

พฤติกรรมของเสาสั้นเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

Behavior of concrete-filled GFRP tube short columns under axial compression loading

กิตติพัฒน์ ปรัชญาจุฑา^{1,*} สายันต์ ศิริมนตรี² และ ชนะชัย ทองโฉม³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: kittipat.prat@dome.tu.ac.th

บทคัดย่อ

เสาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่มีความสำคัญในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง เมื่อเสาเกิดการวิบัติอาจส่งผลให้โครงสร้างทั้งหมดพังทลายได้ จึงทำให้ต้องมีการเสริมความแข็งแรง และความเหนียวของเสาเพื่อป้องกันการวิบัติของเสา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกน การเสริมแรงตามขวางแบบปลอกเดี่ยว และการเสริมแรงตามขวางแบบปลอกเกลียวของเหล็ก และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จึงได้ทำการทดสอบเสาจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยเสามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร สูง 700 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย การเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร การเสริมแรงตามขวางโดยมีระยะห่างของปลอก 2 ปริมาณ คือ 50, 150 มิลลิเมตร การเสริมแรงตามขวาง โดยเป็นปลอกแบบเดี่ยว และปลอกแบบเกลียว การเสริมแรงตามขวาง โดยเป็นปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ผลการทดสอบเสาตัวอย่าง พบว่าเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณ ร้อยละ 8 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร ประมาณ ร้อยละ 21 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ประมาณ ร้อยละ 7 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ประมาณ ร้อยละ 17 จะเห็นได้ว่าการเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ส่งผลให้เสามีความสามารถในการรับแรงอัดที่สูง และมีความเหนียวที่มาก จึงมีความเหมาะสมที่สุด และสมการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดของเสา จากงานวิจัยในอดีตของ Gao และคณะ [11] และใช้สมการการคำนวณการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (f'_{cc}) ของ Mander และคณะ [14] ที่มีการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับความเป็นจริง และมีความแม่นยำของแบบจำลองที่มาก ส่งผลให้มีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ออกแบบ

คำสำคัญ: พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, การเสริมแรงตามขวาง, ปลอกแบบเกลียว, ปลอกแบบเดี่ยว, ภายใต้แรงอัดตามแกน, แรงอัดสูงสุด, ความเหนียว ณ จุดวิบัติ

A column is an essential structural component that bears the load of a structure. If a column fails, it can lead to the collapse of the entire structure. Therefore, strengthening and enhancing the ductility of columns is necessary to prevent failure. This research examines the behavior of concrete-filled glass fiber-reinforced polymer (GFRP) tube-confined columns under axial compression. The study investigated transverse reinforcement using tie and spiral made of steel and GFRP. Eight column specimens were tested, each with a diameter of 250 mm and a height of 700 mm. The studied variables included the thickness of the GFRP tube 3 mm, the spacing of stirrups (50 and 150 mm), the type of stirrup (tie or spiral), and the stirrup material (steel or GFRP). The test results revealed that the GFRP tie column with 150 mm spacing had an 8% higher compressive strength than the steel tie column with the same spacing. Additionally, the ductility at the failure point of the GFRP tie column with 150 mm spacing was 21% higher than that of the steel tie column. The steel spiral column with 50 mm spacing exhibited 7 % higher compressive strength than the steel tie column with the same spacing. Furthermore, the ductility at the failure point of the steel spiral column with 50 mm spacing was 17 % higher than that of the steel tie column. It was observed that steel spiral reinforcement with a spacing of 50 millimeters resulted in the highest compressive strength and ductility, indicating its suitability as the most effective option. Furthermore, the equation for predicting the ultimate compressive strength of columns proposed by Gao et al. [11], as well as the equation for calculating the compressive strength of concrete confined by fiber-reinforced polymer tubes (f'_{cc}) developed by Mander et al. [14], produced predictions closely aligned with the experimental results. Both models exhibited high predictive accuracy, thereby supporting their applicability for design purposes and ensuring structural safety.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Polymer, Transverse reinforcement, Spiral, Tie, Under axial compression, Ultimate compressive strength, Ductility at the failure point

Abstract

1. บทนำ

เสาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่มีความสำคัญในการรับน้ำหนักของโครงสร้างซึ่งจะรับน้ำหนักในแนวดิ่ง เมื่อเสาเกิดการวิบัติอาจส่งผลให้โครงสร้างทั้งหมดพังทลายได้ จึงทำให้ต้องมีการเสริมความแข็งแรง และความเหนียวของเสาเพื่อป้องกันการวิบัติของเสา โดยเสาจะแบ่งได้ 2 ประเภทหลักๆ 1) เสาสั้น 2) เสายาว ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงอัดที่ต่างกัน จะสามารถแบ่งได้โดยเสาใช้อัตราส่วนความขรุขระของเสาหากมีความน้อยกว่า 22 จะถือว่าเป็นเสาสั้น และหากอัตราส่วนความขรุขระของเสา มากกว่า 22 จะถือว่าเป็นเสายาว [1] ลักษณะการวิบัติของเสาสั้น เมื่อเสารับแรงอัดสูงสุดจะเกิดการวิบัติ พบว่าคอนกรีต และวัสดุการเสริมแรงของเสาจะรับแรงอัดจนเกิดการวิบัติ โดยลักษณะการวิบัติของเสายาว เมื่อรับแรงอัดจะเกิดการโก่งคดของเสาจนถึงสภาวะประลัย ส่งผลให้การรับแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นมากกว่าเสายาว และการเสริมกำลังของเสาสั้นสามารถเพิ่มการรับแรงอัดของเสาได้มากกว่าเสายาว จึงได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับเสาสั้น ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน [2,3]

การเสริมแรงในเสาคอนกรีตมีการเสริมแรง 2 แบบ คือการเสริมแรงตามยาว และการเสริมแรงตามขวาง ทางด้านการเสริมแรงตามยาวจะทำหน้าที่ยึดเกาะกับปูน เมื่อเกิดการวิบัติของเสาจะทำให้วัสดุในการเสริมแรงตามยาวยังคงยึดเกาะคอนกรีต ทางด้านการเสริมแรงตามขวางเพื่อช่วยยึดการเสริมแรงตามยาวให้อยู่ตามตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อป้องกันการโก่งคดของการเสริมแรงตามยาว และช่วยทำให้เสาสามารถรับแรงได้มากขึ้น การเสริมแรงตามขวางจะมี 2 ประเภท โดย 1) การเสริมแรงตามขวางแบบปดเดี่ยว 2) การเสริมแรงตามขวางแบบปดเกลียว [4] โดยการเสริมแรงตามขวางแบบเกลียว มีความสามารถในการโอบรัดคอนกรีตที่มากกว่า ซึ่งช่วยในด้านการรับแรงได้ดีกว่า เนื่องจากการเสริมแรงตามขวางแบบปดเกลียวยังมีระยะห่างของปดที่น้อยกว่า จากระยะของปดที่เชื่อมต่อกัน [5,6]

การนำวัสดุมาใช้เสริมแรงในเสา รูปแบบของการเสริมแรงตามขวางหรือการโอบรัดด้านนอก ส่งผลให้เสาสามารถรับแรงได้มากขึ้น เนื่องจากการโอบรัดของเสาที่มากขึ้น ในงานก่อสร้างการเสริมแรงตามขวางจะใช้วัสดุในรูปแบบของเหล็ก เนื่องจากคุณสมบัติของเหล็ก ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี มีความทนทานที่ดี การยืดหยุ่นที่สูง และที่มีความสามารถในการขึ้นรูป แต่เปลี่ยนรูปยาก หากเสริมแรงตามขวางด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ที่มีคุณสมบัติ ต้านแรงดึงได้สูงกว่าเหล็ก ทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา และขึ้นรูปได้ง่ายกว่าเหล็ก [7,8] การนำวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมาเสริมด้านนอกทำให้เสามีการโอบรัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เสาสามารถรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากขึ้น และยังสามารถนำมาใช้ทดแทนไม้แบบในงานก่อสร้าง คุณสมบัติของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว มีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน และต้านแรงดึงได้สูง จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการโอบรัดเสาภายนอก [9,10]

การเสริมแรงตามขวางแบบปดเดี่ยว และการเสริมแรงตามขวางแบบปดเกลียวของเหล็ก และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ที่มีการโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจึงเป็นที่น่าสนใจ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาสั้นเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Gao และคณะ [11] ได้ทำการเสนอทฤษฎีสมการทำนายผลของเสาคอนกรีตเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว DSTC ภายใต้ความเค้นแรงอัดแกน (σ_c) และความเค้นแรงยึดตามแนวนอนรัศมี (σ_r) และผลกระทบการยึดของเหล็กปดต้องพิจารณาต่อแกนคอนกรีต

ของการเสริมแรง DSTCs แรงอัดตามแกนสำหรับเสาคอนกรีตไม่มีรู โดยมีคำนวณแรงอัดของแกนคอนกรีต และระยะคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็กมีความแตกต่างกันตามสูตร (2.1) และ (2.3) แกนกลางคอนกรีตมีการเสริมแรงอัดจากการโอบรัดของเหล็กปด ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และระยะคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็กมีการโอบรัดจากท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเพียงอย่างเดียว ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีการรับแรงอัดตามแนวแกน และแนวตั้งฉากกับแกนจากคอนกรีต จึงต้องพิจารณาแรงรับทั้ง 2 แกน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$f_{l,cover} = \frac{\sigma_{fip,t} t_{fip}}{R_o} \quad (2.1)$$

โดยที่ $\sigma_{fip,t}$ ความเค้นของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, R_o รัศมีวงนอกของคอนกรีต

แรงอัดตามขวาง f_{ls} เป็นสูตรการคำนวณแรงอัดของเหล็กปดที่ระยะคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็ก และ $f_{l,core}$ แรงอัดตามแนวขวางทั้งหมดสำหรับแกนคอนกรีต ดังสมการ (2.2) และ (2.3)

$$f_{ls} = \frac{2A_s f_{sy}}{D_{core} s} \quad (2.2)$$

$$f_{l,core} = f_{l,cover} + f_{ls} \left(\frac{A_{core}}{A_o} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปด, f_{sy} คือแรงดึงที่จุดครากของเหล็กปด, D_{core} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีต, s คือระยะห่างของเหล็กปด, A_{core} คือพื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต และ A_o พื้นที่ของเสาดูอย่างตามลำดับ

Jiang และคณะ [12] ได้เสนอสูตรการคำนวณความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และเหล็กปด ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + 17.5 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{1.2} \quad (2.4)$$

โดยที่ ϵ_{cc} คือความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด และ ϵ_{co} คือความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

จากงานวิจัยในอดีตสามารถคำนวณผลการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (f'_{cc}) มีทั้งหมด 6 สมการ ดังสมการที่ (2.5) สมการที่ (2.6) สมการที่ (2.7) สมการที่ (2.8) สมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ดังต่อไปนี้

Teng และคณะ [13]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (2.5)$$

Mander และคณะ [14]

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + 7.94 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)} - 2 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \right) \quad (2.6)$$

Harries และ Kharel [15]

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4,269 f_l^{0.587} \quad (2.7)$$

Marques และคณะ [16]

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (2.8)$$

โดยที่

$$k_1 = 6.7 f_l^{-0.17}$$

Binici และคณะ [17]

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(\sqrt{1 + 9.9 \frac{f_l}{f'_{co}}} + \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (2.9)$$

Xiao และคณะ [18]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.24 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.8} \quad (2.10)$$

Popovics และคณะ [19] ได้เสนอสมการคำนวณความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ภายใต้แรงอัดตามแนวขวาง ดังสมการ (2.11) และ (2.12)

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right) r}{r - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right) r} \quad (2.11)$$

$$r = \frac{E_{co}}{E_{co} - \left(\frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \right)} \quad (2.12)$$

การรวมแรงอัดตามแกนทั้งหมดของเสาคอนกรีตเสริมแรงตามยาวด้วยแท่งเหล็ก เสริมแรงตามขวางด้วยเหล็กปลอก แกนคอนกรีต และมีการเสริมแรงภายนอกของเสาด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ทำให้ได้สมการการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดของเสา ดังสมการ (2.13)

$$N = \sigma_{c,core} A_{core} + \sigma_{c,cover} A_{cover} + \sigma_{frp} A_{frp} + n \sigma_{yr} A_r \quad (2.13)$$

โดยที่ $\sigma_{c,core}$ และ $\sigma_{c,cover}$ คือความเครียดของแกนคอนกรีต และความเครียดตามแนวแกนของระยะคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็ก n คือจำนวนเหล็กเสริมตามยาว σ_{yr} คือตามแนวแกนตามแนวแกนของเหล็กเสริมตามยาว A_{frp} และ A_r คือพื้นที่หน้าตัดของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาว σ_{frp} คือความเครียดตามแนวแกนของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

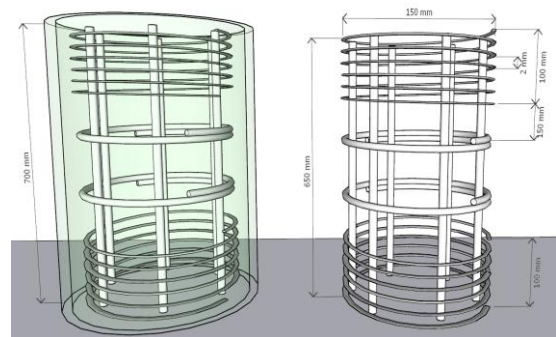
3. ขั้นตอนการศึกษา

3.1 วัสดุ

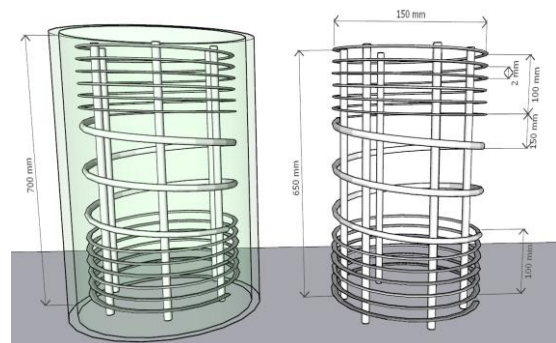
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยคอนกรีต แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบบล็อกเกลียว และแบบบล็อกเดี่ยว เหล็กปลอกแบบเกลียว และเหล็กปลอกแบบเดี่ยว ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP tube) คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ถูกอธิบายในรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2 เสาตัวอย่างทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบเสาเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกน เสาตัวอย่างทดสอบทั้งหมด มีความสูง 700 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 220 มิลลิเมตร โดยมีระยะหุ้มคอนกรีต 35 มิลลิเมตร แต่ละเสามีการเสริมแรงตามยาวด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 6 แท่ง เสาตัวอย่างมีการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และปลอกเหล็กโดยปลอกทั้ง 2 ชนิด จะเสริมทั้งแบบบล็อกเดี่ยว และแบบบล็อกเกลียวดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ รายละเอียดของเสาตัวอย่างได้แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 เสาตัวอย่างที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกแบบเดี่ยว



รูปที่ 2 เสาตัวอย่างที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกแบบเกลียว

ตารางที่ 1 รายละเอียดเสาตัวอย่างทดสอบ

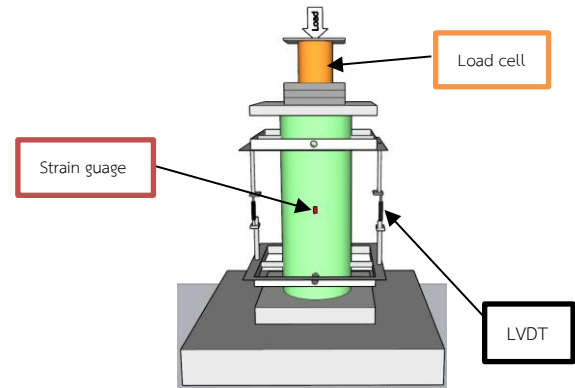
ตัวอย่างเสาทดสอบ	ความหนาของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (มิลลิเมตร)	ประเภทของการเสริมแรงตามขวาง	ขนาดหน้าตัดของการเสริมแรงตามขวาง (มิลลิเมตร)	วัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงตามขวาง	ระยะเรียงของการเสริมแรงตามขวาง (มิลลิเมตร)
O3	3	-	-	-	-
O3-T6F50	3	ปลอกเดี่ยว	6	พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว	50

O3-T6S50	3	ปลอกเดี่ยว	6	เหล็ก	50
O3-S6S50	3	ปลอกเกลียว	6	เหล็ก	50
O3-T6F150	3	ปลอกเดี่ยว	6	พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว	150
O3-T6S150	3	ปลอกเดี่ยว	6	เหล็ก	150
O3-S6F150	3	ปลอกเกลียว	6	พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว	150
O3-S6S150	3	ปลอกเกลียว	6	เหล็ก	150

หมายเหตุ : O3-S6F50 ไม่ได้ทำการทดสอบ ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบการเสริมกำลังระหว่าง ปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกับปลอกเหล็ก ในลักษณะแบบเกลียว ที่ระยะห่างปลอก 50 มิลลิเมตร เนื่องจากการเปรียบเทียบการเสริมกำลังของปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกับปลอกเหล็ก ในลักษณะปลอกแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างปลอก 50 มิลลิเมตร และมีการเปรียบเทียบการเสริมกำลังของปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกับปลอกเหล็ก ในลักษณะปลอกแบบเกลียว ที่ระยะห่างปลอก 150 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณีมีผลที่ไปในทางเดียวกัน จึงไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบ เสาดตัวอย่าง O3-S6F50 เพียงแต่การเสริมกำลังแบบปลอกเกลียว เพียงช่วยให้มีการโอบรัดของเสาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เสามีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น และมีความเหนียวของเสาที่เพิ่มขึ้น แต่ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับการเสริมกำลังแบบปลอกเดี่ยว

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเสาดตัวอย่างทดสอบ ติดตั้งแผ่นเหล็กด้านล่างเสาดตัวอย่างเพื่อให้เสาดตัวอย่างรับแรงอัดตามแกนแบบแพร่ ตั้งเสาดตัวอย่างให้ตรงกับหัวเครื่องกดไฮดรอลิก และได้ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 305,914 กิโลกรัม เพื่ออ่านค่ากำลังในการรับแรงอัดตามแนวแกนทรานส์ดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer (LVDT)) เพื่อทำการอ่านระยะการหดตัวอย่างเสาดตัวอย่างทดสอบโดยติดตั้งจำนวน 3 ตัว ติดตั้งบริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบ 1 ตัว และบริเวณกลางเสา 2 ตัว ติดตั้งสเตรนเกจ (Strain Gauge) ใช้ในการตรวจวัดความเครียดของวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลังของเสา โดยติดตั้ง จำนวน 7 ตัว ตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจ ได้แก่ บริเวณตรงกลางเสาที่หุ้มด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว 3 ตัว บริเวณตรงกลางของการเสริมแรงตามขวาง 2 ตัว และบริเวณตรงกลางของการเสริมแรงตามยาว 2 ตัว ดังรูปที่ 3 เมื่อทำการทดสอบจะถูกทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกนโดยการควบคุมการหดตัวของเสาดตัวอย่างทดสอบ โดยจะวัดทุกๆ 0.3 มิลลิเมตรต่อวินาที และใช้เครื่องอ่านสัญญาณ (Data Logger) เก็บข้อมูลของแรงอัดตามแนวแกน การหดตัวของเสาดตัวอย่างทดสอบ การวัดความเครียดของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว การวัดความเครียดของการเสริมแรงตามยาว และการเสริมแรงตามขวาง โดยแต่ละเสาดตัวอย่างทดสอบจะรับแรงอัดอย่างต่อเนื่องจนเสาดตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ และทำการสังเกตพฤติกรรมของการวิบัติของเสาดตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

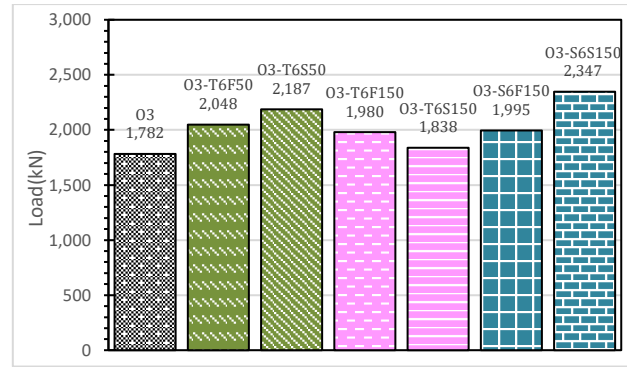
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลจากการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

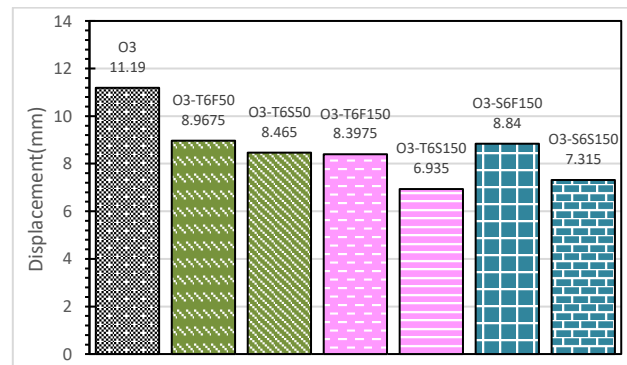
การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่มีการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และเหล็ก ทั้งแบบปลอกเดี่ยว และแบบปลอกเกลียว โดยมีระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยว 50 และ 150 มิลลิเมตร พบว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 7 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 8 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเกลียว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 17 เสาจะสังเกตได้ว่าเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างปลอก 150 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว แต่เมื่อพิจารณาเสาเสริมปลอกเหล็ก ที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่มากกว่า เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ที่ระยะห่างปลอก 50 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่างปลอก 150 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่า เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเกลียว ที่ระยะห่างปลอก 150 มิลลิเมตร เนื่องจากลักษณะในการเสริมปลอกแบบต่างๆ มีผลต่อการรับแรงอัดสูงสุดของเสา โดยระยะห่างของปลอกที่ 150 มิลลิเมตร เป็นระยะห่างของปลอกที่มากเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว โดยปลอกจะเกิดการยืดออก จนเกิดการวิบัติ จึงสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกเหล็ก และหากเสริมแบบระยะห่างของเหล็กปลอก 50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างที่น้อยหรือการเสริมปลอกแบบเกลียวเสาเสริมปลอกเหล็ก สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว เนื่องจากการเสริมปลอกเกลียว หรือการเสริมปลอกที่ระยะห่างปลอกน้อย จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการโอบรัดของเสาที่มากกว่าการเสริมปลอกแบบเดี่ยว และเมื่อเกิดการวิบัติของเสา แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และคอนกรีตจะเกิดการวิบัติ ก่อนที่ปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ที่ระยะห่างปลอก 50 มิลลิเมตร ปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิดการยืดออกจนวิบัติเพียงบางเส้น และการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แบบเกลียวที่ระยะห่างปลอก 150 มิลลิเมตร ปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว เกิดการยืดออกแต่ยังไม่เกิดการวิบัติของปลอก ทำให้ผลจากการโอบรัดของปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด

สูงสุดของเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วน้อยกว่าเสาเสริมปลอกเหล็ก ซึ่งพิจารณาได้จากกำลังรับแรงดึงของวัสดุของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่มากกว่ากำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก แต่รูปลักษณะการวิบัติของเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าเสาเกิดการหักออกบริเวณกลางเสา เนื่องจากเกิดจากการชนย้าย ทำให้ปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิดการขาดออก เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความสามารถรับแรงอัดสูงสุดมากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 15, ร้อยละ 11 และร้อยละ 12 ตามลำดับ เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความสามารถรับแรงอัดสูงสุดมากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 22, ร้อยละ 3 และร้อยละ 32 ตามลำดับ และการเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดของเสา ซึ่งทำให้เสาสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากขึ้นโดยการเสริมกำลังด้านนอกของเสา นอกเหนือจากการเสริมกำลังในลักษณะของปลอก ซึ่งเป็นการเสริมกำลังด้านในของเสา และยังสามารถใช้แทนแบบหล่อของเสาได้ โดยการกรอกคอนกรีตลงไปด้านในของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 9

การเปรียบเทียบความเหนียวของเสาที่เสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และเหล็ก ทั้งแบบปลอกเดี่ยว และแบบปลอกเกลียว โดยมีระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยว 50 และ 150 มิลลิเมตร พบว่าเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 6 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 21 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเกลียว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 21 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 24, ร้อยละ 33 และร้อยละ 26 ตามลำดับ เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 32, ร้อยละ 61 และร้อยละ 53 ตามลำดับ และการเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดของเสา ซึ่งทำให้เสามีความเหนียวที่มากขึ้น โดยการเสริมกำลังด้านนอกของเสา นอกเหนือจากการเสริมกำลังในลักษณะของปลอก ซึ่งเป็นการเสริมกำลังด้านในของเสา และยังสามารถใช้แทนแบบหล่อของเสาได้ โดยการกรอกคอนกรีตลงไปด้านในของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดสูงสุดในหน่วยกิโลนิวตัน ของเสาเสริมที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยชนิดของวัสดุที่แตกต่างกัน



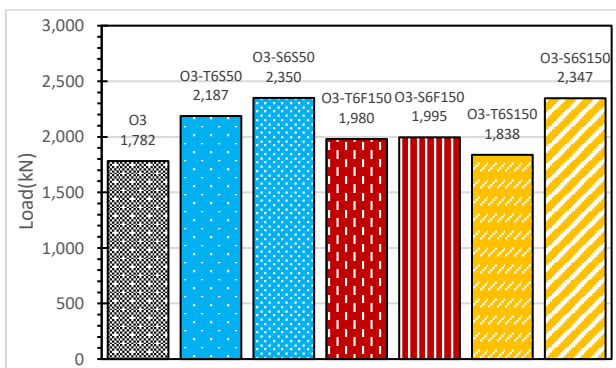
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบความเหนียวในหน่วยมิลลิเมตร ของเสาที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยชนิดของวัสดุที่แตกต่างกัน

4.2 ผลจากการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกแบบเดี่ยว และปลอกแบบเกลียว

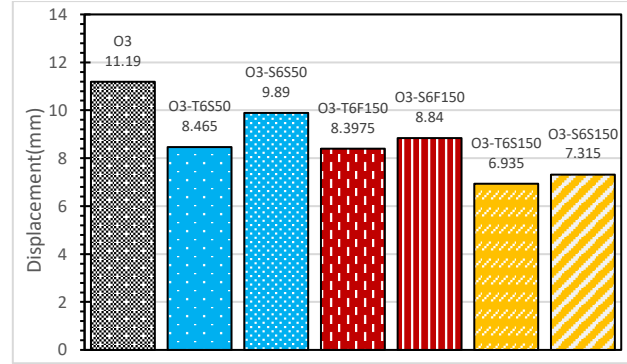
การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วทั้งแบบปลอกเกลียว และแบบปลอกเดี่ยว พบว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 7 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเกลียว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 1 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่มีระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 28 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 23, ร้อยละ 11 และร้อยละ 3 ตามลำดับ เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 32, ร้อยละ 12 และร้อยละ 32 ตามลำดับ และการเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดของเสา ซึ่งทำให้เสาสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากขึ้นโดยการเสริมกำลังด้านนอกของเสา นอกเหนือจากการเสริมกำลัง

ในลักษณะของปลอก ซึ่งเป็นการเสริมกำลังด้านในของเสา และยังสามารถใช้แทนแบบหล่อของเสาได้ โดยการกรอกคอนกรีตลงไปด้านในของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 11

การเปรียบเทียบความเหนียวของเสาที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วทั้งแบบปลอกเกลียว และแบบปลอกเดี่ยว พบว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 16 เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 5 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 5 เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมเหล็กแบบปลอกเดี่ยว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 32, ร้อยละ 33 และร้อยละ 61 ตามลำดับ เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร เสาการเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร และเสาเสริมเหล็กแบบปลอกเกลียว ที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความเหนียว ณ จุดวิบัติ มากกว่า เสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน ประมาณร้อยละ 13, ร้อยละ 27 และร้อยละ 53 ตามลำดับ และการเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดของเสา ซึ่งทำให้เสามีความเหนียวที่มากขึ้น โดยการเสริมกำลังด้านนอกของเสานอกจากการเสริมกำลังในลักษณะของปลอก ซึ่งเป็นการเสริมกำลังด้านในของเสา และยังสามารถใช้แทนแบบหล่อของเสาได้ โดยการกรอกคอนกรีตลงไปด้านในของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดสูงสุดในหน่วยกิโลนิวตัน ของเสาที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยรูปแบบของปลอกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบความเหนียวในหน่วยมิลลิเมตร ของเสาที่มีการเสริมแรงตามขวางด้วยรูปแบบของปลอกที่แตกต่างกัน

4.3 ลักษณะการวิบัติ

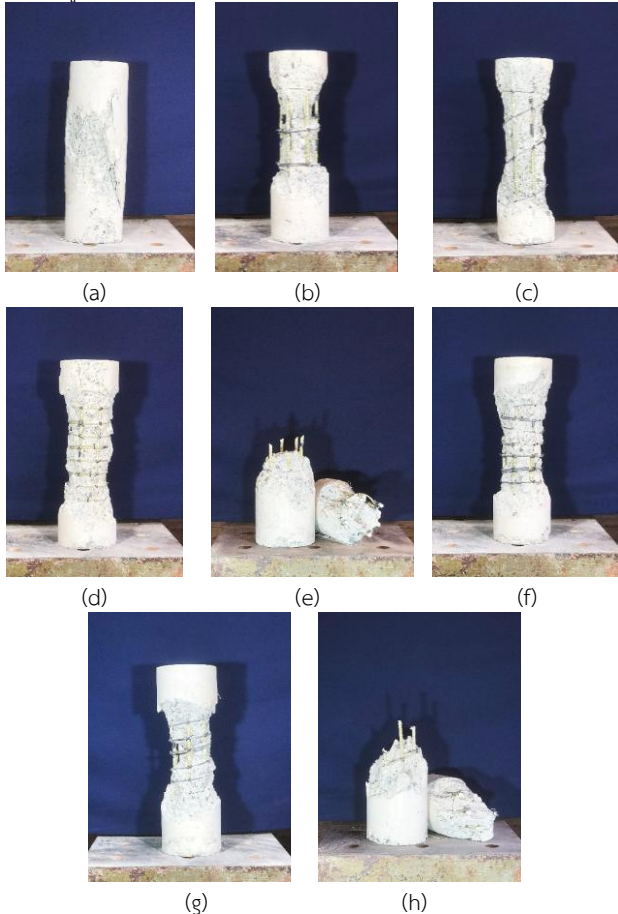
เสาเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วโดยมีความหนา 3 มิลลิเมตร เสามีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิดการวิบัติ โดยมีลักษณะการวิบัติของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจะมีสีของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่เข้มขึ้น และเกิดเสียงจากการแตกร้าวภายในท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว เกิดการแตกร้าวบริเวณด้านบนของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจนถึงด้านล่างของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ตามแนวนอน เนื่องจากท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีการรับแรงอัดตามแนวนอน และเสาที่เสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วความหนา 3 มิลลิเมตร มีการแตกร้าวในแนวตั้งฉากกับ แนวจากคอนกรีต รับแรงอัดจนเกิดการแตกร้าว และการเสริมแรงตามขวาง เกิดการยืดออก ทำให้ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว รับแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับแนวนอน จนเกิดการแตกร้าวเป็นเส้นในแนวตั้งฉากกับแนวนอน ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ลักษณะการวิบัติของท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

ลักษณะการวิบัติของเสาภายในท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว พบว่าคอนกรีตเกิดการแตกร้าว และหลุดตัวจนเกิดการวิบัติ ทำให้การเสริมแรงตามยาวด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วถูกแรงอัดเป็นลำดับถัดมา และเมื่อท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วถูกแรงอัดกระทำ ทำให้ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิดการโก่งเดาะเพียงเล็กน้อยจนเกิดการวิบัติในลักษณะของการขาด และในขณะที่ท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิดการโก่งเดาะ ทำให้การเสริมแรงตามขวางด้วยปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วถูกแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแรงอัดตามแนวนอน ซึ่งเป็นแรงดันออก ทำให้ปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเกิดการยืดออก เมื่อพิจารณาประเภทของปลอก โดยจะมีปลอกแบบเดี่ยว และปลอกแบบเกลียว ที่ระยะห่างของปลอก 150 มิลลิเมตร พบว่ามีลักษณะการยืดออกของปลอกแบบเดี่ยวจะเกิดการขาด หรือเกิดการเสียรูปของทุกปลอก และท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจะเกิดการขาดทุกเส้น แต่เมื่อพิจารณา

ประเภทของปลอก โดยจะมีปลอกแบบเดี่ยว และปลอกแบบเกลียว ที่ระยะห่างของปลอก 50 มิลลิเมตร พบว่ามีลักษณะการยึดออกของปลอกแบบเดี่ยว และปลอกแบบเกลียวจะเกิดการขาด หรือเกิดการเสียรูปของเพียงบางปลอก และแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจะเกิดการขาดเพียงบางเส้น ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ลักษณะการวิบัติของเสาภายในท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

4.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบกับแบบจำลองสมการทำนายผลจากงานวิจัยในอดีต

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่ได้จากการทดสอบกับแบบจำลองสมการทำนายผลจากงานวิจัยในอดีต โดยได้ทำการคำนวณความสามารถในการรับแรงอัดตามแกนสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมแรงตามยาวด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเสริมแรงตามขวางด้วยเหล็กแบบปลอกเกลียว และมีการเสริมแรงภายนอกของเสาด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นแบบจำลองของ Gao และคณะ (2023) ในสมการที่ (2.12) และได้มีการคำนวณผลการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (f'_{cc}) มีทั้งหมด 6 สมการ ดังสมการที่ (2.5) สมการที่ (2.6) สมการที่ (2.7) สมการที่ (2.8) สมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ตามตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดเทียบกับแบบจำลองของ Gao และคณะ [11]

ตัวอย่างเสาทดสอบ	P_{exp} (กิโลนิวตัน)	Teng และคณะ P_{pred} / P_{exp}	Mander และคณะ P_{pred} / P_{exp}	Harries และ Kharel P_{pred} / P_{exp}	Marques และคณะ P_{pred} / P_{exp}	Binici และคณะ P_{pred} / P_{exp}	Xiao และคณะ P_{pred} / P_{exp}
O3	1781	0.64	0.73	0.83	0.84	0.71	0.71
O3-T6F50	2048	0.95	1.03	1.02	1.13	1.01	1.01
O3-T6S50	2186	0.75	0.81	0.95	0.89	0.79	0.79
O3-S6S50	2186	0.87	0.94	0.95	1.04	0.93	0.93
O3-T6F150	1980	0.89	0.96	1.04	1.06	0.94	0.94
O3-T6S150	1838	0.81	0.87	1.12	0.96	0.86	0.86
O3-S6F150	1995	0.75	0.81	0.88	0.90	0.80	0.80
O3-S6S150	2346	0.75	0.81	0.88	0.89	0.79	0.79
Avg.		0.80	0.87	0.95	0.96	0.85	0.86
V.		0.0086	0.0088	0.0091	0.0093	0.0087	0.0087
SD.		0.0929	0.0939	0.0955	0.0968	0.0936	0.0935

จากสมการการทำนายผลของ Gao และคณะ (2023) พบว่ามีผลจากการคำนวณที่ใกล้เคียงความจริง และได้มีการคำนวณการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (f'_{cc}) ทั้งหมด 6 แบบจำลอง โดยเมื่อแทนค่าจากทั้ง 6 แบบจำลองพบว่า มีผลการรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากสมการทำนายผลต่อการรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_{pred} / P_{exp}) มีค่าที่ใกล้เคียงกับการรับแรงอัดจากการทดสอบ และใกล้เคียงกันทั้ง 6 แบบจำลอง แต่เมื่อเทียบแบบจำลอง ทั้ง 6 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลองของ Marques และคณะ [16] และ Harries และ Kharel [15] มีค่าเฉลี่ยที่มากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่มีค่าความแปรปรวน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มาก แสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองและความแม่นยำของแบบจำลองที่น้อย เนื่องจากมีการกระจายตัวของข้อมูลการรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากสมการทำนายผลต่อการรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_{pred} / P_{exp}) ที่มาก แบบจำลองของ Mander และคณะ [14] มีค่าเฉลี่ยที่ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่มากที่สุด แต่มีค่าความแปรปรวน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อย แสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง และความแม่นยำของแบบจำลองที่มาก เนื่องจากมีการกระจายตัวของข้อมูลการรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากสมการทำนายผลต่อการรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ (P_{pred} / P_{exp}) ที่น้อย จากการเปรียบเทียบระหว่างการรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากสมการทำนายผลกับการรับแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายผลการทดสอบให้มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบจริง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้สมการดังกล่าว เป็นสมการออกแบบ

5. สรุปผลการศึกษา

1) การเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการโอบรัดของเสา ส่งผลให้เสามีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด และมีความเหนียวของเสาที่เพิ่มขึ้น

2) เสาเสริมแรงภายในมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด และมีความเหนียวที่มากกว่าเสาที่ไม่มีการเสริมแรงภายใน

3) เสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยวที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด และมีความเหนียวที่มากกว่าเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยวที่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร และเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเกลียวที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด และมีความเหนียวที่มากกว่าเสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเกลียวที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร

4) เสาเสริมปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วแบบปลอกเดี่ยวที่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด และมีความเหนียวที่มากกว่าเสาเสริมปลอกเหล็กแบบปลอกเดี่ยว

5) เสาเสริมปลอกแบบเกลียวทั้งปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด และมีความเหนียวที่มากกว่าเสาเสริมปลอกแบบเดี่ยวทั้งปลอกเหล็ก และปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

6) สมการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากงานวิจัยในอดีตของ Gao และคณะ [11] พบว่ามีผลจากการคำนวณที่ใกล้เคียงความจริง และใช้สมการการคำนวณการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (f'_{cc}) ของ Mander และคณะ [14] ที่มีการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับความเป็นจริง และมีความแม่นยำของแบบจำลองที่มาก ส่งผลให้มีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ออกแบบ

ข้อเสนอแนะและการนำไปใช้

การเสริมท่อพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเป็นการเสริมกำลังที่ส่งผลให้เสามีความสามารถรับแรงอัด และความเหนียวที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้ และการเสริมกำลังด้วยปลอกพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ทำให้เสามีความเหนียวที่เพิ่มขึ้น แต่ด้านการรับแรงอัดของเสาต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท จีเอฟอาร์ที คิงส์ จำกัดโดยได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete: commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2019, pp. 68-69.
- [2] Bazant, Z. P., & Kwon, Y. (1994). Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: Tests of size effect. *Materials and Structures*, 27, 79-90.
- [3] Abdelazim, W., Mohamed, H. M., Afifi, M. Z., & Benmokrane, B. (2020). Proposed slenderness limit for glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete columns based on experiments and buckling analysis. *ACI Structural Journal*, 117(1), 241-254.

- [4] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, pp. 96-97.
- [5] Zhang, P., Lv, X., Zhang, H., Liu, Y., Chen, B., Gao, D., & Sheikh, S. A. (2022). Experimental investigations of GFRP-reinforced columns with composite spiral stirrups under concentric compression. *Journal of Building Engineering*, 46, 103768.
- [6] Ding, Y., Zhou, Z., Tian, H., & Peng, Z. (2022, December). Compressive behavior of concrete-filled ultra-high performance concrete tube with FRP stirrups. In *Structures* (Vol. 46, pp. 611-624). Elsevier.
- [7] ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, pp. 9-10.
- [8] ACI 440R-96. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, pp. 20-21.
- [9] Wang, T., Yang, W., & Yin, C. (2023). Experimental studies on the axial compression behavior of hollow sandwich concrete GFRP-steel tube composite short columns. *Construction and Building Materials*, 378, 131160.
- [10] Wang, Z., Xie, J., Jiang, X. F., & Yan, J. B. (2021). Behaviours of reinforced concrete-filled GFRP tube stub columns under low-temperature axial compression. *Construction and Building Materials*, 312, 125429.
- [11] Gao, H., Wang, L., Chen, B., & Yan, M. (2023). Axial compressive behavior of GFRP tube-reinforced concrete-steel double skin tubular columns. *Journal of Building Engineering*, 75, 106973.
- [12] Jiang, T., & Teng, J. G. (2007). Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete. *Engineering Structures*, 29(11), 2968-2986.
- [13] Teng, J. G., Huang, Y. L., Lam, L., & Ye, L. P. (2007). Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete. *Journal of composites for construction*, 11(2), 201-210.
- [14] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [15] Harries, K. A., & Kharel, G. (2002). Behavior and modeling of concrete subject to variable confining pressure. *Materials Journal*, 99(2), 180-189.
- [16] Marques, S. P. C., Marques, D. C. D. S. C., Lins da Silva, J., & Cavalcante, M. A. A. (2004). Model for analysis of short columns of concrete confined by fiber-reinforced polymer. *Journal of Composites for Construction*, 8(4), 332-340.
- [17] Binici, B. (2005). An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete. *Engineering structures*, 27(7), 1040-1051.

- [18] Xiao, Q. G., Teng, J. G., & Yu, T. (2010). Behavior and modeling of confined high-strength concrete. *Journal of Composites for Construction*, 14(3), 249-259.
- [19] Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and concrete research*, 3(5), 583-599.