดที่จุดครากนั้นจะใช้ค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมเท่ากับ 0.0027 ซึ่งการหากำลังรับแรงอัดที่จุดครากของตัวอย่างทดสอบ โดยการดูค่าความเครียดจากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้บนเหล็กเสริมตามยาว เช่นตัวอย่าง CB3 ที่ค่าความเครียด 0.0027 กำลังรับรับแรงอัดที่จุดนี้เท่ากับ 179 ตัน แสดงในรูปที่ 10 โดยทุกตัวอย่างทดสอบจะใช้วิธีนี้ในการค่าค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดคราก



รูปที่ 10 กำลังรับน้ำหนักบรรทุก-ค่าความเครียดเหล็กตามยาว CB3

ตารางที่ 1 กำลังแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลัง

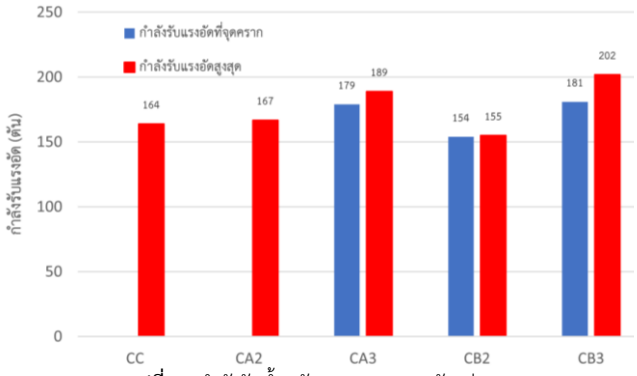
ตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับแรงอัดที่จุดคราก (ตัน)	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (ตัน)
CC	-	164
CA2	-	167
CA3	179	189
CB2	154	155
CB3	181	202

*** "-" ไม่สามารถทราบค่าความเครียดที่จุดครากจากเหล็กเสริมตามยาว*

โดยในงานวิจัยจะศึกษาเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม จากสามารถหากำลังประลัยของเสาตัวอย่างได้จากสมการ (1) [6] ซึ่งได้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 168 ตัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่าง CC จากตารางที่ 1 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 164 ตัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากสมการทำนาย

$$P_0=0.80[f_y A_s+0.85f_c^{'}(A_g-A_s)] \quad (1)$$

โดย P_0 หมายถึงกำลังรับแรงอัดระบุ, f_y คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม, $f_c^{'}$ คือหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต, A_s คือ พื้นที่เหล็กเสริมตายาวและ A_g คือพื้นที่ของหน้าตัดเสา



รูปที่ 11 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาตัวอย่าง

จากรูปที่ 11 แสดงถึงประสิทธิภาพการรับกำลังอัดที่จุดคราก และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตัวอย่าง CA2 จากการตรวจสอบไม่พบค่าความเครียดจากมาตรวัดความเครียด ในส่วนกำลังรับแรงอัดสูดสุดมีค่า 167 ตัน มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 1.8% เมื่อเทียบกับตัวอย่าง CC

ตัวอย่าง CA3 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดคราก และกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 179 และ 189 ตัน ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดสูงสุดกับกำลังรับแรงอัดที่จุดครากต่างกัน 5.6% และตัวอย่าง CA3 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 15.2% และ 13.2% เมื่อเทียบกับตัวอย่าง CC และ CA2 ตามลำดับ

ตัวอย่าง CB2 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดคราก และกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 154 และ 155 ตัน ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดสูงสุดกับกำลังรับแรงอัดที่ค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเทียบกับตัวอย่าง CC เสาตัวอย่าง CB2 มีกำลังรับแรงอัดลดลง 5.5%

ตัวอย่าง CB3 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดคราก และกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 181 และ 202 ตัน ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดสูงสุดกับกำลังรับแรงอัดที่จุดครากต่างกัน 11.6% และตัวอย่าง CB3 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 23.2% และ 30.3% เมื่อเทียบกับตัวอย่าง CC และ CA2 ตามลำดับ

3.2 ลักษณะการวิบัติ

ตัวอย่าง CC ในช่วงเริ่มต้นการแตกร้าวจากคอนกรีตบริเวณใต้แผ่น CFRP และเมื่อผ่านไปช่วงระยะนึงการแตกร้าวจะไล่ลงมาบริเวณกลางเสาคอนกรีตจนถึงการวิบัติด้วยการกะเทาะตัวออกของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 12

รูปที่ 12 การวิบัติของตัวอย่าง CC

ตัวอย่าง CA2, CA3, CB2 และ CB3 การแตกร้าวจะเริ่มขึ้นบริเวณคอนกรีตช่วงหัวเสาระหว่างช่วงการเสริมกำลัง และเมื่อผ่านไประยะนึงการแตกร้าวจะขยายตัวลงมาที่คอนกรีตช่วงกลางกรณีศึกษาจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติด้วยการกะเทาะตัวออกของคอนกรีตบริเวณช่วงหัวเสา โดยที่แผ่น CFRP ยังสามารถติดเกาะกับตัวอย่างได้ดี แสดงในรูปที่ 13-16 ตามลำดับ

รูปที่ 13 การวิบัติของตัวอย่าง CA2

รูปที่ 14 การวิบัติของตัวอย่าง CA3

รูปที่ 15 การวิบัติของตัวอย่าง CB2

รูปที่ 16 การวิบัติของตัวอย่าง CB3

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ ศึกษาประสิทธิภาพของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP ในรูปแบบการเสริมกำลังที่แตกต่างกันภายใต้แรงกระทำแบบตรงศูนย์ จากผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ช่วยให้ประสิทธิภาพการรับกำลังอัดของตัวอย่างเสาดีขึ้นโดย ตัวอย่างเสาที่เสริมกำลัง 3 ชั้นตรงตำแหน่งเหล็กปลอกมีการรับแรงอัดสูงสุด โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น 23.2% เมื่อเทียบกับตัวอย่างเสาควบคุม

2. การเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของแผ่น CFRP กับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบเดียวกันนั้น สามารถทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงสุดได้เพิ่มขึ้นถึง 30.3%

3. การวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่เสริมกำลังพบว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากเกิดกะเทาะตัวของคอนกรีตระหว่างช่วงเสริมกำลัง โดยแผ่น CFRP ยังคงสภาพยึดติดกับเสาตัวอย่างปกติ

การเสริมกำลังในรูปแบบต่างๆ พร้อมทั้งการศึกษาจำนวนชั้นของการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP ในงานวิจัยนี้ ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของรูปแบบและการเลือกใช้จำนวนรอบหรือความหนาของวัสดุเสริมกำลังที่เหมาะสม ในงานซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้กับเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบริษัท รีโทรฟิท สตรัคเจอร์ สเปเชียลลิสต์ ที่อนุเคราะห์วัสดุและทำการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนให้แก่ตัวอย่างทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Abd-El-Rahman Megahid Ahmed, Omar A. Farghal and A. Kotp. (2017) Behavior of RC Rectangular columns Confined with CFRP sheet Under Axial Compression. *International Conference on Advances in Structural and Geotechincal Engineering* (ICASGE'17), Hurghada, Egypt, 27-30 March 2017.

[2] Mothomi Munyua, Siphila Mumenya and John Mwero. (2020) Effect of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthening on the Axial Capacity and Ductility of Non-slender Square Concrete Columns. *Architecture Engineering Conference* (aec2020), Nairobi, Kenya, 12-14 October 2020

[3] Mahfoud Touhari and Ratiba Mitiche-Kettab. (2016) Behavior of FRP Confined Concrete Cylinders: Experimental Invaestigation and Strength Model. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, pp.647-660.

[4] บริษัท ซิก้า(ประเทศไทย) จำกัด (2564). *ข้อมูลผลิตภัณฑ์ SikaWarp®-230C*. เวอร์ชั่น 02.01

[5] บริษัท ซิก้า(ประเทศไทย) จำกัด (2564). *ข้อมูลผลิตภัณฑ์ SikaWarp®-330*. เวอร์ชั่น 04.01

[6] ACI 318-95, *Building Code Reqirements for Stuctural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*. 1995

[7] ACI 440.2R-08, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*. 2008

[8] Worakarn Anuntasena, Akhrawat Lenwari and Thaksin Thepchatri (2020). Axial compression behavior of concrete-encased cellular steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 172.