

การเพิ่มสมรรถนะด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสำหรับเสาไฟฟ้าคอนกรีต
เพื่อการต้านแรงกระทำแบบวัฏจักร

Strength and Resilience Enhancement of Concrete Electric Pole for Cyclic Load Resistance

รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา¹, ทรงศักดิ์ สุทธาสุประดิษฐ์², ฐาปนี ศุภกิจวัฒนา³, ธิติวุฒิ เพชรรัตน์⁴, ปรัชญา ยอดดำรงศรี⁵, กิตติภูมิ รอดสิน⁶

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง rattapoohm.pa@kmitl.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง songsak.su@kmitl.ac.th

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง milasinee@gmail.com

⁴ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง thitiwutp61@gmail.com

⁵ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
p.yoddumro@gmail.com

⁶ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ kittipoom.kmutnb@gmail.com

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอย่างรุนแรงส่งผลให้แรงลมจากพายุและลมกรรโชกทวีความรุนแรงมากขึ้น ทำให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความเปราะบางต่อการวิบัติมากขึ้น โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมรรถนะของเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้ในงานในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพด้านความแข็งแรงสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้มีแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะให้กับหน้าตัดประกอบด้วยการปรับความเหมาะสมของลวดอัดแรงในหน้าตัด การโอบรัดด้วยเหล็กปลอก และการเพิ่มเหล็กเสริมยืนร่วมกับลวดอัดแรง โดยทำการพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ทดสอบแรงแบบวัฏจักรขึ้นเพื่อใช้ทำการทดสอบเสาไฟฟ้าเทียบเท่าขนาดใช้งานจริง จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาดตามแบบมาตรฐานสำหรับเสาไฟฟ้าคอนกรีตขนาด 12.20 เมตร จำนวน 4 รูปแบบ ประกอบด้วย รูปแบบที่ 1 เสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐาน รูปแบบที่ 2 เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยการเพิ่มเหล็กปลอกในหน้าตัด รูปแบบที่ 3 เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอก และ รูปแบบที่ 4 เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอกและเพิ่มเหล็กเสริมยืน จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดโดยเฉลี่ยของเสาไฟฟ้าคอนกรีตรูปแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 16.7 ตัน-เมตร ค่าระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง เท่ากับ 5.56% ค่าความเหนียวเท่ากับ

4.9 ในขณะที่เสาที่ทำการปรับปรุงในรูปแบบที่ 4 พบว่ามีสมรรถนะดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลจากทดสอบกับแบบมาตรฐาน (รูปแบบที่ 1) โดยมีค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 19.7 ตัน-เมตร ค่าระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง เท่ากับ 6.99% และค่าความเหนียวเท่ากับ 6.5 ซึ่งสามารถรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นถึง 17.96% และมีความยืดหยุ่นหรือค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น 32.65% เมื่อเทียบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐาน แนวคิดการเสริมเหล็กและจัดรูปแบบลวดอัดแรงในรูปแบบที่ 4 น่าจะมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงให้สามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งทางด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

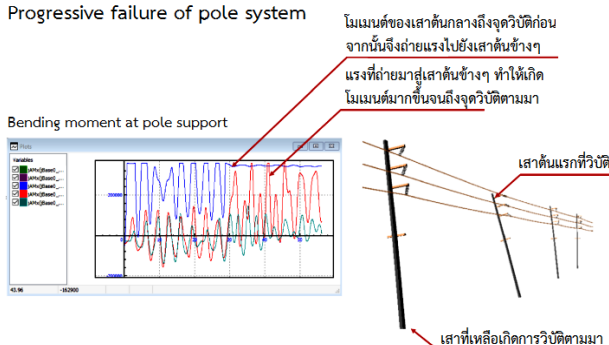
คำสำคัญ: เสาไฟฟ้าคอนกรีต แรงกระทำแบบวัฏจักร กำลังรับโมเมนต์ดัดของเสา ความยืดหยุ่นของเสา

1. บทนำ

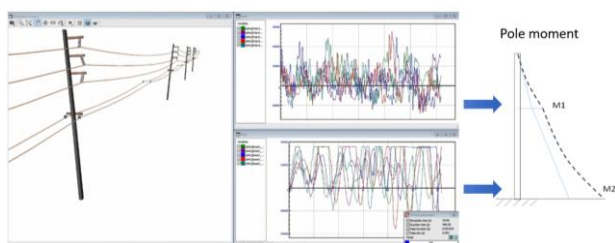
จากปัญหาการวิบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีสาเหตุมาจากแรงลมจากพายุและลมกรรโชก การศึกษาประเมินหาสาเหตุการวิบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตและการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงของเสาไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นเพื่อศึกษาพฤติกรรมและปรับปรุงเสาไฟฟ้าคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ซึ่งมาตรฐานการออกแบบเสาไฟฟ้า

คอนกรีตของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน การคำนึงถึงแรงต่าง ๆ ที่จะกระทำต่อเสาไฟฟ้าในสภาวะขีดสุดต่าง ๆ เช่น แรงแลมและแรงดึงที่เพิ่มขึ้นจากสายเคเบิล สมมติฐานเหล่านี้ของการออกแบบยังคงตั้งอยู่บนสภาวะสถิตย์ (Quasi Static Simplification) ซึ่งในสภาพความเป็นจริง ด้วยพฤติกรรมที่ซับซ้อนทางพลศาสตร์ (Dynamic Behavior) ของเสาไฟฟ้าและสายเคเบิลอาจทำให้เกิดแรงที่มากกว่าค่าที่ได้ออกแบบไว้และอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อเสาไฟฟ้าคอนกรีตได้ การหาสาเหตุที่แท้จริงจากการวิบัติโดยศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลวัตที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแบบวัฏจักรที่มากระทำต่อเสาและทำการคำนวณหาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ออกแบบหน้าตัดเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงต่อไป โดยรูปที่ 1 -2 แสดงผลของการวิเคราะห์แบบพลวัตโดยแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงผลของแรงกระทำแบบวัฏจักรทำให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตต้นที่มีสภาวะถึงขีดจำกัดการรับน้ำหนักวิบัติก่อนที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงดัดสูงกว่าขีดจำกัดที่เสาไฟฟ้าคอนกรีตสามารถรับได้และพังล้มแบบต่อเนื่อง (Progressive Collapse)

Progressive failure of pole system



รูปที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลวัตแบบไม่เชิงเส้นที่ทำให้เกิดการล้มแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าคอนกรีต [1]



รูปที่ 2 ตัวอย่างการตอบสนองเชิงพลวัตของเสาต่อแรงลมทำให้เกิดแรงแบบวัฏจักรบนโครงสร้างเสาไฟฟ้า [1]

เมื่อนำผลจากแบบจำลองร่วมกับผลการวิเคราะห์สาเหตุการเสียหายของเสาไฟฟ้าจากการสำรวจลักษณะทางกายภาพของเสาไฟฟ้าทั่วประเทศกระจายไปตามจังหวัดต่าง ๆ รวม

5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดพิษณุโลก จังหวัดพิจิตร จังหวัดเชียงราย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และจังหวัดนครราชสีมา รวมไปถึงการลงพื้นที่สำรวจความเสียหายของเสาไฟฟ้าคอนกรีต ณ อำเภอปากพอง จังหวัดนครศรีธรรมราช ภายหลังจากประสบภัยพิบัติจากพายุพายุก จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดมาสังเคราะห์หาสาเหตุและจุดเปราะบางของเสาไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะความเสียหายของเสาไฟฟ้าที่เกิดการวิบัติมักเกิดจากแรงกระทำซ้ำหรือแรงแบบวัฏจักรร่วมกับแรงแลมกรรโชกที่มาจากพายุที่ทวีความรุนแรงขึ้นจากภาวะโลกร้อนและลักษณะทางกายภาพของเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่อาจมีจุดอ่อนแอ ดังแสดงในรูปที่ 3 ภาระแรงกระทำจากหน่วยแรงอื่น ๆ ที่ไม่ได้ออกแบบไว้ทำให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความเสี่ยงต่อการวิบัติเนื่องจากกระทำซ้ำที่เกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้อายุการใช้งานของเสาไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ที่ระยะเวลา 25 ปี [1-4]



รูปที่ 3 แสดงลักษณะความเสียหายเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ [1]

ดังนั้นการออกแบบเสาไฟฟ้าให้มีความแข็งแรงขึ้นทั้งด้านกำลังวัสดุและความสามารถในการรับน้ำหนักโดยที่ยังคงน้ำหนักและขนาดไว้ให้ใกล้เคียงตามเดิม และปรับปรุงเสริมกำลังเสาเดิมให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาได้อย่างเร่งด่วนและมีประสิทธิภาพ ลดความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

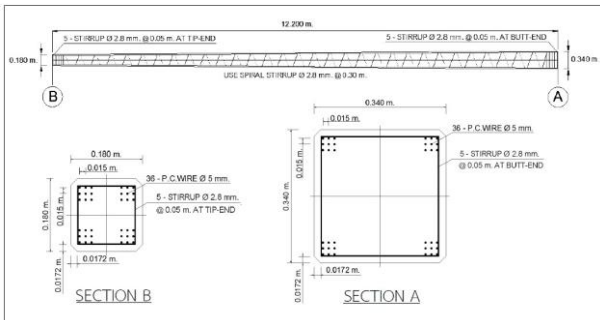
งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการเพิ่มสมรรถนะให้กับหน้าตัดประกอบด้วยการปรับความเหมาะสมของลวดอัดแรงในหน้าตัด การโอบรัดด้วยเหล็กปลอก และการเพิ่มเหล็กเสริมยืนร่วมกับลวดอัดแรง เพื่อเพิ่มความทนทานและความเหนียวให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีต [5] ซึ่งจะทำให้การทดสอบหน่วยแรงต่าง ๆ หลังการปรับปรุง โดยทำการพัฒนาเครื่องมือเพื่อทดสอบแรงแบบวัฏจักรขึ้นมาและทำการทดสอบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีต ขนาด 12.20 เมตร และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตก่อนการปรับปรุง เพื่อให้ได้แนวทางที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อไป

2. เสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงขนาด 12.20 เมตร

เสาไฟฟ้าคอนกรีตขนาด 12.20 เมตร เป็นเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ถูกออกแบบเพื่อให้รับค่าโมเมนต์ดัดได้สูงขึ้นจากเสาเดิมที่ขนาด 12.00 เมตร และมีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่กว่า เป็นเสาที่มีความสูง 12.20 เมตร ระยะปักลงดิน 2.20 เมตร กำหนดค่าแรงอัดประลัยของคอนกรีตประมาณ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหล็กเสริมวางอยู่ใต้ผิวคอนกรีตไม่น้อยกว่า 2 เซนติเมตร จัดวางระยะให้ห่างกัน (ศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง) ไม่น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กที่ใช้ ซึ่งรายละเอียดการจัดวางเหล็กเสริมและการใส่เหล็กปลอกจะแบ่งตามการออกแบบทั้ง 4 ตัวอย่าง ดังนี้

2.1 เสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐาน (12.20_O)

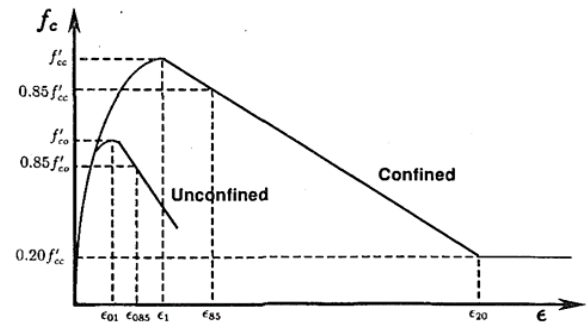
เสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐานจะใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.80 มิลลิเมตร เสริมเหล็กปลอกทุก ๆ ระยะ 30 เซนติเมตร เสริมด้วยเหล็กเสริมอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยการวางเหล็กเสริมบริเวณที่มุมมุมละ 9 เส้น ดังรูปที่ 4 โดยเสาดังนี้มีความต้านทานโมเมนต์ที่ออกแบบไว้จากการคำนวณและสามารถกำหนดค่าความต้านทาน คือ ความต้านทานโมเมนต์ใช้งาน 6,670 กิโลกรัม-เมตร และความต้านทานโมเมนต์สูงสุด 13,340 กิโลกรัม-เมตร



รูปที่ 4 ตัวอย่างแบบก่อสร้างเสาไฟฟ้าขนาด 12.20 เมตร แบบมาตรฐาน

2.2 เสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยการเพิ่มเหล็กปลอกในหน้าตัด (12.20_RB9)

การเพิ่มสมรรถนะด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น (ความเหนียว) ของคอนกรีตบริเวณที่มักเกิดความเสียหายจะมีส่วนสำคัญที่จะช่วยลดการวิบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตได้ ซึ่งการเพิ่มแรงโอบรัด (Confinement Force) ให้กับคอนกรีตจะทำให้มีกำลังรับแรงอัดและความเหนียวที่เพิ่มขึ้น [6-9] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดในคอนกรีต (f_c) และความเครียด (ϵ) ของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (Confined) และคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (Unconfined) [6]

การทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะที่ถูกโอบรัด สามารถทำได้โดยการใช้เหล็กปลอก (Stirrup) รัตรอบแกนคอนกรีต ในปริมาณที่มากพอ จะทำให้คอนกรีตมีกำลังและความเหนียวที่เพิ่มขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [10]

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_{le} \quad (1)$$

โดยที่

f'_{cc} = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

f'_{co} = กำลังของคอนกรีตเดิมหรือคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

$k_1 f_{le}$ = กำลังคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากการโอบรัด

โดย f_{le} เป็นแรงโอบรัดประสิทธิผลที่เกิดจากแรงโอบรัดของเหล็กปลอก ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2 [10]

$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{cx} + f_{ley} b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (2)$$

โดยที่

f_{lex} และ f_{ley} = แรงโอบรัดเนื่องจากเหล็กปลอกในแนวแกน x และ แนวแกน y ตามลำดับ

b_{cx} และ b_{cy} = ความกว้างของแกนคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทางด้านแกน x และ แกน y ตามลำดับ

ความเครียดประลัยของคอนกรีต (ϵ_{cu}) ที่ถูกโอบรัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 [11]

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + (1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}) / f'_{cc} \quad (3)$$

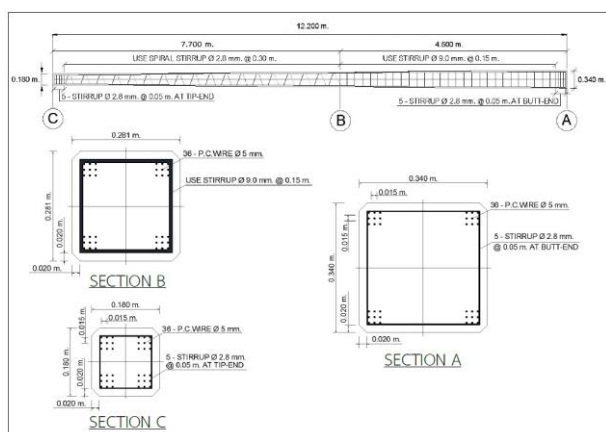
โดยที่

ρ_s = สัดส่วนของปริมาตรเหล็กปลอกต่อปริมาตรของ
คอนกรีตที่ถูกโอบรัดคอนกรีตทั้งในแนวแกน x และ y

f_{yh} = กำลังรับแรงที่จุดกลางของเหล็กปลอก

ε_{sm} = ความเครียดประลัยของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

ดังนั้น การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกที่มากขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีกำลังและความเหนียว (Toughness) ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำแบบวัฏจักรได้ดียิ่งขึ้น [5] จากนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยการเพิ่มเหล็กปลอกในหน้าตัด โดยการใส่เหล็กปลอกที่ระยะ 4.50 เมตร จากโคนเสา ด้วยเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.00 มิลลิเมตร ทุก ๆ ระยะ 15 เซนติเมตร และที่ระยะสูงกว่า 4.50 เมตร จากโคนเสา จะใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.80 มิลลิเมตร เสริมเหล็กปลอกทุก ๆ ระยะ 30 เซนติเมตร และเหล็กเสริมวางอยู่ใต้ผิวคอนกรีตไม่น้อยกว่า 2 เซนติเมตร เสริมด้วยเหล็กเสริมอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยการวางเหล็กเสริมบริเวณที่มุม มุมละ 9 เส้น ดังรูปที่ 6 โดยเสาดังนี้มีค่าความต้านทานโมเมนต์ที่ออกแบบไว้คือ ความต้านทานโมเมนต์ใช้งาน 6,670 กิโลกรัม-เมตร และความต้านทานโมเมนต์สูงสุด 13,340 กิโลกรัม-เมตร



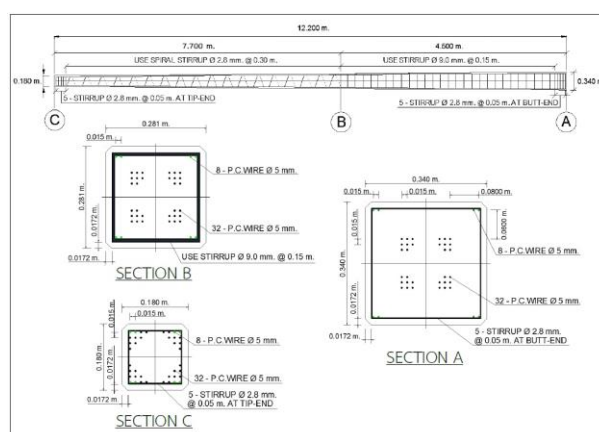
รูปที่ 6 ตัวอย่างแบบก่อสร้างเสาไฟฟ้าขนาด 12.20 เมตร
แบบปรับปรุงด้วยการเพิ่มเหล็กปลอกในหน้าตัด

2.3 เสาไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอก (12.20_GPC)

จากการสำรวจความเสียหายในภาคสนามพบว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีตมักเกิดการแตกร้าวบริเวณขอบเสาและเกิดการแตกของคอนกรีตบริเวณมุมเสา ทำให้ลวดอัดแรงหลุดออกจากตัวเสาและทำให้เสาเกิดการวิบัติในที่สุด

จึงตั้งสมมติฐานว่า หากลวดอัดแรงจำนวนมากอยู่ใกล้บริเวณมุมของเสา จะทำให้เกิดแรงอัดเฉพาะที่ (Local Stress) มากจนเกินไป อาจทำให้คอนกรีตเฉพาะบริเวณนั้นอยู่ในสภาพการรับแรงอัดมากจนเกินไป และเกิดการแตกร้าวในขณะรับแรงกระทำแบบไป-กลับ เพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว ทำการจัดเรียงเฉพาะลวดอัดแรงใหม่ ให้ลวดอัดแรงมีการกระจายตัวทั่วหน้าตัดของคอนกรีต เพื่อช่วยทำให้เสาคอนกรีตมีพฤติกรรมในการรับแรงแบบวัฏจักรดีขึ้น โดยสามารถรับแรงกระทำแบบวัฏจักรได้โดยไม่เกิดการวิบัติได้ง่าย

ดังนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบเสาไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอก โดยการเพิ่มและปรับการจัดเรียงลวดเหล็กเสริมอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร โดยการวางลวดเหล็กเสริมอัดแรงบริเวณที่มุม มุมละ 2 เส้น และวางบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางเสาไฟฟ้าคอนกรีต มุมละ 9 เส้น เหล็กปลอกเสริมที่ระยะ 4.50 เมตร จากโคนเสา ใช้เหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.00 มิลลิเมตร ทุก ๆ ระยะ 15 เซนติเมตร และระยะที่สูงกว่า 4.50 เมตร จากโคนเสา จะใช้เหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.80 มิลลิเมตร ทุก ๆ ระยะ 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 7 โดยเสาดังนี้มีค่าความต้านทานโมเมนต์ที่ออกแบบไว้คือ ความต้านทานโมเมนต์ใช้งาน 6,420 กิโลกรัม-เมตร และความต้านทานโมเมนต์สูงสุด 12,840 กิโลกรัม-เมตร



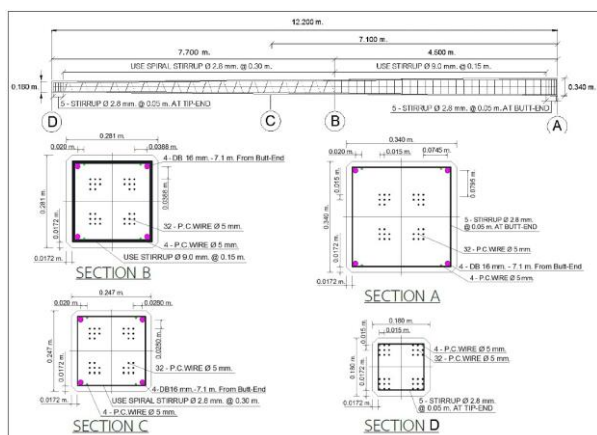
รูปที่ 7 ตัวอย่างแบบก่อสร้างเสาไฟฟ้าขนาด 12.20 เมตร แบบปรับปรุง
ด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอก

2.4 เสาไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรง ร่วมกับเหล็กปลอกและเพิ่มเหล็กเสริมยืน (12.20_DB)

เสาไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรง ร่วมกับเหล็กปลอกและเพิ่มเหล็กเสริมยืน โดยการเพิ่มเหล็กข้ออ้อย DB16 บริเวณมุมเสา ที่ระยะจาก

โคนเสาไปถึงระยะ 7.10 เมตร และวางลวดเหล็กเสริมอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่บริเวณมุม มุมละ 1 เส้น และวางลวดเหล็กเสริมอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร บริเวณใกล้จุดศูนย์กลางเสา มุมละ 9 เส้น เหล็กปลอกเสริมที่ระยะ 4.50 เมตร จากโคนเสา ใช้เหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ทุก ๆ ระยะ 15 เซนติเมตร และระยะที่สูงกว่า 4.50 เมตร จากโคนเสา จะใช้เหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.80 มิลลิเมตร ทุก ๆ ระยะ 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 8 โดยเสาตัวอย่างนี้มีค่าความต้านทานโมเมนต์ที่ออกแบบไว้คือ ความต้านทานโมเมนต์ใช้งาน 7,715 กิโลกรัม-เมตร และความต้านทานโมเมนต์สูงสุด 15,430 กิโลกรัม-เมตร

วิธีการนี้จะทำให้โคนเสามีกำลังรับโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้น [12] ทำให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ยาก และการปรับปรุงการจัดเรียงเหล็กเสริมอัดแรงให้กระจายทั่วหน้าตัดเสา ร่วมกับการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก จะช่วยให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตนั้นนอกจากจะมีกำลังรับโมเมนต์ดัดมากขึ้นแล้ว เสาดังกล่าวจะยังมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำแบบวัฏจักรได้ดียิ่งขึ้นด้วย



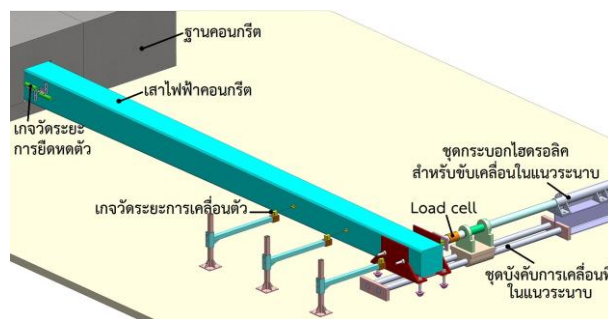
รูปที่ 8 ตัวอย่างแบบก่อสร้างเสาไฟฟ้าขนาด 12.20 เมตร แบบปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอกและเพิ่มเหล็กเสริมยืน

3. การทดสอบเสาไฟฟ้าคอนกรีตด้วยแรงกระทำแบบวัฏจักร

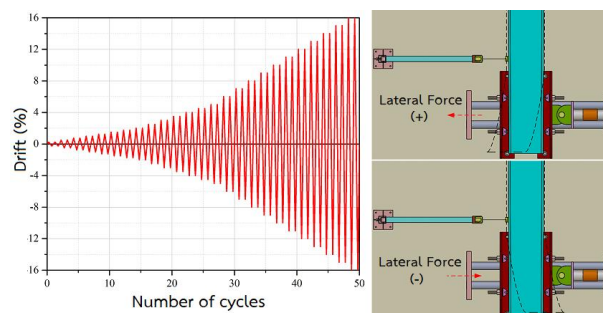
การทดสอบเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Load) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสา คอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบไปกลับ เช่น แรงกระทำจากแผ่นดินไหว และแรงกระทำจากลม เป็นต้น ซึ่งพฤติกรรมของเสา คอนกรีตในการรับแรงกระทำดังกล่าว จะมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิง เมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตรับแรงกระทำแบบสถิต (Static Load) ในการทดสอบจะทำติดตั้งตัวอย่างเสา

ที่ใช้ในการทดสอบกับเครื่องมือ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 9 และให้แรงกระทำ ไป-กลับ โดยจะทำการควบคุมระยะการเสียรูปที่ปลายเสาคอนกรีต ดังรูปที่ 10-11

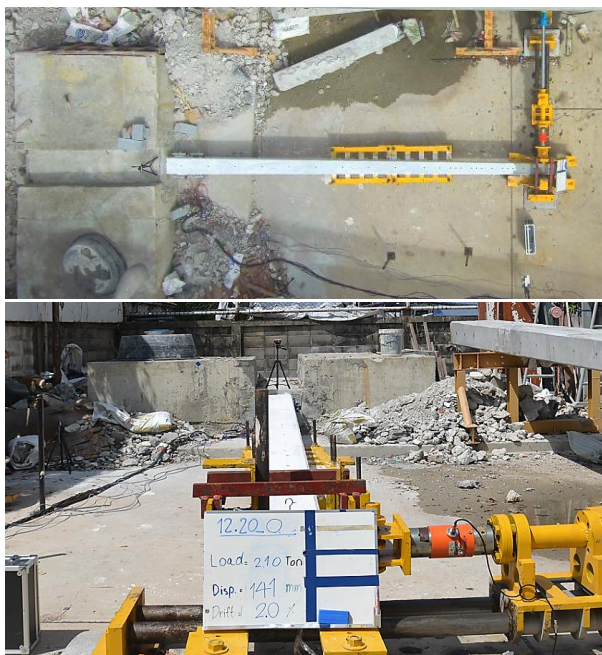
การทดสอบเสาตัวอย่างจะดำเนินการโดยเริ่มให้แรงอัดตามแนวแกนเทียบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจริง และควบคุมให้น้ำหนักคงที่ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้นจะให้แรงทางด้านข้างแบบวัฏจักรกระทำกับเสาตัวอย่าง ตามประวัติการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่างโดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของหัวเสา ดังรูปที่ 10 ในระหว่างการทดสอบจะทำการบันทึกข้อมูลระหว่างการทดสอบโดยการถ่ายรูปขั้นตอนการให้แรงกระทำด้านข้าง รอยแตกร้าวและพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น รวมถึงบันทึกผลระหว่างการทดสอบโดยละเอียด เช่น การเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่างจาก LVDT เงามัดความเครียดในเหล็กเสริม รอยแตกร้าว พฤติกรรมการวิบัติ เป็นต้น การทดสอบจะทำการโยกเสาจนเสาเกิดการวิบัติจึงหยุดการทดสอบ จากการทดสอบเสารับแรงกระทำแบบวัฏจักร จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักร ความแข็งแรง กำลังของของเสา ทั้งกำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุด กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด รูปแบบการวิบัติและที่สำคัญจะทำให้ทราบถึงระดับความเหนียวของเสา ซึ่งเสาที่มีความเหนียวมากจะป้องกันการวิบัติจากแรงกระทำแบบวัฏจักรหรือสามารถรับแรงกระทำแบบวัฏจักรได้หลายรอบ



รูปที่ 9 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือเพื่อการทดสอบเสาไฟฟ้าคอนกรีตด้วยแรงกระทำแบบวัฏจักร



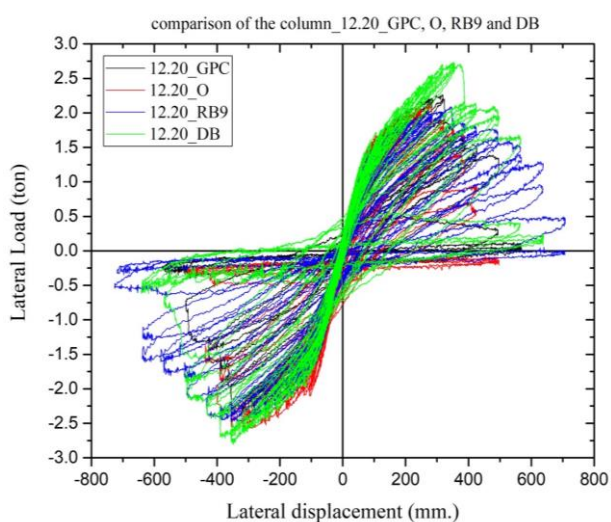
รูปที่ 10 แสดงรูปแบบลักษณะการเคลื่อนที่ด้านข้าง ไป-กลับ ณ ตำแหน่งปลายเสาไฟฟ้าคอนกรีต



รูปที่ 11 การติดตั้งและทดสอบจริงของเสาคอนกรีตขนาด 12.20 เมตร

4. ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเสาไฟฟ้าคอนกรีตด้วยแรงกระทำแบบวัฏจักรโดยจะทำการทดสอบจนเสาคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้จึงจะหยุดการทดสอบซึ่งสามารถแสดงกราฟผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 12-13 และแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่างที่ทำการทดสอบได้ดังรูปที่ 14-17



รูปที่ 12 ผลการทดสอบเสาไฟฟ้าคอนกรีตด้วยแรงกระทำแบบวัฏจักรของเสาไฟฟ้าคอนกรีตขนาด 12.20 เมตร ทั้ง 4 ตัวอย่าง



0.00 %Drift

1.25 %Drift เกิดรอยร้าวเริ่มต้น
โดยพบรอยร้าวแบบ Flexural Crack



3.00 %Drift

5.00 %Drift พบการแตกร้าว
และหลุดออกของคอนกรีต



7.00 %Drift เสาคอนกรีต
ไม่สามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้

รูปที่ 14 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐาน (12.20_O)



0.00 %Drift

1.50 %Drift เกิดรอยร้าวเริ่มต้น
โดยพบรอยร้าวแบบ Flexural Crack



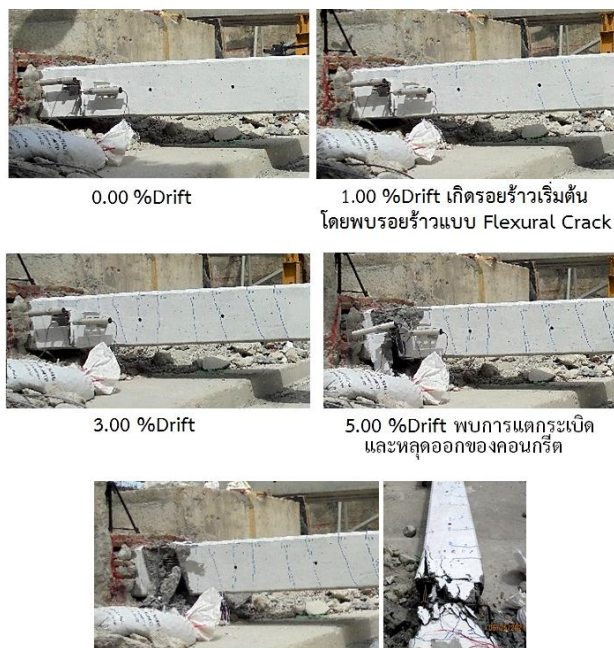
3.00 %Drift

5.00 %Drift

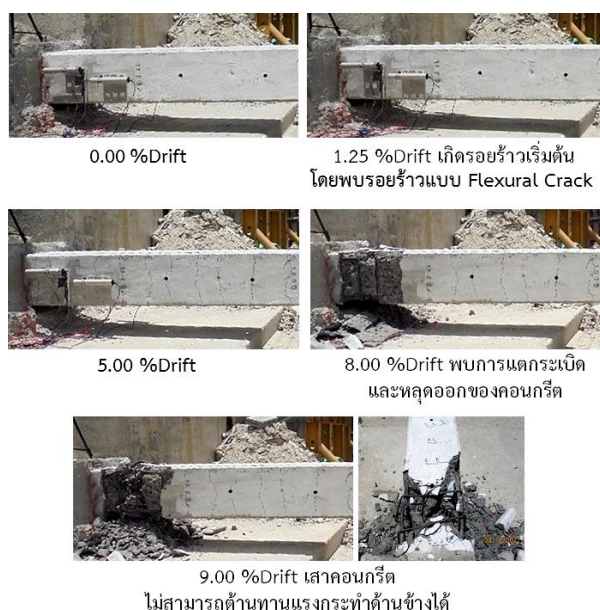


8.00 %Drift พบการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีต
และเสาคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้

รูปที่ 15 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยการเพิ่มเหล็กปลอกในหน้าตัด (12.20_RB9)



รูปที่ 16 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง
ของเสาไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่ง
และปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอก (12.20_GPC)



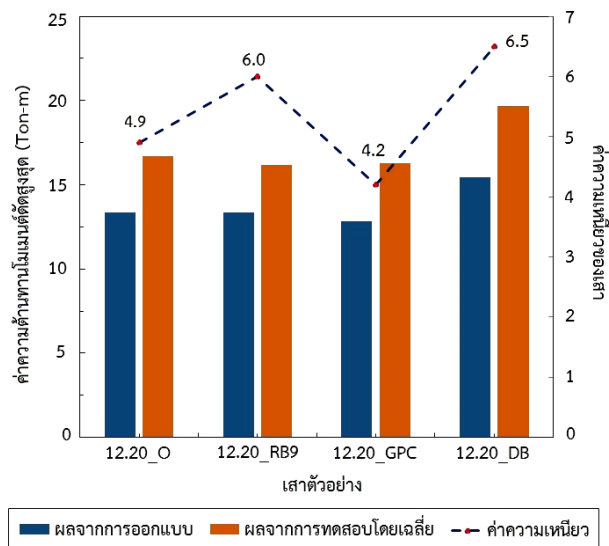
รูปที่ 17 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง
ของเสาไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวด
อัดแรงร่วมกับเหล็กปลอกและเพิ่มเหล็กเสริมยืน (12.20_DB)

จากผลการทดสอบจะทำให้ทราบค่าความต้านทาน
โมเมนต์สูงสุดของเสาตัวอย่างได้ดังตารางที่ 1 แสดงค่าความ
ต้านทานโมเมนต์สูงสุดที่ออกแบบและผลการทดสอบหาค่า
ความต้านทานโมเมนต์สูงสุดโดยเฉลี่ย รวมไปถึงค่าความ

เหนียวของเสาพร้อมทั้งร้อยละของระยะการเคลื่อนตัว
ที่สูญเสียความต้านทานด้านข้าง (%Drift) ซึ่งเป็นค่าที่ร้อยละ
80 ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของเสาตัวอย่างที่ใช้ในการ
คำนวณค่าความเหนียวของเสา โดยสามารถคำนวณได้สัดส่วน
ของระยะการเคลื่อนตัวที่สูญเสียความต้านทานด้านข้างต่อ
ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก [12-14] จากผลการ
ทดสอบพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณออกแบบมีค่าใกล้เคียง
กับค่าจากการทดสอบในเสาทั้ง 4 ตัวอย่างและเมื่อ
เปรียบเทียบผลการทดสอบของเสาทั้ง 4 ตัวอย่าง สามารถ
สรุปผลการทดสอบได้จากกราฟแสดงค่าความต้านทาน
โมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าความเหนียวที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 18

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานโมเมนต์สูงสุดที่ออกแบบ
และค่าความต้านทานโมเมนต์สูงสุดจากการทดสอบ

| ตัวอย่าง การทดสอบ | ค่าความต้านทาน โมเมนต์สูงสุดที่ ออกแบบ (กิโลกรัม-เมตร) | ค่าความต้านทาน โมเมนต์สูงสุด จากการทดสอบ (กิโลกรัม-เมตร) | ค่า ความเหนียว (%Drift) |
|----------------------|---|---|-------------------------------|
| 12.20_O | 13,340 | 16,700 | 4.9 (5.56%) |
| 12.20_RB9 | 13,340 | 16,200 | 6.0 (6.97%) |
| 12.20_GPC | 12,840 | 16,300 | 4.2 (5.14%) |
| 12.20_DB | 15,430 | 19,700 | 6.5 (6.99%) |



รูปที่ 18 กราฟแสดงค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดโดยเฉลี่ย
และค่าความเหนียวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบของทั้ง 4 เสาตัวอย่างพร้อม
เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการออกแบบ

5. สรุป

จากผลการทดสอบเสาไฟฟ้าคอนกรีตขนาด 12.20 เมตร
ด้วยแรงกระทำแบบวัฏจักร ทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าการเพิ่มเหล็ก
ปลอกในหน้าตัดของเสาคอนกรีตตามแบบมาตรฐานเพื่อเพิ่ม

แรงโอบรัด กำลัง และค่าความเหนียวให้กับเสานั้น วิธีการนี้สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นหรือความเหนียวให้กับเสาคอนกรีตได้ดี อีกทั้งเมื่อเพิ่มเหล็กเสริมยื่นเข้าไปบริเวณมุมเสาทำให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความแข็งแรง สามารถรับโมเมนต์ดัดและมีความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐาน ในขณะที่การปรับปรุงเสาไฟฟ้าคอนกรีตด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงเพื่อแก้ไขปัญหาการแตกร้าวบริเวณขอบเสาจนทำให้อาจเกิดแรงอัดเฉพาะที่มากเกินไปนั้น พบว่าวิธีการปรับปรุงดังกล่าวส่งผลให้เสามีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและมีความเหนียวที่ลดน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบพบว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ทำการปรับปรุงด้วยการปรับตำแหน่งและปริมาณลวดอัดแรงร่วมกับเหล็กปลอกและเพิ่มเหล็กเสริมยื่น (12.20_DB) มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเพิ่มขึ้นถึง 17.96% และมีความยืดหยุ่นหรือค่าความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น 32.65% เมื่อเทียบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบมาตรฐาน (12.20_O) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแนวความคิดการเสริมเหล็กและจัดรูปแบบลวดอัดแรงในรูปแบบที่ 4 น่าจะมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ปรับปรุงสมรรถนะเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงให้สามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งทางด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กองทุนการวิจัย พัฒนา และนวัตกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ความกรุณาอบทุนสนับสนุนการวิจัย เอื้อเพื่อข้อมูล และอำนวยความสะดวกในขณะลงพื้นที่ดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา และคณะ, รายงานฉบับสมบูรณ์, “การตรวจสอบและประเมินหาสาเหตุการวิบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตโดยประยุกต์ใช้การตรวจวัดและวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์”, กองทุนการวิจัย พัฒนา และนวัตกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2019
- [2] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย, “คำแนะนำ แบบมาตรฐานการ ก่อสร้างสายส่ง 115 kV ของ กฟภ.”, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2007
- [3] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายจัดทำมาตรฐานการติดตั้งและมาตรฐานของอุปกรณ์, “หลักเกณฑ์ การออกแบบการติดตั้ง และการเลือกใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า”, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2006
- [4] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย, “มาตรการป้องกันไฟฟ้าลัมเนื่องจากพายุฤดูร้อน พ.ศ. 2560”, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2017
- [5] R. Paulay and M.J.N. Priestley, “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”, USA: John-Wiley & Sons, 1992.
- [6] J.B. Mander, M.J.N. Priestley, and R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8), pp. 1804-1826.
- [7] S. Watson, F.A. Zahn, and R. Park, “Confining Reinforcement for Concrete Columns”. Journal of Structural Engineering 120(6): 1798-1824. USA: American Society of Civil Engineers, 1994.
- [8] B. D. Scott, R. Park, and M. J. N. Priestley, "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates." Am. Concr.Inst.J., 79(1), 13-27, 1982.
- [9] S. Pujol, M. A. Sozen and J. A. Ramirez, "Transverse-Reinforcement Requirement for Columns of RC Frames to Resist Earthquakes." Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 126, No.4, April, pp. 461-466, 2000.
- [10] M. Saatcioglu and G. Ozcebe, "Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading," American Concrete Institute, ACI Structural Journal, January - February, 1989, pp. 3-12
- [11] M. J. N. Priestley, F. Seible, and G.M. Calvi, “Seismic Design and Retrofit of Bridges”, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [12] R. Park and T. Paulay, “Reinforced Concrete Structures”, John Wiley & son, 1975.
- [13] F. Li, L. Duan, "Seismic Design Philosophies and Performance-Based Design Criteria", Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [14] L. Duan and T. R. Cooper, Displacement ductility capacity of reinforced concrete columns, ACI Concrete Int., 17(11), 61–65, 1995.