

พฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของเสาสั้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่หล่อในแบบหล่อเสถียร Axial Behavior of Short Square Columns Cast in Permanent Formworks

พัศกร วัฒนสุต* พรชัย จำรูญ สุวัชรพงษ์ หนัณมา วิถีวัสถ์ แสนปัญญา และ ประกิต ชมชื่น

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: 6419310002@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่หล่อในแบบหล่อถาวรที่มีขายกันทั่วไปในปัจจุบัน แบบหล่อถาวรที่ใช้เป็นแบบหล่อที่ซื้อได้จากร้านขายวัสดุก่อสร้างขึ้นขนาดหน้าตัด 21x21 เซนติเมตร ยาว 86 เซนติเมตรหนา 2 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่โรงงานผลิตแนะนำสำหรับใช้หล่อแทนเสาขนาดหน้าตัด 20x20 เซนติเมตร การศึกษาทำโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่ 1.เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 20x20 เซนติเมตรที่หล่อในแบบหล่อชั่วคราว 2.เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 17x17 เซนติเมตรที่หล่อในแบบหล่อชั่วคราว 3.เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 21x21 เซนติเมตรที่หล่อในแบบหล่อถาวร และ 4.แบบหล่อถาวรขนาด 21x21 เซนติเมตร ที่ไม่มีการหล่อคอนกรีตด้านใน โดยทำการทดสอบกลุ่มละ 5 ตัวอย่าง การทดสอบทำโดยออกแรงกดตามแนวแกนเสาแล้วบันทึกการเสียรูปตามแนวแกนและการเสียรูปด้านข้าง (การขยายตัว) ของเสา รวมถึงวัดการขยายตัวของเหล็กปลอกทั้งในเสาและในแบบหล่อถาวร ผลการศึกษาแสดงว่าเสาที่หล่อในแบบหล่อถาวรมีความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับเสาที่หล่อในแบบหล่อชั่วคราว

คำสำคัญ: เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, เสาสี่เหลี่ยมจัตุรัส, แบบหล่อถาวร, พฤติกรรมรับแรงตามแนวแกน, กำลังรับแรงตามแนวแกน

Abstract

The purpose of this paper is to study the axial behavior of square-section reinforced concrete columns cast in permanent formworks. The permanent formworks can be purchased from leading building materials stores. Size of selected permanent formwork is 21x21x86 centimeter with 2 centimeters thick. This size of permanent formwork is suggested from the manufacturer for using to replace the column size 20x20 centimeter that cast by temporary formworks. This study performs axial loading tests of 4 groups of columns, i.e., 1. Square column 20x20 centimeter cast by temporary formworks, 2. Square column 17x17

centimeter cast by temporary formworks, 3. Square column 21x21 centimeter cast by permanent formworks, and 4. Permanent formworks without concrete infilled. Each group of columns consists of 5 specimens. Axial loads are recorded together with column shortening and lateral expansion of column. Moreover, the stirrup expansion also is recorded in order to investigate axial behavior and lateral expansion of the columns. The results show that the axial capacity of the column with permanent formworks is significantly less than those of the columns cast by temporary formworks.

Keywords: Reinforced Concrete Columns, Square Columns, Permanent Formworks, Axial Behavior, Axial Capacity.

1. บทนำ

เสาเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ขั้นตอนการทำงานปกติคือตั้งแบบหล่อ หลังจากผูกเหล็กเทคอนกรีตแล้วยังมีขั้นตอนถอดแบบหล่อออก งานแบบหล่อจึงเป็นที่สนใจที่จะพัฒนาทั้งทางด้านการเลือกใช้วัสดุทำแบบหล่อ วิธีการประกอบ เพื่อลดค่าใช้จ่ายเวลา เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่ผ่านมามีความพยายามพัฒนาแบบหล่อเพื่อให้เบาเช่นแบบหล่อกระดาษใช้ครั้งเดียว แบบใช้ซ้ำได้หลายครั้งเช่นแบบหล่อพลาสติก แต่ก็ยังเป็นแบบหล่อชั่วคราวที่ต้องถอดออก จึงมีการพัฒนาแบบหล่อคอนกรีตแบบยึดติดถาวร เพื่อลดขั้นตอนการรื้อแบบหลังเทคอนกรีต ลดค่าใช้จ่าย ลดเวลา เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังอาจจะพัฒนาวัสดุที่จะยึดติดถาวรเพื่อให้ทนสภาวะต่างๆที่อาจกระทำต่อโครงสร้างเช่นให้ทนความร้อน การลวกไฟ ทนกรดด่าง หรือสภาพแวดล้อมอื่นๆที่เพิ่มความสามารถต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีความพยายามที่จะใช้วัสดุอื่น ๆ ร่วมกับเสา คอนกรีตเสริมเหล็กเป้าหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพเสาให้มีความสามารถรับกำลังได้มากขึ้น เช่นงานวิจัย ของ Benzaid and Mesbah [1] ปี 2020 ทำการศึกษาทดสอบเสาหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ ทดสอบเสาหุ้มด้วย CFRP 1 ชั้น และ 3 ชั้น ตามรูปที่ 1 โดยเลือกหุ้มเสาที่ต่างกัน 3 รูปแบบคือ a) มีกำลังอัดคอนกรีตต่างกัน 3 ค่าคือ Strength 26 MPa, 50 MPa, 62 MPa ,

b) คอนกรีตเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็ก c) ทดสอบทั้งเสากลมและเสาสี่เหลี่ยม ผลการทดสอบพบว่าผลจากหุ้ม CFRP ทั้ง 1 ชั้นและ 3 ชั้น เสาคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก CFRP มีบทบาทเสริมกำลังอัดได้มากที่สุด ขณะที่คอนกรีตเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตกำลังอัดสูงขึ้นกลับมีบทบาทเสริมกำลังลดลงตามลำดับ

ปี 2020 การทดสอบเสาหุ้มปลอกเหล็กของ Zhang, Li and Xie [2] ทำวิจัยการใช้แรงโอบรัดปลอกเหล็กก่อนด้วยห่วงชั้นเกลียว (Pre stressed Steel Hoop) เสากลมขนาดหน้าตัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร มีส่วนที่เป็น Passive confinement คือปลอกสแตนเลสและส่วนที่เป็น Active Confinement คือห่วงชั้นเกลียว มีระยะห่าง (spacing) ต่างกัน 2 ระยะ คือ 3 ห่วงกับ 4 ห่วง ได้ระยะห่าง 132 mm. กับ 88 mm. แล้วใส่แรงบีบห่วงชั้นเกลียวไว้ที่ 30% กับ 40% ของแรงบีบชั้นเกลียว ผลเปรียบเทียบระยะความถี่ของห่วงเหล็กชั้นเกลียว (Steel hoop) กับแรงที่ชั้นโอบรัดก่อน (Active confinement) พบว่า ผลของแรงโอบรัดก่อนที่ต่างกันคือ 30% กับ 40% ของแรงบีบชั้นเกลียว ให้ผลน้อยกว่าระยะความถี่ของห่วงเหล็กชั้นเกลียว (Steel hoop)

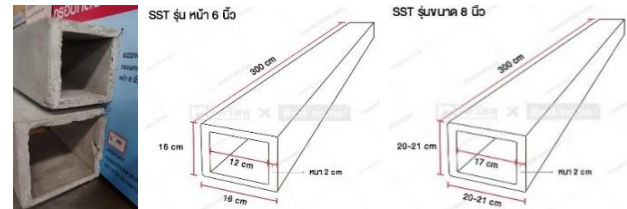
ปี 2020 Faleschini, et al. [3] ทดสอบพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโอบรัดด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ การทดสอบนี้ทำให้เห็นพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกดตามแนวแกนแล้วเกิดการถ่ายแรงออกไปเป็นแรงดันด้านข้าง สัดส่วนการโอบรัดเสาด้วยไฟเบอร์ FRCM ที่กระทำต่อเหล็กปลอกมีส่วนสำคัญในการช่วยกระจายแรงกดตามแนวแกนที่ถูกถ่ายแรงมาทางด้านข้างของเสา

งานวิจัยเกี่ยวกับแบบหล่อถาวร ปี 2011 งานวิจัยเกี่ยวกับแบบหล่อยึดติดถาวรของ ซูลิพร อูยยืนยงค์ [4] ทำการศึกษาเรื่องการเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก พบว่าปลอกเหล็กที่หุ้มเสาคอนกรีตช่วยให้เสามีความเหนียวสูงขึ้นตามความหนาของเหล็กปลอก การวัดเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป

ปี 2021 Shichang Li และ Shiping Yin [5] ทำวิจัยทดสอบการรับกำลังของเสาเมื่อใช้แบบหล่อยึดติดถาวรที่เสริมด้วย TRC โดยสนใจที่รูปแบบทิศทางการประกอบแบบหล่อ, อุปกรณ์ประกอบและวิธีประกอบแบบหล่อ แล้วทดสอบการทรุดลงในแบบเสา เามาทดสอบรับกำลังอัดตามแนวแกน ผลการทดสอบแรงอัดพบว่าเสามีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและรูปแบบการเข้ามุมแบบ 45 องศาให้ผลกำลังอัดเพิ่มมากที่สุด จะเห็นว่างานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ให้ความสนใจการใช้วัสดุหุ้มเสาเพื่อปรับปรุงการรับกำลัง งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้แบบหล่อยึดติดถาวรยังมีน้อยและยังไม่มีการศึกษาแบบหล่อยึดติดถาวรโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปลอกแบบ

ขณะนี้ไม่มีโรงงานในประเทศไทย ทำแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กจำหน่ายในร้านวัสดุชั้นนำ และมีการใช้งานแล้ว มีขนาดหน้าตัดเสา 2 ขนาดคือ 6 นิ้ว และ 8 นิ้ว รายละเอียดขนาดตามรูปที่ 1 จะเห็นว่า สำหรับหน้าตัดเสา 6 นิ้วพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เทลงในแบบหล่อถาวรขนาดภายใน 12x12 เซนติเมตร และสำหรับหน้าตัดเสา 8 นิ้ว ที่จะใช้แทนขนาด 20x20 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เทลงในแบบมีเพียง 17x17 ซม. แต่เมื่อเทคอนกรีตแล้ว หน้าตัดของคอนกรีตรวมแบบ

หล่อยึดติดถาวรแล้วจะได้ขนาด 16x16 เซนติเมตร และ 21x21 เซนติเมตร จึงเป็นที่น่าสนใจว่า ขนาดดังกล่าวจะใช้แทนหน้าตัดคอนกรีตที่ออกแบบไว้ขนาด 15x15 เซนติเมตร และขนาด 20x20 เซนติเมตรได้หรือไม่ ดีกว่าหรือด้อยกว่าอย่างไร ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเฉพาะหน้าตัดเสา 8 นิ้ว ที่จะใช้แทนเสาหน้าตัดขนาด 20x20 เซนติเมตร



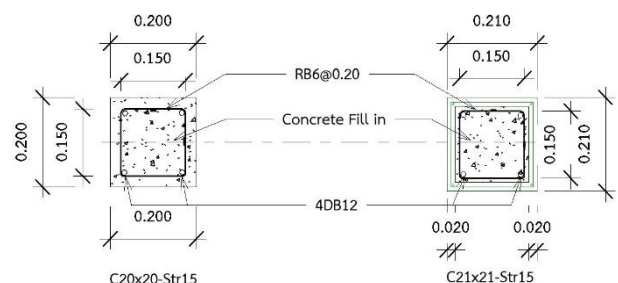
รูปที่ 1 แบบหล่อเสายึดติดถาวรขนาด 16x16 และ 21x21 เซนติเมตร

2. รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและวิธีทดสอบ

2.1 จัดกลุ่มทดสอบกำลังอัดตามแนวแกน 3 กลุ่ม ด้วยตัวอย่างทดสอบ 5 แบบๆละ 5 ตัวอย่าง ดังนี้

2.1.1 กลุ่มที่ 1 เปรียบเทียบกำลังอัดระหว่าง C20x20-Str15 กับ C21x21-Str15

เสาแบบที่ 1 หล่อแล้วถอดแบบปกติขนาด 20x20 ซม.สูง 86 ซม.เสริมเหล็กยื่น และเหล็กปลอกน้อยสุดตามมาตรฐาน วสท.[6] คือ เหล็กยื่น 4DB12 เหล็กปลอก RB6 ขนาด 15x15 ซม.ระยะห่าง 20 ซม. ต่อไปจะเรียกว่า C20x20-str15 เทียบกับเสาแบบที่ 2 หล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบหล่อยึดติดถาวรขนาด 8 นิ้ว เนื้อคอนกรีตเสาที่เทเพิ่มลงในแบบเท่ากับ 17x17 ซม. จะได้หน้าตัดเสาแบบภายนอก 21x21 ซม.สูง 86 ซม.เท่ากัน เสริมเหล็กในเสาเหมือนกับแบบที่ 1 คือเหล็กยื่น 4DB12 เหล็กปลอก RB6 ขนาด 15x15 ซม.ระยะห่าง 20 ซม. ต่อไปจะเรียกว่า C21x21-str15 ตามรูปที่ 2

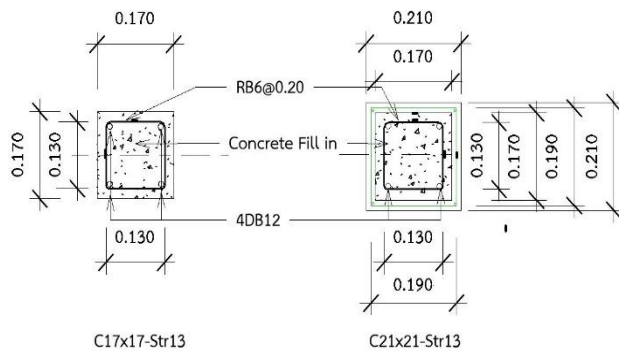


รูปที่ 2 กลุ่มที่ 1 เปรียบเทียบ C20x20-Str15 กับ c21x21-Str15

2.1.2 กลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกำลังอัดระหว่าง C17x17-Str13 กับ C21x21-Str13

เสาแบบที่ 3 หล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร ใช้แบบหล่อปกติแล้วถอดแบบออก ขนาดหน้าตัด 17x17 ซม.สูง 86 ซม.

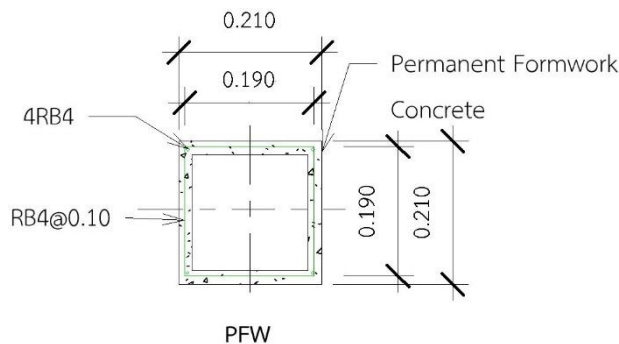
เสริมเหล็กยื่น 4DB12 ใส่เหล็กปลอก RB6 ขนาด 13x13 ซม.เพื่อให้มีระยะหุ้มเหล็กปลอกด้านละ 2 ซม.ระยะห่างเหล็กปลอก 20 ซม.ต่อไปจะเรียกว่า C17x17-str13 เปรียบเทียบกับ แบบที่ 4 เสาใช้แบบหล่อถาวร ขนาดรวมปลอกภายนอก 21x21 ซม. เสริมเหล็กเหมือนกันคือ เหล็กยื่น 4 DB12 และเหล็กปลอก RB6 @ 0.20 ม. ขนาด 13x13 ซม.เท่ากัน ต่อไปจะเรียกว่า C21x21-Str13 ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 กลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบ C17x17-Str13 กับ C21x21-Str13

2.13 กลุ่มที่ 3 ทดสอบกำลังอัดเฉพาะปลอกเสา 8 นิ้ว ความสูง 86 ซม.

แบบที่ 5 เฉพาะแบบหล่อถาวรขนาด 8 นิ้ว ความหนาโดยรอบ 2 ซม. จะได้ขนาดภายนอก 21x21 ซม.สูง 86 ซม. ไม่เทคอนกรีต ต่อไปจะเรียกว่า PFW ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 PFW แบบหล่อถาวรหนา 2 ซม. ขนาด 21x21 เซนติเมตร เหล็กยื่น 4RB4 เหล็กปลอก RB4@0.10 ขนาดปลอก19x19

ทั้ง 3 กลุ่มทดสอบ ใช้เสาสูง 80 เซนติเมตร โดยจัดให้มีเหล็กปลอกที่จุดให้แรงหัวท้ายด้านละ 3 เซนติเมตร เพิ่มจุดละ 2 ปลอก ความสูงเสา รวม 86 เซนติเมตร ใช้คอนกรีตกำลังอัดรูปทรงกระบอก 240 กก.ต่อตร. ซม. เขียนสรุปกลุ่มทดสอบ 3 กลุ่มเป็นตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดหน้าตัด เหล็กเสริม ของกลุ่มทดสอบ 3 กลุ่ม

กลุ่ม	ชนิดแบบ	หน้าตัด (ซม.)	เหล็กเสริม
1	C20x20-Str15 ไม่ใช้แบบหล่อถาวร	20x20	4DB12,-RB6@0.20 15x15
	C21x21-Str15 ใช้แบบหล่อถาวร	21x21	4DB12,-RB6@0.20 15x15
2	C17x17-Str13 ไม่ใช้แบบหล่อถาวร	17x17	4DB12,-RB6@0.20 13x13
	C21x21-Str13 ใช้แบบหล่อถาวร	21x21	4DB12,-RB6@0.20 13x13
3	PFW เฉพาะแบบหล่อ	นอก 21x21 หนา 2 ซม.	ลวดแรงดึงสูง RB4@0.10

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ทำตัวอย่างเสาทดสอบเปรียบเทียบคู่ตามกลุ่มทดสอบ 2 กลุ่มและแบบเสาเปล่าที่ไม่หล่อคอนกรีตด้านใน แบบๆละ 5 ตัวอย่าง คุณสมบัติวัสดุตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3

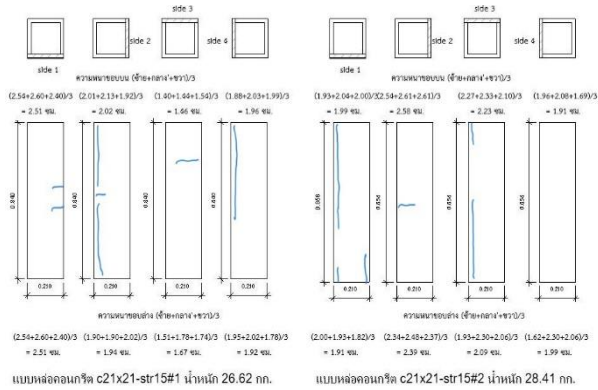
ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อยึดติดถาวร PFW จากโรงงาน

วัสดุ	ขนาด	เกรด	กำลัง (ksc)
เหล็กยื่น	ลวด 4.0 มม. 4 เส้น	แรงดึงสูง	$f_y = 5000$
เหล็กปลอก	ลวด 4.0 มม. @100mm	แรงดึงสูง	$f_y = 5000$
คอนกรีต ปลอกเสา	20x210x210 มม. หนาxกว้างxยาว	คอนกรีตผสมไมใส่ หินเกล็ด	$f_{c'} = 192$

ตารางที่ 3 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้หล่อในเสาทดสอบ

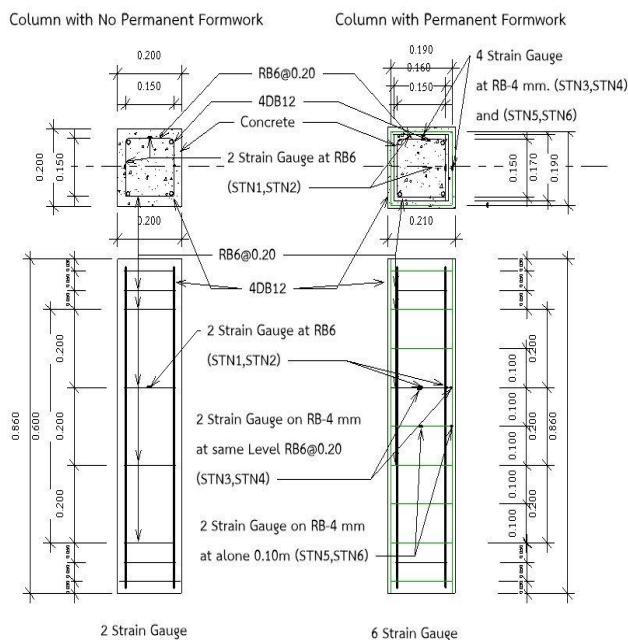
วัสดุ	ขนาด	เกรด	กำลัง (ksc)
เหล็กยื่น	4xDB12	SD30	$f_y = 3000$
เหล็กปลอก	RB6 มม.@200 มม.	SR24	$f_y = 2400$
คอนกรีต	200x200 , 170x170	คอนกรีตสำเร็จ 240	$f_{c'} = 192$

การจัดเตรียมปลอกเสาแบบหล่อถาวรจากโรงงานของผู้ผลิต วัสดุปลอกเสาใช้คอนกรีตผสมไม ปูนปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หยาบและหินเกล็ดหล่อเป็นแบบเสาสำเร็จ หลังจากคอนกรีตเซตตัว 1 วันจึงถอดแบบแล้วทิ้งไว้ในที่ร่มโดยไม่ได้บ่มคอนกรีต ผู้ทดสอบขอเก็บตัวอย่างคอนกรีตหน้าไม้ นำไปบ่ม 28 วันเพื่อเช็คกำลังอัดของเนื้อคอนกรีตที่ใช้ทำปลอกเสา หลังจากได้รับแบบทดสอบจากโรงงาน ผู้ทดสอบพบว่ามียอยแตกร้าวกระจายอยู่ทั่วไป จึงมีการบันทึกรอยแตกร้าวที่ปรากฏ พร้อมบันทึกค่าความหนาของปลอกเสาหัวและท้ายทั้ง 4 ด้าน ตามรูปที่ 5 ตัดเจียรขอบให้ได้แนวฉาก ซึ่งน้ำหนักปลอกเสาทุกต้น ก่อนเทคอนกรีตหล่อเสาตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 5 การบันทึกขนาดความหนา ตำแหน่งของแบบหล่อแต่ละต้น

และเพื่อศึกษาการยึดตัวของเหล็กปลอก RB6 @ 0.20 ม. ที่เสริมอยู่ในเสา เปรียบเทียบกับเหล็กปลอกที่เสริมอยู่ปลอกแบบหล่อเสาชนิดติดถาวร การทดสอบนี้จึงติดตั้ง Strain Gauge ที่เหล็กปลอก RB6 2 ตำแหน่งตั้งฉากกัน และที่เหล็กปลอกของแบบหล่อถาวร ที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กปลอก RB6 2 ตำแหน่งตั้งฉากกัน และที่ตำแหน่งห่างจากเหล็ก RB6 10 เซนติเมตร อีก 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 6



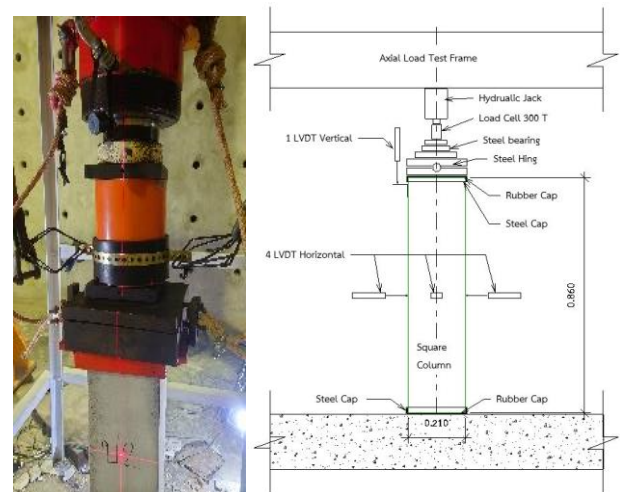
รูปที่ 6 ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauge

คอนกรีตหล่อเสาปกติที่ไม่มีแบบหล่อยึดติดถาวร ขนาด 20x20 ซม. และขนาด 17x17 ซม. รวมทั้งเนื้อคอนกรีตที่หล่อลงในแบบหล่อถาวรทั้ง 2 กลุ่ม ใช้กำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอก 240 กก.ต่อตร.ซม.

เหล็กเสริมที่อยู่ในปลอกเสาใช้ลวดแรงดึงสูง 4 มม. 4 เส้น เชื่อมเป็นเหล็กปลอกห่าง 10 ซม. ตลอดแนวความสูงเสา ค่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก 5,000 กก.ต่อตร.ซม. เหล็กเสริมในเสาใช้เหล็กยี่ห้อ 4DB12 เกรด SD30 เหล็กปลอก RB6 เกรด SR24

2.3 วิธีทดสอบ

ทดสอบแรงอัดตามแนวแกน ด้วยเฟรมทดสอบแรงอัดตามแนวแกนขนาดใหญ่ ใช้แรงกดไฮดรอลิกผ่าน Load Cell ขนาด 300 ตัน มีแผ่นยางรองทั้งปลายหน้าตัดเสานและล่างเพื่อกระจายแรงตามแนวแกนให้เต็มหน้าตัดเสา มีชุดเหล็กปรับมุมของแรง ผ่านหน้าตัดเสาที่หัวเสาด้านบนติดตั้งตัววัดค่าตามแนวแกนด้านบนของเสา 1 จุด และด้านข้างเสา 4 ด้านด้วย LVDT รวม 5 จุด ตามรูปที่ 7 บันทึกการรับค่าแรงกด, ระยะการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน, ระยะขยับตัวด้านข้าง, วัดค่าการยึดตัวของ Strain gauge ด้วย Data logger

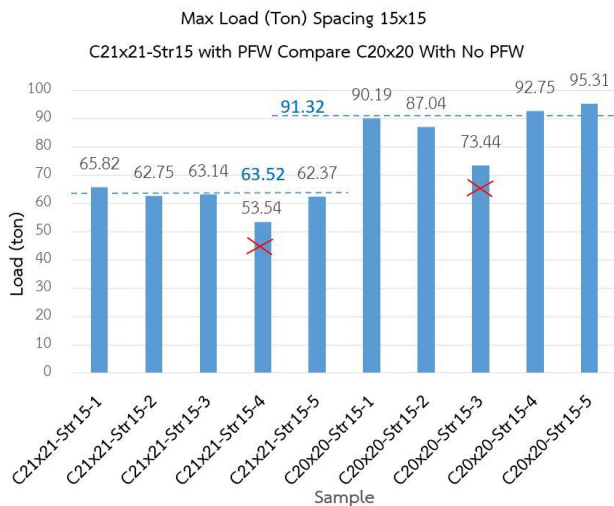


รูปที่ 7 ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแรงกดตามแนวแกนเสา

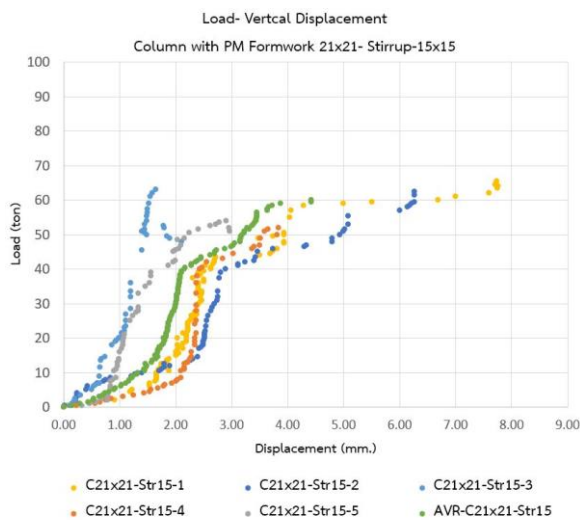
3. ผลการทดสอบ

3.1 กลุ่มที่ 1 เสาที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร C20x20-Str15 เทียบกับ เสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str15

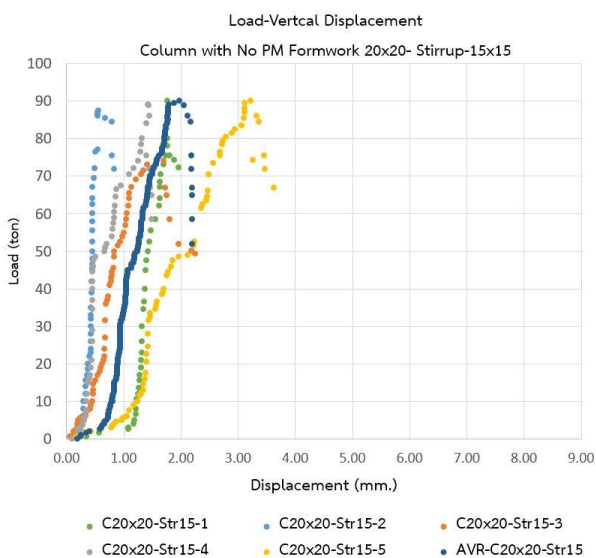
ผลการทดสอบเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร รับกำลังอัดตามแนวแกนได้ 65.82 ตัน, 62.75 ตัน, 63.13 ตัน, 53.54 ตัน, 62.37 ตัน ขณะที่เสาที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร รับกำลังอัดตามแนวแกนได้มากกว่าทั้ง 5 ตัวอย่างทดสอบ คือ 90.19 ตัน, 87.04 ตัน, 73.44 ตัน, 92.75 ตัน, 95.31 ตัน ซึ่งในกลุ่มตัวอย่างทดสอบนี้มีเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร 1 ต้น คือ C21x21-str15-4 และไม่ใช่แบบหล่อถาวร 1 ต้น คือ C20x20-str15-3 ทดสอบกำลังอัดได้น้อยกว่าปกติ คือ 53.54 ตันและ 73.44 ตัน อันเนื่องมาจากหน้าตัดที่ฐานเสาไม่สมบูรณ์ขณะยกเข้าทดสอบ ทำให้ทดสอบกำลังอัดต่ำกว่าในกลุ่ม ตามรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาโดยใช้ค่าเปี่ยงเบนมาตรฐานแล้ว ค่ากำลังอัดทั้ง 2 ต้นนี้ ถือว่าต่ำกว่ากลุ่ม จึงใช้ค่าเฉลี่ยกำลังอัดกลุ่มละ 4 ตัวอย่าง ค่ากำลังอัดตามแนวแกนเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str15 เฉลี่ยคือ 63.52 ตันและเสาที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร C20x20-Str15 เฉลี่ยคือ 91.32 ตัน ตามรูปที่ 8 จะเห็นว่าเสาที่ใช้แบบหล่อถาวรรับกำลังได้น้อยกว่าเสาหล่อปกติถึง 27.82 ตัน



รูปที่ 8 ค่ากำลังอัดตามแนวแกนสูงสุดของกลุ่มทดสอบที่ 1



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของการยุบตัวกับแรงกดตามแนวแกน C21x21-Str15

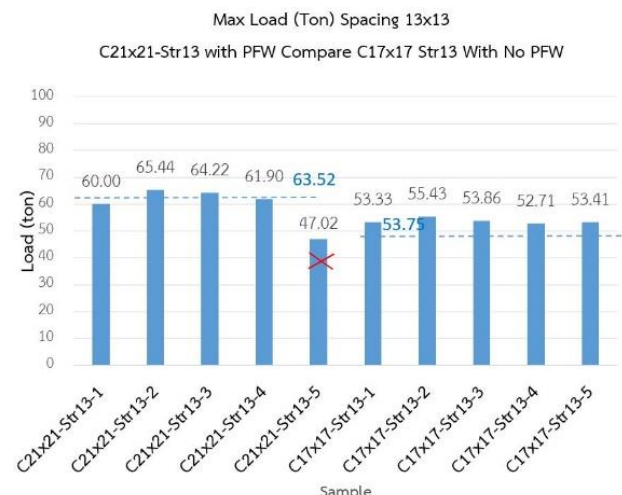


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของการยุบตัวกับแรงกดตามแนวแกน C20x20-Str15

ค่าการยุบตัวเมื่อรับแรงกดตามแนวแกน จะเห็นว่าเสา C21x21-Str15 มีการยุบตัวเฉลี่ยประมาณ 4.0 มม. ที่แรงกดสูงสุดเฉลี่ย 63.52 ตัน ตามรูปที่ 9 ขณะที่เสา C20x20-Str15 การยุบตัวเฉลี่ยประมาณ 1.9 มม. ที่แรงกดสูงสุดเฉลี่ย 91.32 ตัน ตามรูปที่ 10 จะเห็นว่าการทดสอบใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str15 รับกำลังอัดได้น้อยกว่า ทั้งยังเกิดการยุบตัวตามแนวแกนมากกว่าเสาที่ใช้แบบหล่อปกติ C20x20-Str15

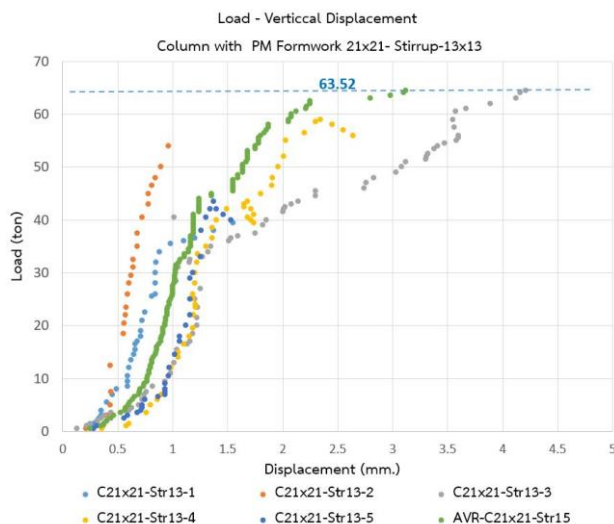
3.2 กลุ่มที่ 2 เสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str13 เทียบกับเสาที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร C17x17-Str13 ขนาดหน้าตัดเท่ากับขนาดหน้าตัดด้านในของแบบหล่อถาวร

ผลการทดสอบเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str13 รับกำลังอัดตามแนวแกนได้ 60.00 ตัน, 65.44 ตัน, 64.22 ตัน, 61.90 ตัน, 47.02 ตัน ขณะที่เสาที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร C17x17-Str13 รับกำลังอัดตามแนวแกนได้ 53.33 ตัน, 55.43 ตัน, 53.86 ตันและ 53.41 ตัน ซึ่งในกลุ่มตัวอย่างทดสอบนี้มีเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร 1 ต้น C21x21-str13-5 ทดสอบกำลังอัดได้น้อยกว่าปกติ คือ 47.02 ตัน เนื่องจากปลอกแบบหล่อยัดถาวรมีรอยร้าวมากและฐานเสาไม่เรียบ ทำให้ทดสอบกำลังอัดต่ำกว่าในกลุ่ม ตามรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาโดยใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้ว ค่ากำลังอัดเสาด้านนี้ ถือว่าต่ำกว่ากลุ่ม จึงใช้ค่าเฉลี่ยกำลังอัด 4 และ 5 ตัวอย่าง ค่ากำลังอัดตามแนวแกนเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str13 เฉลี่ยคือ 63.52 ตันและเสาที่ไม่ใช้แบบหล่อถาวร C17x17-Str13 เฉลี่ยคือ 53.75 ตัน ตามรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าเสาที่ใช้แบบหล่อถาวรรับกำลังได้มากกว่าเสาหล่อปกติไม่ใช้แบบหล่อถาวร ขนาด 17x17 ซม. เท่ากับ 9.77 ตัน

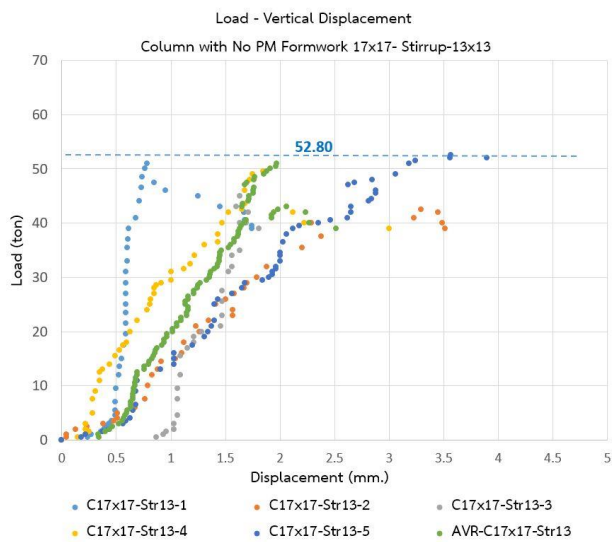


รูปที่ 11 ค่ากำลังอัดตามแนวแกนสูงสุดของกลุ่มทดสอบที่ 2

ค่าการยุบตัวเมื่อรับแรงกดตามแนวแกน จะเห็นว่าเสา C21x21-Str13 มีการยุบตัวเฉลี่ยประมาณ 3.1 มม. ที่แรงกดสูงสุดเฉลี่ย 62.15 ตัน ตามรูปที่ 12 ขณะที่เสา C17x17-Str13 การยุบตัวเฉลี่ยที่ 1.96 มม. ที่แรงกดสูงสุดเฉลี่ย 52.80 ตัน ตามรูปที่ 13



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของการยุบตัวกับแรงกดตามแนวแกน C21x21-Str13

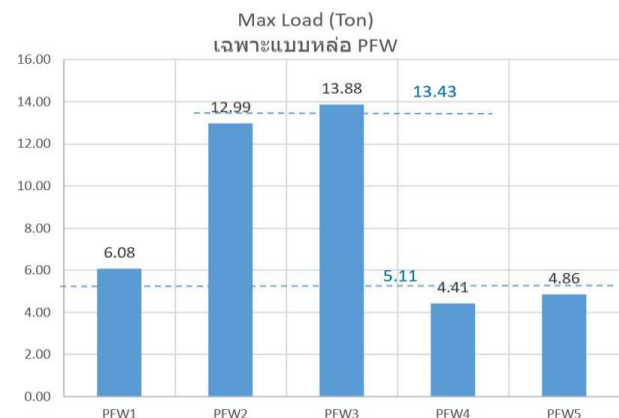


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของการยุบตัวกับแรงกดตามแนวแกน C17x17-Str13

3.3 กลุ่มที่ 3 ทดสอบกำลังอัดตามแนวแกนเฉพาะบล็อกแบบหล่อเสา PFW ผลการทดสอบกำลังอัดได้ค่า 6.08 ตัน, 12.99 ตัน, 13.88 ตัน, 4.41 ตัน, 4.86 ตัน เนื่องจากแบบเสาที่ได้รับ มีรอยร้าวอยู่ทั่วไป ส่วนใหญ่จะเป็นรอยร้าวตามแนวแกนเสา ซึ่งอาจเกิดจากการผลิตที่ไม่มีการบ่มคอนกรีต การกองเก็บและขั้นตอนการขนส่งตามรูปที่ 14 จึงแบ่งผลการทดสอบเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่สภาพบล็อกเสาที่สมบูรณ์ กำลังอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.43 ตันและกลุ่มที่สภาพไม่สมบูรณ์ กำลังอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 5.11 ตัน ตามรูปที่ 15 ผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ทำแบบหล่อถาวร โดยการเก็บลูกปูนหน้าไม่บ่ม 28 วัน ตามตารางที่ 4



รูปที่ 14 สภาพความสมบูรณ์ของแบบหล่อ กลุ่มทดสอบที่ 3



รูปที่ 15 ค่ากำลังอัดตามแนวแกนสูงสุดเฉพาะแบบหล่อเสา กลุ่มทดสอบที่ 3

ตารางที่ 4 ค่ากำลังอัดของลูกปูนคอนกรีตหน้าไม่บ่มแบบหล่อถาวร

ลูกปูน รูปทรงกระบอก	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2	ลูกที่ 3	ลูกที่ 4	เฉลี่ย
กำลังอัด กก.ต่อตร.ซม.	188	189	195	196	192

4.สรุปผลการทดสอบ

4.1 สรุปผลเปรียบเทียบกลุ่มที่ 1 เสาที่ใช้และไม่ใช้แบบหล่อถาวร ใส่เหล็กปลอกขนาด 15x15 ซม. C21x21-Str15 เทียบกับ C20x20-Str15 จากผลการทดสอบจะเห็นว่า เสาที่ใช้แบบหล่อถาวร ทดสอบกำลังอัดได้น้อยกว่าเสาที่หล่อปกติแล้วถอดแบบออกอย่างชัดเจน เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังอัดตามแนวแกน ระหว่าง C21x21-Str15 เทียบกับ C20x20-Str15 คือ 52.80 ตันกับ 62.15 ตัน น้อยกว่าถึง 9.35 ตัน สรุปได้ว่ากำลังอัดต่ำกว่าเสาปกติ 15 % ซึ่งเป็นผลมาจากเนื้อคอนกรีตที่ใช้เป็นแบบหล่อหน้าด้านละ 2 ซม.นั้นมียาลูกปูนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หล่อเนื้อในเสา ซึ่งแบบหล่อคอนกรีตดังกล่าวหลังจากหล่อแล้วถอดแบบเพียง 1 วันแล้วไม่มีการบ่มคอนกรีตเหมือนลูกปูนทดสอบ คาดว่ากำลังอัดคอนกรีตของแบบหล่อถาวรจะน้อยกว่ากำลังอัดเฉลี่ยคือ 192 กก.ต่อตร.ซม.ของค่าลูกปูนทดสอบจากหน้าไม้

4.2 สรุปผลเปรียบเทียบกลุ่มที่ 2 เสาที่ใช้และไม่ใช้แบบหล่อถาวร ใส่เหล็กปลอกขนาด 13x13 ซม. C21x21-Str13 เทียบกับ C17x17-Str13

ผลการทดสอบกำลังอัดของเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str13 เฉลี่ยคือ 63.52 ตันและเสาที่ไม่ใช่แบบหล่อถาวร C17x17-Str13 เฉลี่ยคือ 53.75 ตัน กำลังอัดเฉลี่ยต่างกัน 9.77 ตัน หากพิจารณาความสมบูรณ์ของแบบบล็อกเสา PFW กลุ่มที่ 3 เฉพาะกลุ่มบล็อกแบบเสาที่สมบูรณ์ จะพบว่าค่าเฉลี่ยของเสา C17x17-Str13 รวมกับค่ากำลังอัดเฉลี่ยของบล็อกแบบหล่อเสาที่สมบูรณ์ คือ $53.75 + 13.43 = 67.18$ ตัน ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของ C21x21-Str13-2 คือ 65.44 ตัน ส่วนกลุ่มบล็อกแบบหล่อเสาที่ไม่สมบูรณ์ ไม่อาจเปรียบเทียบผลกันได้ สรุปได้ว่ากำลังอัดของ C21x21-Str13 เท่ากับ C17x17-Str13 บวกกับกำลังอัดเฉพาะแบบบล็อกเสา PFW นั้นเอง

4.3 สรุปผลกำลังอัดกลุ่มที่ 3 เฉพาะบล็อก PFW

ผลทดสอบกำลังอัดเฉพาะแบบบล็อกเสา PFW ค่าเฉลี่ยของกลุ่มเสาที่สมบูรณ์เท่ากับ 13.43 ตัน ขณะที่ค่าเฉลี่ยของกลุ่มเสาที่ไม่สมบูรณ์กับ 5.11 ตัน แสดงให้เห็นว่าแบบบล็อกเสาที่ไม่สมบูรณ์มีผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมาก แบบเสาถาวรมีเนื้อคอนกรีตหนาบางไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากขั้นตอนการผลิต รวมทั้งอาจมีรอยร้าวอยู่ก่อน เกิดจากการกองเก็บจนถึงขั้นตอนการขนส่ง ตามรูปที่ 16



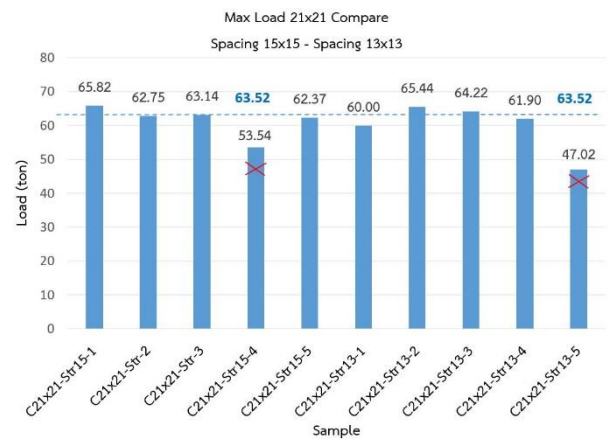
รูปที่ 16 สภาพบล็อกแบบหล่อเสา รอยร้าว ความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ

5. วิจัยารณผล ข้อเสนอแนะ

5.1 การรับกำลังอัดและค่ายุบตัวตามแนวแกน เมื่อใช้แบบหล่อยึดติดถาวร

เมื่อพิจารณาเสาที่ใช้แบบหล่อยึดติดถาวรทั้งที่ใช้เหล็กปลอกขนาดต่างกัน 2 แบบ คือ 15x15 ซม. และ 13x13 ซม. จะเห็นว่าค่าการยุบตัวตามรูปที่ 9 และรูปที่ 12 เท่ากับ 3.90, 4.0 มม. ตามลำดับ รวมทั้งค่ากำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยเท่ากัน ตามรูปที่ 17 สรุปได้ว่าขนาดเหล็กปลอกไม่เท่ากัน ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดและการยุบตัวตามแนวแกน

ข้อสังเกตการยุบตัวกับแรงกดตามแนวแกนระหว่างเสาที่ใช้แบบหล่อยึดติดถาวร C21x21-Str13 ค่ายุบตัว 3.1 มม. ตามรูปที่ 12 เปรียบเทียบกับเสา C17x17-Str13 ค่ายุบตัว 1.96 มม. ตามรูปที่ 13 จะเห็นว่าเสาที่ใช้แบบหล่อยึดติดถาวรสามารถรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นและมีค่ายุบตัวสุดท้ายก่อนวิบัติมากกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเสามีความเหนียวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 17 กำลังอัดสูงสุดเมื่อใช้แบบยึดติดถาวร เปรียบเทียบเมื่อเหล็กปลอกขนาด 15x15 ซม. กับขนาด 13x13 ซม.

5.2 ผลการยึดตัวของเหล็กปลอก

กลุ่มที่ 1 เปรียบเทียบการยึดตัวของเหล็กปลอกเสริมในเสา RB6 ขนาด 15x15 ซม. การยึดตัวของเหล็กปลอก RB6 ที่จุดวิบัติอยู่ที่ 200 um/m น้อยกว่าเหล็กปลอก 4.0 มม. ที่เสริมอยู่ในแบบยึดติดถาวร โดยมีค่ายึดตัวที่จุดวิบัติตั้งแต่ 200 – 1400 um/m. ตามรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังอัดคอนกรีตของหน้าตัดเสา C200x200-Str15 มีมากกว่าบทบาทของเหล็กปลอกจึงทำงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่ใช้แบบหล่อถาวร C21x21-Str15

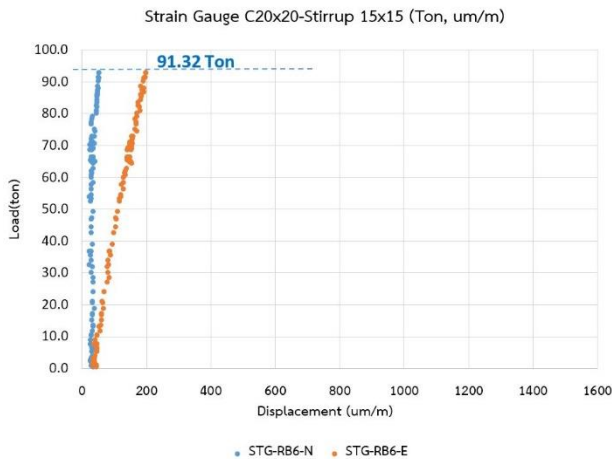
กลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบการยึดตัวของเหล็กปลอกเสริมในเสา RB6 ขนาด 13x13 ซม. เทียบกับเหล็กปลอกที่เสริมอยู่ในบล็อกแบบยึดติดถาวรขนาด 4.0 มม. ขนาด 19x19 ซม. พบว่าการยึดตัวของเหล็กปลอก 4.0 มม. ที่จุดวิบัติอยู่ที่ 300 - 1800 um/m มากกว่าเหล็ก RB6 คือ 200 um/m และรับกำลังเพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 20 และ 21 สรุปได้ว่าแบบยึดติดถาวร C21x21-Str13 สามารถรับกำลังอัดตามแนวแกนได้เท่ากับ C17x17 บวกกับความสามารถของบล็อกแบบ PFW และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับการยึดตัวมากขึ้นของเหล็กปลอกในแบบยึดติดถาวร ชี้ให้เห็นว่าแบบยึดติดถาวรทำให้เสามีความเหนียวเพิ่มขึ้น

5.3 ข้อสังเกตและข้อเสนอแนะ

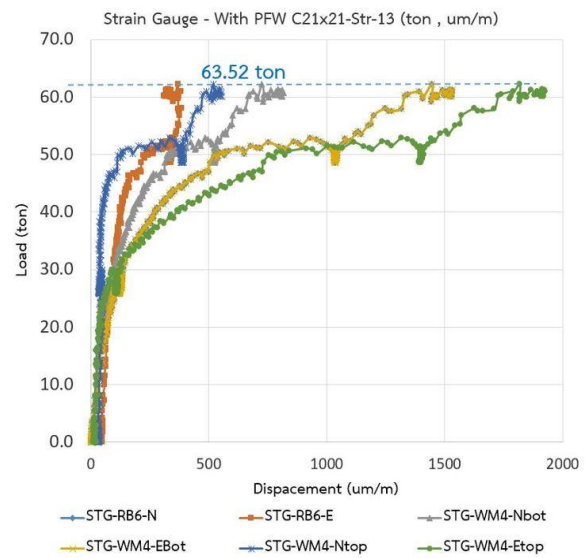
จากผลการทดสอบ แบบหล่อยึดติดถาวรที่ใช้วัสดุทำแบบหล่อแข็งแรงน้อยกว่าเนื้อคอนกรีตหล่อในเสา ควรเลือกใช้ขนาดภายในเสาไม่น้อยกว่าขนาดที่ได้จากการออกแบบคำนวณโดยถือว่าส่วนเปลือกแบบภายนอกเป็นเพียงส่วนเพิ่ม หากมีการปรับปรุงวัสดุทำแบบหล่อยึดติดถาวร ควรพิจารณาเรื่องวัสดุที่มีความแข็งแรงและมีความเหนียวมากกว่าเนื้อคอนกรีตหล่อในเสา เช่น เปลี่ยนกำลังคอนกรีต เสริมเหล็กปลอกถี่กว่าเดิม หรืออาจใช้วัสดุอื่นที่มีความแข็งแรงและมีความเหนียวมากกว่าวัสดุหล่อภายใน

แม้การทดสอบนี้ใช้แบบหล่อยึดติดถาวรจากโรงงานผู้ผลิตเดียวกัน แต่การทดสอบนี้ผลิตตามความสูง 68 ซม. มีการใส่เหล็กปลอกเพิ่มหัวท้ายที่ผู้ทดสอบขอให้ทางโรงงานทำขึ้นมาเป็นการเฉพาะเพื่อการทดสอบ ขั้นตอน

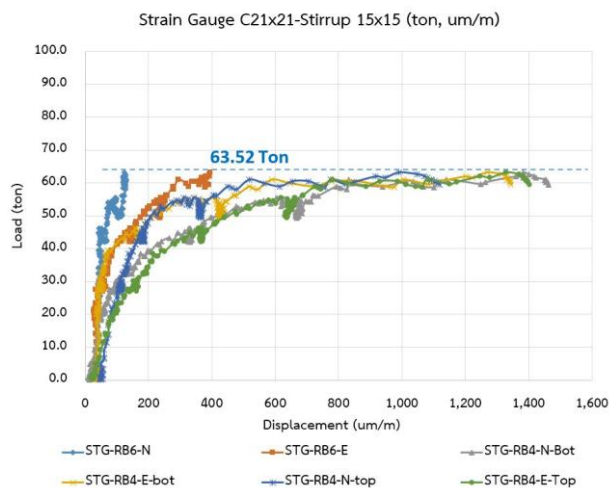
การผลิตและวิธีควบคุมคุณภาพอาจไม่ได้ตามมาตรฐานเดียวกับแบบหล่อ
ปกติที่ทำขาย



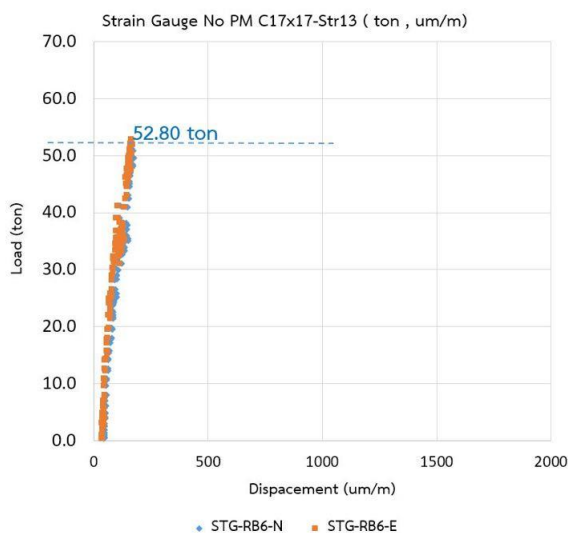
รูปที่ 18 ค่าการยึดตัวของเหล็กปลอก ในเสา C20x20-Str15



รูปที่ 21 ค่าการยึดตัวของเหล็กปลอก ในเสา C21x21-Str13



รูปที่ 19 ค่าการยึดตัวของเหล็กปลอก ในเสา C21x21-Str15



รูปที่ 20 ค่าการยึดตัวของเหล็กปลอก ในเสา C17x17-Str13

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท สิ้นทรัพย์ทวี08 จำกัด ผู้ให้ข้อมูลการผลิตและ
สนับสนุนตัวอย่างแบบหล่อยึดติดถาวร เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาทดสอบ
ครั้งนี้ และขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ผู้สอนวิชาวิศวกรรมโยธา
ให้กับข้าพเจ้าทั้งในอดีตและปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Benzaid and Mesbah.(2020). *Circular and Square Concrete Columns Externally Confined by CFRP Composite*. Intech, Chapter 6.
- [2] Zhang, Li and Xie. (2020). Experimental Investigation and Effective Strength Models model of composite confined concrete using steel jacket and pre stressed steel hoop. *Construction and Building Materials*, 256, 119399.
- [3] Faleschini, Zanini and Pellegrino. (2020). Experimental behavior of reinforced concrete columns confined with carbon-FRCM composites. *Construction and Building Materials*, 243, 118296.
- [4] ชุติพร อูยยืนยงค์ . (2011). การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยการโอบรัดก่อนด้วย ปลอกเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [5] Shichang Li and Shiping Yin. (2021). *Research on the mechanical Properties of assembled TRC permanent formwork composite column*. China University of Mining Technology, Xuzhou, China.

- [6] คณะอนุกรรมการมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงโดยวิธี
กำลัง วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2564). *มาตรฐานสำหรับ
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, หน้า 71-78.