

รหัสโครงการ SUT7-712-52-24-63



รายงานการวิจัย

**การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน
(Study on Mechanical Behaviors of Steel-Tubed Concrete
and Steel-Tubed Reinforced Concrete Columns
with Pre-confinement under Axially Compressive Loads)**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

**การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน
(Study on Mechanical Behaviors of Steel-Tubed Concrete
and Steel-Tubed Reinforced Concrete Columns
with Pre-confinement under Axially Compressive Loads)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552-53

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน (Study on Mechanical Behaviors of Steel-Tubed Concrete and Steel-Tubed Reinforced Concrete Columns with Pre-confinement under Axially Compressive Loads) ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโดยทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณ พ.ศ. 2552-2553 ซึ่งได้รับการจัดสรรมาจากงบประมาณแผ่นดินโดยผ่านการประเมินข้อเสนอโครงการจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างสูง นอกจากนั้นแล้ว ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนางสาวนันทิกา นามวิจิตร และนางสาวสุลพิพร อุษยีนยงค์ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และนายโสภณ ศรีสุนทร นายฉัตรทอง บุญชู และนางสาววรรณิกา บุญธรรม นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำตัวอย่างทดสอบและทดสอบอย่างขยันขันแข็งและอดทน สุดท้าย ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ของสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

หัวหน้าโครงการวิจัย

ตุลาคม 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1.) เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete และเสา Tubed RC ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน 2.) เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของมาตรฐาน ACI Committee 318 และ 3.) เพื่อเสนอสมการการออกแบบที่เหมาะสมของเสาดังกล่าว ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกำลังอัดประลัยคอนกรีต 3 ค่าคือ 18, 25 และ 32 MPa ความหนาของปลอกเหล็ก 3 ค่าคือ 3.2, 4.5 และ 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่อยู่ในช่วง $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ โดยตัวอย่างทดสอบมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดกลม

จากการศึกษาตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete พบว่า ตัวอย่างทดสอบมีกำลังอัดสูงสุดและความเหนียวสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กัตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรดังกล่าวข้างต้น Tubed concrete มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดเป็นแบบเชิงเส้นตรงถึง 50-80% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด (f'_{max}) จากนั้น จะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น โดยแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ (1) Strain hardening (2) Elastic-perfectly plastic และ (3) Strain softening และการวิบัติจะเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไปและเปลี่ยนรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ จากผลการทดสอบทำให้สรุปได้ว่า ตัวแปรที่เหมาะสมของ Tubed concrete หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสคือ ใช้ปลอกเหล็กหนา 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$ และของหน้าตัดกลมคือ ใช้ปลอกเหล็กหนา 4.5 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาเสา Tubed RC ต่อไป

จากการศึกษาเสา Tubed RC พบว่า เสาที่มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรงถึง 60-80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (P'_{max}) จากนั้น พฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้นตรง โดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic การวิบัติของเสา Tubed RC มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไปและมีความเหนียวสูงมากก่อนการวิบัติ โดยอัตราส่วนของกำลังรับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 (P'_{max} / P_{ACI}) มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน สมการออกแบบของ ACI Committee 318 จึงควรถูกปรับให้เหมาะสมอยู่ในรูป $P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30 A_s^{tube} f_y^{tube}$ ในกรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและ $P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.40 A_s^{tube} f_y^{tube}$ ในกรณีหน้าตัดกลม

Abstract

The objectives of this research work are to study the compressive behaviors and mode of failure of Tubed concrete specimens and Tubed RC columns, subjected to concentrically axial load, 2.) to compare the obtained test results with those calculated by using ACI Committee 318 composite column design equation and 3.) to propose appropriate design equations. The main variables used in this study were the ultimate compressive strengths of concrete, which are 18, 25 and 32 MPa, the thicknesses of steel jackets, which are 3.2, 4.5 and 6.0 mm, and the preconfining stresses, which are in the range of $0.05 f'_{co}$ to $0.1 f'_{co}$. The shapes of the cross-section of the specimens are square and circular.

From the study of the Tubed concrete specimens, it was found that the ultimate compressive strength and their ductility are increased significantly, compared to the reference concrete specimens. The compressive behavior of the specimens is linear up to 50 - 80% of their maximum compressive strength (f'_{max}). Beyond that, the nonlinear behavior with large deformation before failure is shown and can be classified into 3 types: (1) Strain hardening, (2) Elastic-perfectly plastic and (3) Strain softening. The failure is in the form of progressive mode of failure. It was also concluded that the square Tubed concrete specimens with 6.0 mm thick steel jacket and the preconfining stress of $0.1 f'_{co}$ and the circular Tubed concrete specimens with 4.5 mm thick steel jacket and the preconfining stress of $0.05 f'_{co}$ provide the optimum compressive behaviors and mode of failure for further study of the Tubed RC columns.

From the study of the Tubed RC columns, it was found that the compressive behavior of the specimen is linear up to 60-80% of their maximum compressive strength (P'_{max}) and, then, the nonlinear behaviors were observed and can be classified into 2 types: Strain hardening and Elastic-perfectly plastic. The specimens have significantly larger ductility and deformation before failure compared to the reference RC columns. Comparing the obtained compressive strengths with those predicted by the ACI design equation, the ratio of P'_{max} / P_{ACI} is less than 1.0. Therefore, it was proposed that the ACI design equation should be adjusted in the form of $P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30 A_s^{tube} f_y^{tube}$ in the case of the square Tubed RC columns and $P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.40 A_s^{tube} f_y^{tube}$ in the case of the circular RC columns.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 ปรัชญ่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	8
2.2 พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10
2.2.1 เสาคอนกรีตล้วน	10
2.2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10
2.2.3 เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน.....	12
2.3 ผลการโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต	18
2.3.1 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ	18
2.3.2 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง	21
2.4 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก	21
2.4.1 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัด โดยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม.....	22
2.4.2 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัด โดยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3	แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม..... 24
2.4.4	แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม..... 24
2.5	ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Tubed RC column 26
2.5.1	มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ส.ท.1008-38)และ มาตรฐานการออกแบบ Building Code requirements for Structural Concrete ของ American Concrete Institute (ACI318-05) and Commentary (ACI318R-05)..... 27
2.5.2	มาตรฐานการออกแบบ American Institute of Steel: Manual of Steel Construction: Load and Resistant Factor Design (AISC/LRFD)..... 28
2.6	กระบวนการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบ 30
3	วิธีการดำเนินการวิจัย..... 32
3.1	บทนำ..... 32
3.2	การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ..... 33
3.2.1	การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต 33
3.2.2	การทดสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก 39
3.2.3	การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต 41
3.2.4	การทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก 42
3.3	การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน 63
4	ผลการศึกษาและอภิปรายผล..... 80
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ..... 80
4.1.1	ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต 80
4.1.2	ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก 85
4.1.3	ผลการทดสอบแรงดึงเหล็กเสริมคอนกรีต 89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	92
4.2.1	พฤติกรรมกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน.....	92
4.2.2	การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	110
4.2.3	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	121
4.2.4	หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	125
4.2.5	ผลของหน่วยแรงโอบรัดก่อนต่อพฤติกรรมของคอนกรีต.....	134
4.3	ผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็กและให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	151
4.3.1	พฤติกรรมกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน.....	151
4.3.2	การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	158
4.3.3	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	162
4.3.4	หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column.....	166
4.3.5	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบตามมาตรฐาน AISC/LRFD.....	170
4.3.6	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ตามมาตรฐาน ACI Committee 318	172

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 สรุปผลงานวิจัย.....	182
5.1 สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย	182
5.1.1 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed Concrete specimens)	182
5.1.2 สรุปผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column)	184
5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน	186
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป.....	187
รายการอ้างอิง	189
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ในหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส	192
ภาคผนวก ข. กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ในหน้าตัดกลม.....	202
ภาคผนวก ค. การให้หน่วยแรง โอบรัดก่อน.....	211
ภาคผนวก ง. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	222
ประวัตินักวิจัย.....	263

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การเปรียบเทียบข้อกำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบ ของมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ	29
3.1 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง	47
3.3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ใช้ในงานวิจัย	52
3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมและคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้อง	53
3.5 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัย ...	67
3.6 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง	68
3.7 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลมที่ใช้ในงานวิจัย.....	71
3.8 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลม ที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง	72
4.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต.....	82
4.2 คุณสมบัติทางกลของตัวอย่างทดสอบเหล็ก.....	86
4.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วน B/t ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ.....	89
4.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม (RB6).....	90
4.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย (DB12).....	90
4.6 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	98
4.7 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดกลม ที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	107
4.8 เปรียบเทียบค่าแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	113
4.9 เปรียบเทียบค่าแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10	หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปลอกเหล็ก 127
4.11	การเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน กับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ 128
4.12	การเปรียบเทียบกำลังระหว่างตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนและตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 132
4.13	ผลการทดสอบหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 136
4.14	เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างราคาก่อสร้างต่อกำลังที่สภาวะใช้งาน ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 143
4.15	ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม 145
4.16	เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรง P'_{max} ของ Tubed RC column หน้าตัดกลม 161
4.17	กำลังแรงกดอัดสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุด ที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 167
4.18	สรุปผลการทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลม ที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 169
4.19	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่ากำลังรับแรง ตามมาตรฐาน AISC/LRFD ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 170
4.20	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับการทำนายกำลัง โดยใช้สมการออกแบบของ AISC/LRFD ของเสาหน้าตัดกลม 172
4.21	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่ากำลังรับแรง ตามมาตรฐาน ACI 318 ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 174
4.22	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่ากำลังรับแรง ตามมาตรฐาน ACI 318 ของเสาหน้าตัดกลม 175

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.23	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส กับการทำนายกำลังโดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee 318 และสมการออกแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 178
4.24	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column ของหน้าตัดกลม กับการทำนายกำลังโดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee 318 และสมการออกแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318..... 181
ค.1	คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว หมุดเกลียวและสตั๊ด..... 214
ค.2	เกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา 215
ค.3	สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับชั้นสลักเกลียวที่ค่า $0.05 f'_{co}$ 217
ค.4	สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับชั้นสลักเกลียวที่ค่า $0.1 f'_{co}$ 217
ค.5	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 218
ค.6	ตารางสรุปผล โมเมนต์บิดที่นำไปบิดสลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบ ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 220
ค.7	ตารางสรุปผล โมเมนต์บิดที่นำไปบิดสลักเกลียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 221

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 2
2.1	ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 9
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม 12
2.3	รูปแบบของเสาที่ปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต 14
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเครียด ของเสาที่ปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต..... 17
2.5	ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต..... 20
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตทรงกระบอก ที่ถูกโอบรัดและไม่ถูกโอบรัด 20
2.7	การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด 21
2.8	คอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาน้ำตัดรูปสี่เหลี่ยม 23
2.9	การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบ..... 31
3.1	กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย..... 33
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีต 35
3.3	ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน 38
3.4	การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัด..... 39
3.5	รายละเอียดแผ่นตัวอย่างทดสอบรูปกระดุกของปลอกเหล็ก 40
3.6	การติดตั้งตัวอย่างเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM 41
3.7	ลักษณะการให้แรงกระทำแก่เสาที่ปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต..... 43
3.8	LVDT capacity 100 mm..... 44
3.9	แสดงแบบรายละเอียดตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม 45
3.10	แสดงแบบรายละเอียดตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม..... 51
3.11	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัย 56
3.12	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กหน้าตัดกลมที่ใช้ในงานวิจัย..... 57
3.13	การหล่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีต 58
3.14	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กอัดแรงของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กอัดแรงของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดวงกลม 60
3.16	แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ..... 62
3.17	แบบจำลองการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ..... 62
3.18	รายละเอียดของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column 64
3.19	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส..... 66
3.20	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลม 70
3.21	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย 74
3.22	การหล่อตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column 74
3.23	รายละเอียดแบบปลอกเหล็กของ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ความหนา 6.0 mm และ ลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก 75
3.24	รายละเอียดแบบปลอกเหล็กของ Tubed RC column หน้าตัดกลม ที่ความหนา 6.0 mm และ ลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก 76
3.25	แผนภาพแสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column เพื่อทดสอบแรงกดอัด..... 78
3.26	ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column เพื่อทดสอบแรงกดอัด..... 79
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต..... 83
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 84
4.3	ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต 85
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก ความหนา 3.2 มิลลิเมตร..... 87
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก ความหนา 4.5 มิลลิเมตร..... 87
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก ความหนา 6.0 มิลลิเมตร..... 88
4.7	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็ก..... 88
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นกลม 91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นข้ออ้อย..... 91
4.10	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นกลม..... 92
4.11	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อย..... 92
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)..... 95
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)..... 96
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.1 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)..... 97
4.15	แผนภาพแสดงการหาค่าหน่วยแรงสูงสุดของ Tubed concrete specimen 101
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดกลมที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)..... 104
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดกลมที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)..... 105
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดกลมที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.08 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)..... 106
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของตัวอย่างทดสอบ SR18 - 3.2..... 111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางเกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ CS32-32-0 CS32-45-0 และ CS32-60-0..... 116
4.21	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง 121
4.22	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม 122
4.23	ตัวอย่างลักษณะหน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ความหนา 3.2 4.5 6.0 mm 123
4.24	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงกลุ่มที่ 1 124
4.25	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 124
4.26	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4..... 125
4.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strengthening ratio $f'_{max,conc} / f'_{max,conc, without\ pre\ confinement}$ และ Confinement ratio f'_1 / f'_{co} 129
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่าง ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนเทียบกับตัวอย่าง ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน และอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดก่อน ต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 133
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม 137
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 138
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 139
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส..... 140
4.34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม 149
4.35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม 149
4.36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม 150
4.37	ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส..... 154
4.38	แผนภาพแสดงการหาค่าแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column..... 155
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของ Tubed RC column หน้าตัดกลม 157
4.40	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา SRC18 - 6.0 158
4.41	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างทดสอบ CST25-0 และ CST25-005..... 160
4.42	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 162
4.43	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC columns หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 163
4.44	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง..... 165
4.45	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของ Tubed RC column 165
ก.1	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง..... 193
ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 3.2 193

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 4.5	194
ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 6.0	194
ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 3.2	195
ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 4.5	195
ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 6.0	196
ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 3.2	196
ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 4.5	197
ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก ที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 6.0	197
ก.13 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa	199

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.14	
ความสัมพัทธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa	199
ก.15	
ความสัมพัทธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa	200
ก.16	
ความสัมพัทธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa	200
ก.17	
ความสัมพัทธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa	201
ข.1	
ความสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2).....	203
ข.2	
ความสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3).....	204
ข.3	
ความสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.08 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4).....	205
ข.4	
ความสัมพัทธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของ Tubed RC column ด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	206
ข.5	
ความสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและแนวขวางของตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	207
ข.6	
ความสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและแนวขวางของตัวอย่างทดสอบ ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$	208

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและแนวขวางของตัวอย่างทดสอบ ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.08 f'_{co}$	209
ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด ในแนวแกนและแนวขวางของ Tubed RC Column	210
ค.1 Free-body diagram ของปลอกเหล็ก	218
ค.2 ภาพตัดของปลอกเหล็ก	219



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในประเทศไทย อาคารประเภทต่างๆ เช่น บ้าน ทาวเฮาส์ และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น มักจะถูกก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะเป็นการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place construction) ซึ่งมีข้อดีหลายประการคือ ประหยัด - เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีราคาที่ย่อมเยาขึ้นกว่าหาซื้อได้ง่าย และต้องการการดูแลรักษาน้อย ความเหมาะสมของวัสดุสำหรับงานสถาปัตยกรรมและโครงสร้าง - เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถทำให้เป็นรูปร่าง ลักษณะ และขนาดที่ต้องการได้ง่าย ความต้านทานต่อไฟไหม้ - คอนกรีตมีความต้านทานต่อไฟไหม้ได้ดี โดยไม่ต้องมีถูกพันทับด้วยฉนวนกันไฟ และความแข็งแรง (rigidity) - เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตมีมวลมากและความแข็งแรงสูง ดังนั้น การสั่น (vibration) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจึงมีน้อยกว่าในโครงสร้างเหล็ก อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องดำเนินการเป็นขั้นตอนตามลำดับคือ ติดตั้งแบบหล่อและค้ำยัน ผูกเหล็ก เทคอนกรีต และรอให้คอนกรีตแข็งตัวจนมีกำลังเพียงพอจึงทำการถอดแบบ ซึ่งการก่อสร้างลักษณะนี้มักจะใช้ระยะเวลาการก่อสร้างนานและทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างสูง โดยเฉพาะระหว่างขั้นตอนการเทคอนกรีตและถอดแบบหล่อคอนกรีต นอกจากนั้นแล้ว การก่อสร้างดังกล่าวจะต้องมีการจัดเตรียมไม้แบบเพื่อทำแบบหล่อและติดตั้งค้ำยัน ซึ่งมักจะต้องใช้แรงงานที่มีฝีมือค่อนข้างสูง ไม่เช่นนั้นแล้วจะเกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา เช่น แบบหล่อไม่ได้ขนาดตามที่กำหนดแบบรั่วทำให้คอนกรีตไหลออกในขณะเทคอนกรีต และแบบแตก เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เสียเงินและเสียเวลาในการดำเนินการเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องพลวัตทางด้านเศรษฐกิจในปัจจุบัน ซึ่งมีการแข่งขันกันในด้านฝีมือ ราคา และความรวดเร็วในการดำเนินการ ในทางอ้อม การใช้ไม้เป็นแบบหล่อคอนกรีตก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้ ซึ่งเป็นผลเสียต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย

เนื่องจากปัญหาในการก่อสร้างอาคารที่กล่าวข้างต้น จึงเกิดการพัฒนารูปแบบการก่อสร้างแบบต่างๆ ขึ้นมา โดยเฉพาะการนำระบบการก่อสร้างสำเร็จรูป (prefabrication) มาช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง เช่น แผ่นพื้นสำเร็จรูป และคานสำเร็จรูป (กรรมและสิทธิชัย, 2548 และจักษดาและสิทธิชัย, 2548) เป็นต้น และการใช้แบบหล่อสำเร็จรูปที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งการใช้ชิ้นส่วน โครงสร้างสำเร็จเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและให้รับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้าง โดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าวออกจากโครงสร้าง เช่น การใช้ท่อเหล็ก (Johansson, 2000 และ 2001) หรือท่อซีเมนต์ใยหิน (ศรีณย์และสิทธิชัย, 2547) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา เป็นต้น

วัสดุที่ถูกนิยมนำมาใช้ในการเสริมกำลังมีหลายประเภท เช่น เหล็ก พลาสติกเสริมเส้นใยและเฟออร์โรซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แสดงการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้พลาสติกเสริมเส้นใยและเฟออร์โรซีเมนต์



(ก) พลาสติกเสริมเส้นใย



(ข) เฟออร์โรซีเมนต์

รูปที่ 1.1 การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยในปัจจุบัน เสาเชิงประกอบหรือเสาคอมโพสิต (composite column) เช่น เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก (steel-encased reinforced concrete column) ได้ถูกนำมาใช้ในงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก ดังปรากฏรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบในมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐานสำหรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design ของ American Institute of Steel Construction และ Recommendations for Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tubular Structures ของ Architectural Institute of Japan โดยมีข้อดีที่สำคัญคือ เสาเชิงประกอบดังกล่าวช่วยทำให้การก่อสร้างมีความสวยงามและรวดเร็ว โดยใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กเป็นแบบหล่อถาวรให้โครงสร้าง และปลอกเหล็กดังกล่าวยังร่วมกับแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็กในการรับแรงกระทำโดยอาศัย composite action ซึ่งเป็นผลทำให้เสาดังกล่าวมีกำลังรับแรงกดอัด (compressive strength) และความเหนียว (ductility) สูงกว่าเสาเหล็กรูปพรรณและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาก นอกจากนั้นแล้ว composite action ยังช่วยทำให้เสาดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากก่อนที่จะเกิดการวิบัติ และเหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหว (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992) ซึ่งพฤติกรรม composite action ดังกล่าวจะมี

ประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการใช้เป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคารต่างๆ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ในแถบภาคตะวันตกและภาคเหนือของประเทศไทย เช่น จังหวัดกาญจนบุรี ตาก เชียงใหม่ และแม่ฮ่องสอน ตลอดจนในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งในปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวได้ถูกพิจารณาเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวระดับปานกลางแล้ว ดังนั้น การศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรม composite action จึงมีประโยชน์ทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม โดยที่การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคารต่างๆ จะช่วยทำให้อาคารดังกล่าวมีความปลอดภัยต่อการกระทำของแรงแผ่นดินไหวมากขึ้น อีกทั้งจะช่วยลดความสูญเสียทางด้านชีวิตและทรัพย์สินที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากภัยแผ่นดินไหว นอกจากนี้ การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคารต่างๆ จะช่วยให้ไม่ต้องทำการรื้อถอนและสร้างอาคารขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจได้เป็นอย่างมาก

ในการใช้งานอีกรูปแบบหนึ่ง ท่อเหล็กและปลอกเหล็กข้างต้นยังได้ถูกนำมาเสริมกำลังแบบภายนอก (external strengthening) ให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่มีความบกพร่องทางด้านโครงสร้าง (structurally deficient) เช่น เกิดจากการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อม เป็นต้น หรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้ เช่น มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้งาน โครงสร้างที่ต้องรองรับแรงกระทำที่สูงขึ้น เป็นต้น วิธีการเสริมกำลังดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่มี composite action ระหว่างปลอกเหล็กและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และรูปแบบที่ไม่มี composite action โดยรูปแบบที่หนึ่งจะเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่ารูปแบบที่ 2 เนื่องจากข้อดีของ composite action ดังที่กล่าวข้างต้นจะช่วยทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังมีค่ากำลัง ความเหนียว และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูงขึ้นไปกว่าในรูปแบบที่ 2 การเสริมกำลังแบบภายนอกให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่มีความบกพร่องทางด้านโครงสร้างและที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์นั้นมีผลดีทางด้านเศรษฐกิจเช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น กล่าวคือ จะช่วยทำให้อาคารเดิมสามารถใช้งานได้ต่อไป โดยสามารถถูกออกแบบเสริมกำลังให้เป็นไปตามข้อบังคับของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (ดูรายละเอียดสำหรับอาคารที่จะต้องถูกตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรงของอาคารได้ที่ <http://www.inspector-engineering.com/building-inspector-standard-engineering.asp>) ได้ ทำให้ไม่ต้องทำการรื้อถอนและสร้างอาคารขึ้นมาใหม่

โดยสรุปแล้ว การใช้ปลอกเหล็กในการห่อหุ้มเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอก ดังที่กล่าวข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในการก่อสร้างโครงสร้างใหม่และปรับปรุง/ซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งก่อให้เกิดผลดีทั้งทางด้านสังคมและเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตามจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องและมาตรฐานการออกแบบของ ว.ศ.ท. 1008-38 พบว่า สมการ

ออกแบบของ ว.ส.ท. ก็ไม่ได้พิจารณาถึง composite action โดยข้อกำหนดที่ 4314 กำหนดให้ออกแบบเสาเชิงประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งการไม่ได้พิจารณาถึง composite action ของมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 นั้นน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากความไม่แน่นอนในการพัฒนา composite action ที่เกิดขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยความแกร่งและความหนาของปลอกเหล็กเป็นหลัก ตลอดจนมาตรฐานการควบคุมการก่อสร้างในประเทศไทยยังไม่สมบูรณ์มากนัก ตลอดจนวิศวกรไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรม composite action จึงเป็นสาเหตุของความไม่แน่นอนมากขึ้น ดังนั้น การไม่พิจารณาถึง composite action จึงน่าเป็นสิ่งที่เหมาะสม แต่จะทำให้ขาดประสิทธิภาพในการใช้อาคารดังกล่าวและก่อให้เกิดความสับสนเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจ ดังนั้น เพื่อก่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรม composite action ที่มากขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการให้หน่วยแรงโอบรัดแก่คอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการให้ pre-confinement แก่คอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยจะทำการพัฒนาระบบการให้ pre-confinement แก่คอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ง่ายและสามารถปฏิบัติได้ในสนามและทำการทดสอบ เพื่อช่วยให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการวิบัติของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (pre-confinement) แก่คอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket)
2. เพื่อศึกษาถึงผลของ pre-confinement ที่มีต่อกำลัง (strength) และความเหนียว (ductility) ของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และได้ข้อมูลของความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อน โดยอาศัยข้อมูลของความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมที่ได้จากวัตถุประสงค์ข้อที่ 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยเป็นการศึกษาถึงการพัฒนาการพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้แบบปลอกเหล็ก (Steel jacket) มุ่งเน้นในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างเพื่อปรับปรุง/ซ่อมแซมสำหรับอาคารที่มีความบกพร่องทางด้านโครงสร้างและองค์อาคารที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์โดยขั้นตอนในการศึกษาแบ่ง

ออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (2) การทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและ (3) การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยมีกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนซึ่งมีค่าอย่างน้อย 300 kN และไม่เกิน 1800 kN เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในลักษณะข้างต้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate compressive strength of concrete) รวมถึงหน่วยแรงคราก (Yielding stress) และ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ของเหล็ก ลักษณะวิธีการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา อัตราส่วนของความกว้างของปลอกเหล็กต่อความหนาของปลอกเหล็ก (B/t) อัตราส่วนความสูงของเสาต่อความกว้างของหน้าตัดเสา (L/B) รวมทั้งอัตราส่วนกำลังคอนกรีตต่อกำลังของเหล็กและรูปร่างหน้าตัดของปลอกเหล็ก (Huang et al., 2002) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดขอบเขตของงานวิจัยโดยมีรายละเอียดของดังนี้

1) ตัวแปรหลักที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยมีทั้งสิ้น 3 ตัวแปรคือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate compressive strength of concrete) ความหนาของปลอกเหล็ก (Thickness of steel jacket) การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement)

2) การทดสอบคุณสมบัติทางกล และพฤติกรรมทางกลของวัสดุที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต (อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C469) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็กและเหล็กเสริมคอนกรีต (อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8)

3) คอนกรีตที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready - mixed concrete) โดยใช้กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18 25 32 MPa ซึ่งคอนกรีตดังกล่าวมีขายในเชิงพาณิชย์และมักถูกใช้ในการก่อสร้างอาคารในประเทศไทย

4) กำหนดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบโดยที่ถูกรองรับโดยแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (Bearing plate) ซึ่งสามารถเทียบได้กับการกระทำของแรงกดอัดต่อเสาเชิงประกอบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 ข้อ 4314(ค)

5) ปลอกเหล็ก (Steel jacket) ที่ใช้ในงานวิจัยใช้เหล็กแผ่น โครงสร้างแบบเย็น (Cold - formed) ซึ่งเป็นเหล็กตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ที่มีความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 mm โดยมีค่า B/t ของเสาเชิงประกอบอยู่ในช่วง 26 ถึง 48 ซึ่งพบว่าเป็น

ที่นิยมใช้ในอาคารเตี้ยและสูงปานกลางโดยมีการใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา (Schneider, S.P., 1998) และมีอัตราส่วนของปริมาณปลอกเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสามากกว่า 4% ตามข้อกำหนดของ AISC LRFD

6) การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) จะได้มาจากระบบการให้แรงกระทำซึ่งประกอบด้วยนอตและแบบปลอกเหล็ก ซึ่งแกนคอนกรีตจะถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กก่อนจากนั้นจะถูกนำมาโอบรัดด้วยแบบปลอกเหล็กโดยใช้ใช้นอตยึดแบบปลอกเหล็กเข้าหากันเพื่อช่วยในการถ่ายแรงเข้าหากัน และทำการให้หน่วยแรงบิดต่อนอต ซึ่งทำให้แบบปลอกเหล็กส่งถ่ายแรงอัดกระทำต่อปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งแรงที่ใช้ดังกล่าวเป็นหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ใช้ในงานวิจัย

7) การทดสอบในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนแรก เป็นการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบที่เหมาะสมจะถูกนำไปศึกษาต่อ ในส่วนที่สอง เป็นการทดสอบตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 การทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

- ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 150x150 mm ความสูง 300 mm โดยใช้ปลอกเหล็กที่มีความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$
- ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ความสูง 300 mm โดยใช้ปลอกเหล็กที่มีความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$

ส่วนที่ 2 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

- ตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาด 150 x 150 mm ความสูง 750 mm โดยใช้ปลอกเหล็กที่มีความหนา 6.0 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$
- ตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ความสูง 750 mm โดยใช้ปลอกเหล็กที่มีความหนา 4.5 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$

โดยในความสูงดังกล่าวพบว่ามีความ L/B เท่ากับ 5.0 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมมักใช้การก่อสร้างอาคารเตี้ยและสูงปานกลางใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมักอยู่ในช่วง 5 ถึง 9 (Schneider, S.P., 1998) และถูกจำกัดโดยความสูงของเครื่องมือทดสอบ อีกทั้งเสาตัวอย่างทดสอบทั้งหมดไม่มีระบบที่ใช้ในการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็ก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยนี้เป็นการสร้างองค์ความรู้โดยการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบการให้แรงโอบรัดก่อน (preconfinement) แก่เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) เพื่อให้ได้รูปแบบการก่อสร้างที่ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งยังช่วยประหยัดเวลาและปลอกเหล็กที่นำมาใช้ยังช่วยเป็นไม้แบบที่ใช้ในการก่อสร้างและยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมไปอีกทางหนึ่งด้วย และศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลัง ความเหนียว และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อนำเสนอสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาค่ากำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยสามารถนำไปใช้ในการเสริมกำลัง (strengthening) ให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่มีความบกพร่องทางด้านโครงสร้าง (structurally deficient) เช่น เกิดจากการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อม เป็นต้น หรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้ เช่น มีการเปลี่ยนสภาพการใช้งานโครงสร้างที่ต้องรองรับแรงกระทำที่สูงขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว องค์ความรู้ที่ได้ยังสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคารต่าง ๆ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ในแถบภาคตะวันตกและภาคเหนือของประเทศไทย เช่น จังหวัดกาญจนบุรี ตาก เชียงใหม่ และแม่ฮ่องสอน ตลอดจนในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งจะส่งผลดีทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม

โดยหน่วยงานหรือผู้ที่จะนำผลงานการวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้แก่

- 1 ประชาชนทั่วไปที่ต้องการเสริมกำลัง/ซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2 เอกชนที่ทำธุรกิจเกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง/ซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3 หน่วยงานของรัฐที่รับผิดชอบด้านงานก่อสร้าง/ซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
เช่น กรมโยธาธิการและผังเมือง การเคหะแห่งชาติ เทศบาลและ อบต. ต่าง ๆ เป็นต้น

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกล่าวถึงพฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมทั้งนำเสนอถึงพฤติกรรมและ กำลัง ของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-filled steel tube column) ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน นอกจากนี้ได้กล่าวถึงผลของการโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเสาดังกล่าว

2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อยู่ในแนวตั้งทำหน้าที่รับแรงกดอัดหรือทั้งแรงกดอัดและแรงดัดร่วมกัน ซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นในชั้นต่าง ๆ แล้วถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดต้นหนึ่งวิบัติจะทำให้ส่วนของโครงสร้างที่ยึดติดต่อเนื่องกันมานั้นเกิดการชำรุดเสียหายจนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดนั้นถึงกับพังลงมาได้ดังนั้นในการคำนวณออกแบบจึงต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเกี่ยวกับแรงกดอัดและโมเมนต์ดัดที่เสาต้องรองรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจมีรูปหน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมี 2 ลักษณะคือ เสาสั้นและเสายาว เสาสั้น (Short column) หมายถึงเสาที่มีอัตราส่วนของความชะลูด (Slenderness ratio) มีค่าน้อยไม่เกินพิกัดที่จะทำให้เสานั้นเกิดวิบัติโดยการโก่งเดาะทางด้านข้างมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดว่าเสาสั้นต้องมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของเสาต่อด้านแคบของเสารูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสารูปหน้าตัดกลมมีค่าไม่เกินกว่า 15 ($L/D \leq 15$) กำลังรับแรงกดอัดของเสาสั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุที่ใช้และขนาดรูปตัดของเสาส่วนเสายาว (Slender column) หมายถึงเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมาก ($L/D > 15$) ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงกดอัดของเสายาวจะน้อยกว่าเสาสั้นที่มีขนาดรูปตัดอย่างเดียวกัน เพราะเสายาวเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างก่อนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับน้ำหนักตามแนวแกน (Axially loaded column) ซึ่งมีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

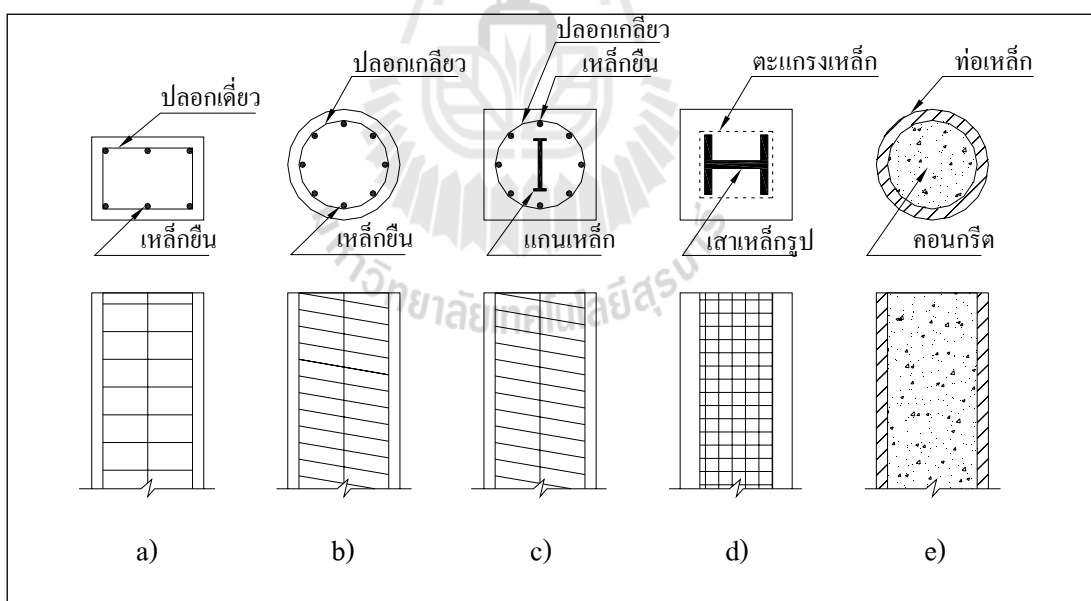
(ก) เสาปลอกเดี่ยว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่น โดยมีปลอกรัดเป็นวง ๆ ซึ่งเหล็กปลอกที่รัดอาจจะเป็นวงเดียวหรือหลายวง ลักษณะของเหล็กปลอกควรจะงอฉากให้เกี่ยวยึดเหล็กยื่นดีพอสมควรเพื่อป้องกันเหล็กยื่นไม่ให้โก่งงอ นิยมใช้กับอาคารทั่ว ๆ ไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a)

(จ) เสอปลอกเกลียว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นมีปลอกเป็นเกลียวรัดต่อเนื่อง ซึ่งรับแรงได้ดีกว่าเสอปลอกเดี่ยวประมาณ 15% มักใช้ในเสากลมหรือเสาหลายเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b)

(ค) เสอปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็กเหมือนเสอปลอกเกลียวแต่แกนกลางจะมีเหล็กเสริมในแนวแกนซึ่งอาจมีหน้าตัด I หรือ H ตามความเหมาะสม พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเมื่อเทียบกับหน้าตัดเสาแล้วจะไม่ใหญ่นักเสาชนิดนี้นิยมใช้ในกรณีมีแป้นหูช้าง หรือต้องการลดขนาดของเสาองให้พอเหมาะกะับวัตถุประสงค์ทางสถาปัตยกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.1(c)

(ง) เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตคล้ายกับเสอปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็กแต่เหล็กที่เป็นแกนนิยมใช้เหล็กแผ่นหนา ๆ มาตัดเชื่อมหรือย้ำหมุดขึ้นรูปเป็นหน้าตัด H ขนาดใหญ่ หุ้มด้วยตะแกรงเหล็กเบอร์ 10 AS&W Gage และมีคอนกรีตกำลังสูงหุ้มไม่น้อยกว่า 6 cm ซึ่งเสาลักษณะนี้นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการขนาดเสาเล็กแต่รับน้ำหนักมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1(d)

เสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก มีลักษณะเสาที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่น ค้ำยันชายคาปลายล่างที่ฝังในคอนกรีตพื้นหรือฐานรากต้องมีแผ่นเหล็กหนา 3/8" หรือประมาณ 10 mm เชื่อมติดสำหรับกระจายน้ำหนักพื้นที่แผ่นเหล็กให้คำนวณแผ่นน้ำหนักให้พอเหมาะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1(e)



รูปที่ 2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2 พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีต

และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2.1 เสาคอนกรีต

เสาคอนกรีตล้วนไม่มีการเสริมเหล็ก จะมีพฤติกรรมในการรับหน่วยแรงกดอัดเป็นแบบวัสดุเปราะ ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและค่าความเครียดในแนวแกนพบว่าในช่วงแรกของเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งหน่วยแรงมีค่าประมาณ 50% ของหน่วยแรงสูงสุดของคอนกรีต หลังจากนั้น ค่าความชันจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากเกิดการแตกร้าวของเสาคอนกรีต เมื่อเสาคอนกรีตรับหน่วยแรงกดอัดจนถึงค่าสูงสุดแล้ว ค่าความชันจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าความชันเป็นศูนย์ หลังจากนั้นคอนกรีตจะเริ่มรับหน่วยแรงกดอัดได้น้อยลง และรอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนเสาคอนกรีตเกิดการวิบัติ ซึ่งการวิบัติจะเกิดการแตกออกตามแนวยาว (Splitting) หรือเป็นแบบแนวเฉียงในแนวระนาบเอียงโดยหน่วยแรงกดอัดของเสาคอนกรีตมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.85 เท่าของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต สามารถหาค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีต ดังแสดงในสมการ 2.1

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตล้วน มีหลายปัจจัย เช่น ขนาดและรูปร่างของเสา คุณภาพของคอนกรีต อัตราการให้แรงกระทำแก่เสา ความชะลูดของเสา เป็นต้น

$$P = 0.85 f'_{co} A_c \quad (2.1)$$

โดยที่ f'_{co} คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต

2.2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

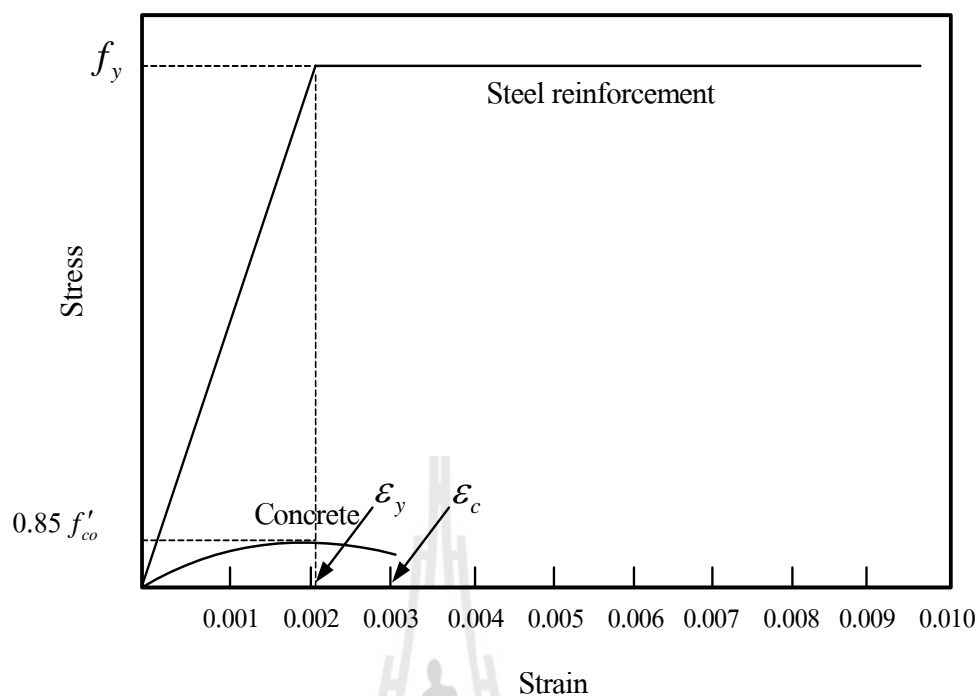
เมื่อเสาคอนกรีตล้วนถูกเสริมเหล็กเสริมในแนวแกน แต่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก (Stirrup) เพื่อป้องกันแรงเฉือน เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอกดังกล่าวจะมีพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติคล้ายกับเสาคอนกรีตล้วน เนื่องจากเมื่อเสาคอนกรีตรับแรงกระทำเหล็กเสริมในแนวแกนจะถูกกดอัดและเกิดการโก่งเดาะ ทำให้เนื้อคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจากเหล็กเสริมในแนวแกน แต่เมื่อมีการเสริมเหล็กปลอกทั้งเหล็กปลอกเดี่ยวยหรือเหล็กปลอกเกลียวแก่เสา คอนกรีต จะทำให้แกนคอนกรีตถูกโอบรัดจากเหล็กปลอกมีผลทำให้เสาดังกล่าวสามารถรับแรงกดอัดได้สูงขึ้นและมีพฤติกรรมแบบเหนียวมากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ

สำหรับการวิเคราะห์หาหน่วยแรงกอดอัดในแนวแกนของเสาต้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกอดอัดและค่าความเครียดในแนวแกนของคอนกรีตและเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กำหนดให้หน่วยแรงกอดอัดสูงของคอนกรีตมีค่า $0.85 f'_{co}$ มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.002 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร (ACI Committee 318-05) และให้คอนกรีตมีค่าความเครียดสูงสุดก่อนการวิบัติเท่ากับ 0.003 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร และกำลังรับแรงกอดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเท่ากับ ผลรวมของกำลังรับแรงกอดอัดที่ได้จากคอนกรีตและเหล็กเสริมหลัก เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ในรูป 2.1 แล้ว พบว่าหน่วยแรงครากของเหล็กเสริมมีค่าประมาณ 300-400 MPa และมีค่าความเครียดที่จุดครากเท่ากับ 0.002-0.003 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งเหล็กเสริมจะเกิดการครากก่อนที่คอนกรีตจะถึงหน่วยแรงกอดอัดสูงสุด ดังนั้นก่อนที่คอนกรีตจะเกิดการกอดอัดแตก หน่วยแรงกอดอัดของคอนกรีตจะถูกสมมุติให้มีค่า $0.85 f'_{co}$ และหน่วยแรงกอดอัดของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (Yielding Stress, f_y) ดังแสดงในสมการ 2.2

$$P = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + f_y A_s \quad (2.2)$$

โดยที่ f'_{co} คือ กำลังรับแรงกอดอัดสูงสุดของคอนกรีต
 A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมในแนวแกน
 f_y คือ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมในแนวแกน

สำหรับมาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) หรือ American Concrete Institute (ACI Committee) มีข้อกำหนดในการออกแบบอาคารขนาดเล็กในประเทศไทยดังนี้ คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างมักถูกกำหนดให้มีกำลังรับแรงกอดอัดสูงสุด (f'_{co}) อยู่ในช่วง 18-25 MPa เหล็กเสริมในแนวแกนมักจะมีหน่วยแรงที่จุดคราก อยู่ในช่วง 300-400 MPa เ้ามักมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลมขนาด 0.15-0.25 เมตร และมีความสูง 2.20-2.80 เมตร มีพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในแนวแกน (A_s) มีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.08 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา (A_g) เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีเหล็กปลอกยึดเหล็กเสริมในแนวแกน เพื่อป้องกันการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมในแนวแกน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอย่างน้อย 6 มิลลิเมตรและมีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกตามที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบ



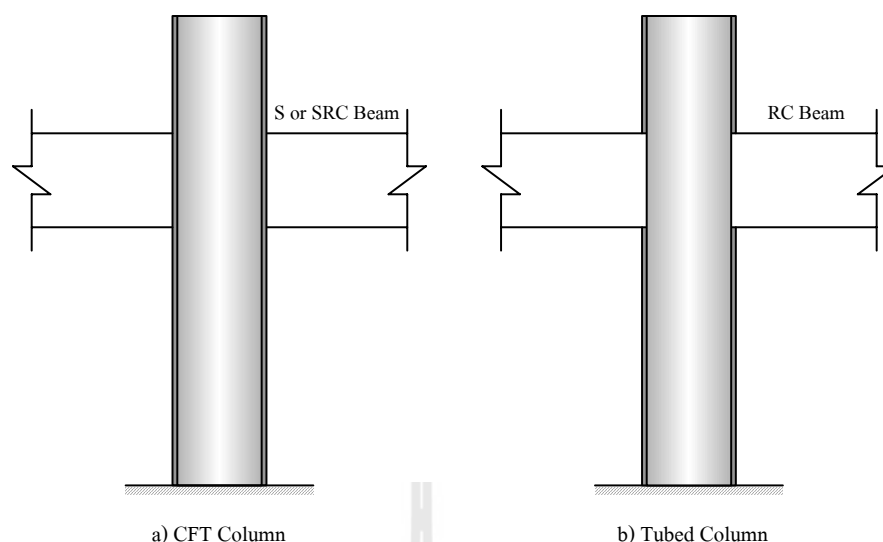
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม
(วินิต ช่อวิเชียร, 2540)

2.2.3 เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-filled tube column, CFT column) เป็นเสาเชิงประกอบชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กกลวงหน้าตัดกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและเทคอนกรีตลงในช่องว่าง โดยคอนกรีตทำหน้าที่เป็นแกนของเสา ปลอกเหล็กที่โอบรัดเสาได้ถูกออกแบบให้ทำงาน ร่วมกับคอนกรีตเพื่อให้เกิด Composite action ด้วยปลอกเหล็กอาจจะถูกออกแบบให้รับแรงกระทำร่วมกันกับคอนกรีตใน 3 ลักษณะ ดังนี้ (1) ปลอกเหล็กถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงกระทำในแนวแกน (Axial load) อันเป็นผลมาจากแรงกดอัดในแนวแกนและ โมเมนต์คด (2) ปลอกเหล็กถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงตามขวาง (Transverse shear) อันเป็นผลมาจากแรงเฉือน (3) ปลอกเหล็กถูกออกแบบให้รองรับแรงดันเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ซึ่งทำให้เกิดการ โอบรัดต่อแกนคอนกรีต (Confining) นอกเหนือจากนั้นแกนคอนกรีตยังสามารถช่วยปลอกเหล็กในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วน และยังสามารถต้านทานการเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่ของผนังปลอกเหล็กได้เพิ่มมากขึ้น (Local buckling)

จากผลของ Composite action ระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง หลายประการดัง เช่น ด้านความแกร่ง ด้านกำลัง ด้านความเหนียว และด้านการดูดซึมพลังงาน และเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต ยังมีความประหยัดมากกว่าเสาโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากใช้ปริมาณเหล็กลดลง และปลอกเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยันซึ่งทำให้การดำเนินงานในการก่อสร้างง่ายขึ้น และทำให้ราคาค่าก่อสร้างลดลง และช่วงหลายปีที่ผ่านมาเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตได้รับความนิยมไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา จีน และญี่ปุ่น (Xiao et al., 2005) และในสหรัฐอเมริกาได้นำ CFT Column ไปใช้ในอาคารขนาดใหญ่ และอาคารความสูงปานกลางโดยใช้อัตราส่วนระหว่างความกว้างของเสาคือความหนาปลอกเหล็กอยู่ในช่วง 26 ถึง 48 ($26 \leq B/t \leq 48$) และอัตราส่วนของความสูงของเสาคือความกว้างของเสาอยู่ในช่วง 5 ถึง 9 ($5 \leq L/B \leq 9$) (Schneider, 1998)

การจำแนกประเภทของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตในปัจจุบันสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ ตามการรองรับหน่วยแรงกระทำของปลอกเหล็กคือ (1) ปลอกเหล็กทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกนรองรับหน่วยแรงกระทำในแนวแกน (Longitudinal reinforcement) โดยเสาดังกล่าวจะถูกก่อสร้างอย่างต่อเนื่องโดยมีความสูงหลายชั้นหรือสูงตลอดความสูงของอาคารทั้งปลอกเหล็กและคอนกรีตจะรองรับแรงกระทำร่วมกัน และมักจะเรียกเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตในรูปแบบนี้ว่า CFT column (2) ปลอกเหล็กจะทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง (Transverse reinforcement) โดยมีรายละเอียดจุดเชื่อมต่อและการก่อสร้างมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยแกนคอนกรีตจะรองรับหน่วยแรงกระทำโดยตรงและมักเรียกเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตประเภทนี้ว่า Tubed column โดยรูปแบบการจำแนกประเภทของเสาดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต

- a) ประเภทที่ 1 CFT column
- b) ประเภทที่ 2 Tubed column

แนวคิดการศึกษาเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตประเภทแรกหรือเรียกว่า CFT Column มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาทั้งในด้านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Schneider, 1998); (Sakino, Nakahara, Morino, and Nishiyama, 2004); (Xiao, He, and Choi, 2005) และการศึกษาและวิเคราะห์โดยวิธี Finite element analysis (Schneider, 1998) พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสาประเภทดังกล่าวนี้ได้แก่ อัตราส่วนความกว้างของหน้าตัดเสาต่อความหนาของปลอกเหล็ก (B/t) อัตราส่วนของความสูงเสาต่อความกว้างเสา (L/B) อัตราส่วนของกำลังของคอนกรีตต่อกำลังของปลอกเหล็ก และรูปร่างหน้าตัดของเสา โดย CFT Column หน้าตัดกลมมีผลการโอบรัดของปลอกเหล็กต่อแกนคอนกรีตสูงกว่าเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยม เนื่องจากผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดกลมจะต้านทานความดันจากการขยายตัวทางด้านของแกนคอนกรีตเมื่อรองรับหน่วยแรงกระทำ โดยอาศัยกลไกของหน่วยแรงแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) แต่สำหรับผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะต้านทานแรงดันอันเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตโดยอาศัยความแกร่งต่อการคด (Flexural rigidity) ของผนังปลอกในรูปแบบของ Plate ซึ่งเมื่อปลอกเหล็กถูกแรงกระทำโดยแรงกดอัดและแรงตามขวางพร้อมกัน ทำให้ปลอกเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ได้ง่าย (Local buckling)

ในการออกแบบ CFT Column ในปัจจุบันได้มีมาตรฐานการออกแบบหลายมาตรฐาน ดังเช่น (1) มาตรฐานการออกแบบสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี 2538 (2) มาตรฐานการออกแบบของ

American Institute of Steel Construction: Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (AISC/LRFD) (3) มาตรฐานการออกแบบของ American Concrete Institute Construction: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-05) and Commentary (ACI318R-05) เป็นต้น

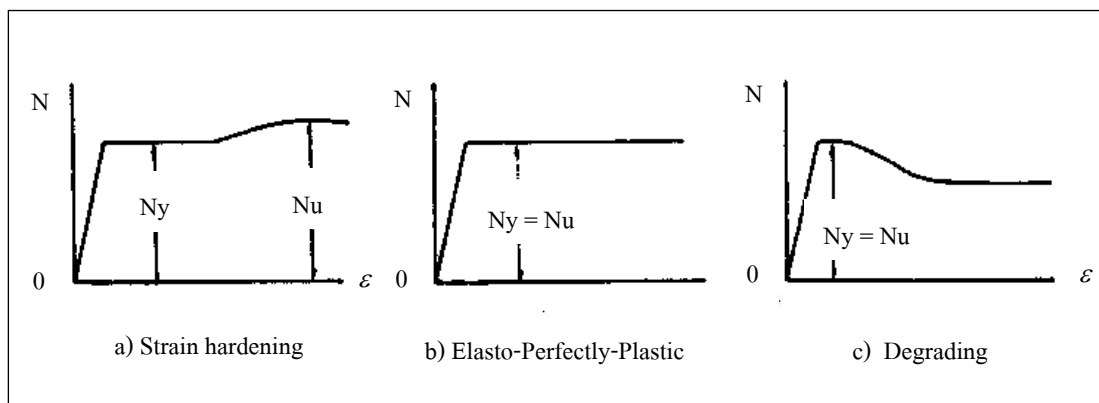
เมื่อพิจารณาปัจจัยเกี่ยวกับ รูปร่างและขนาดของปลอกเหล็กและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีผลต่อกำลังรับแรงกดอัด ได้ทดสอบเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตสั้นภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน จำนวน 270 ตัวอย่าง โดยเสาดังกล่าวมีหน้าตัดกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า และมีอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) น้อยกว่า 36 ซึ่งปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบถูกอบอ่อนซึ่งทำให้เหล็กมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Annealing) เพื่อศึกษาถึงผลของ Strain hardening ที่มีผลต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาดังกล่าว จากการศึกษพบว่า ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและค่าความเครียดในแนวแกน ขึ้นกับรูปร่างของหน้าตัดเสา อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาคือความหนาปลอกเหล็ก และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยที่พฤติกรรมการรับแรงกดอัดสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ ดังนี้ (1) Strain hardening (2) Elastic-perfectly plastic และ (3) Degrading โดยที่พฤติกรรมในรูปแบบ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic มักเกิดขึ้นใน CFT Column ที่มีหน้าตัดกลมและหน้าตัดแปดเหลี่ยม สำหรับ CFT Column ที่มีพฤติกรรมแบบ Degrading มักเกิดขึ้นกับเสาที่มีหน้าตัดกลมและหน้าตัดแปดเหลี่ยมบางส่วน (Tomii, Yoshimura, and Morishita, 1977) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

จากพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถจำแนกพฤติกรรมได้ 3 รูปแบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถอธิบายพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นในรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต ในรูปแบบ Strain hardening มีลักษณะสอดคล้องดังแสดงในรูปที่ 2.4a พบว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบเสาดังกล่าวรองรับแรงกระทำเพิ่มสูงขึ้น จนเกินค่ากำลังกดอัดสูงสุดของคอนกรีตแล้ว เสาทดสอบ จะมีความสามารถรองรับแรงกระทำได้สูงเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เสาทดสอบมีความสามารถ ในการรับแรงกดอัดสูงมากขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นในรูปแบบ Elastic-perfectly plastic และ Degrading เนื่องจากปลอกเหล็กที่โอบรัดแกนเสาคอนกรีตมีความแกร่งมากเป็นอย่างดี ที่สามารถต้านทานและจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของแกนคอนกรีตและพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นของเสาทดสอบนี้สามารถดูดซับพลังงานได้สูงมีความเหนียวและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงมาก ก่อนเกิดการวิบัติ จึงความปลอดภัยและเหมาะสมนำไปใช้งาน

2) จากรูปที่ 2.4b แสดงถึงพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นในรูปแบบของ Elasto-perfectly plastic ในงานวิจัยนี้ขออนุญาตนิยามพฤติกรรมดังกล่าวใหม่ว่า Elastic-perfectly plastic เมื่อเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต รับแรงกระทำในแนวแกนสูงเกินกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต หลังจากนั้นจะสามารถรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นได้เรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง แล้วเสาทดสอบดังกล่าวจะรองรับแรงกระทำได้คงที่อย่างต่อเนื่อง (ความชันของกราฟมีค่าเป็นศูนย์) เป็นผลเนื่องจาก ค่าความแกร่งของปลอกเหล็กที่นำมาโอบรัดแกนคอนกรีต มีความแกร่งเพียงพอ ที่สามารถต้านทานแรงกระทำและจำกัดแกนคอนกรีตที่ขยายตัวได้เพียงค่า ๆ หนึ่งจนกระทั่งเกิดการวิบัติ และพฤติกรรมในรูปแบบนี้มีความปลอดภัยและเหมาะสมในการนำไปใช้งานเช่นเดียวกับพฤติกรรมในรูปแบบ Strain hardening

3) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4c พบว่าเมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวรับแรงกระทำในแนวแกนถึงค่าสูงสุดแล้ว เสาทดสอบดังกล่าวจะไม่สามารถรองรับแรงกระทำต่อไปได้ ดังนั้นค่าความชันของกราฟจึงมีค่าลดลง เนื่องจากความแกร่งของท่อปลอกเหล็กมีความแกร่งไม่เพียงพอ ในการต้านทานแรงกระทำ และจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยสามารถจำแนกพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตในลักษณะนี้ออกเป็น 2 ประเภทคือ (ก) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นแบบ Degrading เกิดขึ้นหลังจากเสาทดสอบรับแรงกระทำสูงสุดแล้ว เสาทดสอบไม่สามารถต้านทานแรงกระทำได้ ทำให้ค่าความชันของกราฟลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเสาทดสอบเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูป 2.4c พฤติกรรมลักษณะนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาทดสอบคอนกรีตล้วน และเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตที่การโอบรัดโดยท่อปลอกเหล็กที่มีความแกร่งน้อย (ข) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นแบบ Strain softening เกิดขึ้นหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดสูงสุดแล้ว ความสามารถในการรับแรงกระทำจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ อย่างค่อยเป็นค่อยไป จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมแบบ Degrading ในส่วนของความสามารถในการรับแรงกระทำจะลดลงอย่างทันทีทันใดซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2550); (Seang-atith and Thumrongvuth, 2009)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเครียดของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992)

การนำ CFT Column ไปประยุกต์ใช้งานจริงพบในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ได้นำเสาประเภทนี้ประยุกต์ใช้ในเฟรมที่มีค้ำยัน (Braced frame) และนิยมใช้ในเสาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1000 มิลลิเมตร และนิยมใช้คอนกรีตที่กำลั้งอัดประลัยสูงเพื่อทำให้เสาประเภทดังกล่าวมีความแกร่งสูงสุด และอาจจะมีการใช้ตัวถ่ายแรงเฉือน (Shear connection) เพื่อถ่ายแรงเฉือนระหว่างปลอกเหล็กและคอนกรีตในบางกรณี ในประเทศญี่ปุ่นนิยมใช้เสาประเภทดังกล่าวในเฟรมรับโมเมนต์ (Moment frame) และนิยมใช้ในเสาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่า 700 มิลลิเมตร โดยไม่ใช้ตัวถ่ายแรงเฉือนในปลอกเหล็ก และสำหรับในประเทศไทย ได้ประยุกต์ใช้ CFT Column ในงานบางประเภท เช่น การทำเสาเข็มขนาดเล็ก (Micro pile) ซึ่งปลอกเหล็กที่ใช้เป็นปลอกเหล็กกลมกลวง เพื่อแก้ไขปัญหาคาทรุดตัวของฐานรากในหลายแห่ง เช่น การซ่อมแซมอาคารศูนย์เครื่องมือและเทคโนโลยี 5 และอาคารหอพักนักศึกษาสุรนิวศ 7 และสุรนิวศ 9 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับแนวคิดของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตในรูปแบบที่ 2 หรือเรียกว่า Tubed column จากศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า Tubed Column ถูกออกแบบให้ปลอกเหล็กรองรับหน่วยแรงกระทำตามขวาง และโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว โดยแรงกระทำในแนวแกนจะกระทำโดยตรงแก่แกนคอนกรีต และปลอกเหล็กไม่ได้ถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกน ซึ่งจะทำให้การเว้นระยะช่องว่างระหว่างปลอกเหล็ก และท้องคาน หรือ ฐานรากที่ปลายทั้งสองของเสาดังนั้น ภายใต้แรงกระทำปลอกเหล็ก (Steel jacket) จะทำหน้าที่โอบรัดแกนคอนกรีต ซึ่งปลอกเหล็กสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้มีความค่าสูงมากขึ้น (Tomii, Sakino, Watanabe, and Xiao, 1985) เมื่อทบทวนงานวิจัยต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่าในการศึกษา Tubed column มีค่อนข้างน้อย และเน้นไปในการรองรับแรงกระทำอันเนื่องมาจาก

แผ่นคินไหวเป็นหลัก นอกจากนี้ Tubed column ยังเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังหรือ ซ่อมแซมแก่เสาคอนกรีตที่มีอยู่แล้ว

2.3 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

ในการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 พบว่าพฤติกรรมการรับแรงกดอัดตัวอย่างทดสอบ จะอยู่ในสภาวะหน่วยแรงแกนเดียว (Uniaxial stage of stress) ซึ่งเป็นเพียงหนึ่งในสภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีตเท่านั้น แต่เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานจริง โครงสร้างคอนกรีตจะรองรับหน่วยแรงกระทำแบบหลายแกน (Multiaxial stage of stress) ดังนั้นการเรียนรู้ถึงพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้การกระทำของหน่วยแรงประเภทต่าง ๆ จึงมีความสำคัญในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณาเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยวัสดุอื่น ๆ เช่น เสริมใยแก้วพลาสติก ปลูกเหล็ก หรือท่อเหล็กกลวง และรองรับแรงกระทำในแนวแกน เมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวรองรับแรงกระทำสูงขึ้นเรื่อย ๆ แกนคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง อันเป็นผลเนื่องจากอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) การขยายตัวจะเกิดมากขึ้น ทำให้แกนคอนกรีตที่เกิดการขยายตัวไปชนกับผนังปลูกเหล็ก ทำให้เกิดการถ่ายเทแรงกระทำจากแกนคอนกรีตไปยังปลูกเหล็ก (Composite action) ซึ่งเป็นผลมาจากการโอบรัดจากปลูกเหล็ก (Confining effect) ทำให้เสาดังกล่าวสามารถรองรับแรงกระทำได้สูงขึ้น มีความเหนียวสูงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตล้วนหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังจากทราบถึงผลการโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีตแล้ว ในลำดับถัดไปได้้นำเสนอถึง ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง

2.3.1 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ

นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ (Normal strength concrete) โดยการทดสอบในตัวอย่างทดสอบตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและให้แรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral load) ซึ่งใช้ความดันจากของเหลวในการให้แรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีกรเปลี่ยนแปลงค่าความดันหลายค่าการให้แรงกระทำทางด้านข้างลักษณะนี้เรียกว่า Active confinement จากการศึกษาพบว่าผลของการโอบรัดทำให้คอนกรีตมีค่าหน่วยแรงกดอัด ความแกร่ง และความเคียวในแนวแกนสูงเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในปีถัดมาได้ศึกษาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กเส้นซึ่งพันเป็นเกลียวรอบตัวอย่างทดสอบ (Continuous steel spiral) ภายใต้แรงกระทำในแนวแกนหรือเรียกแรงกระทำในลักษณะนี้ว่า Passive confinement จากการศึกษาพบว่าถ้ากำหนดให้ระยะห่างของ Steel spiral มีค่าน้อย ๆ จะ

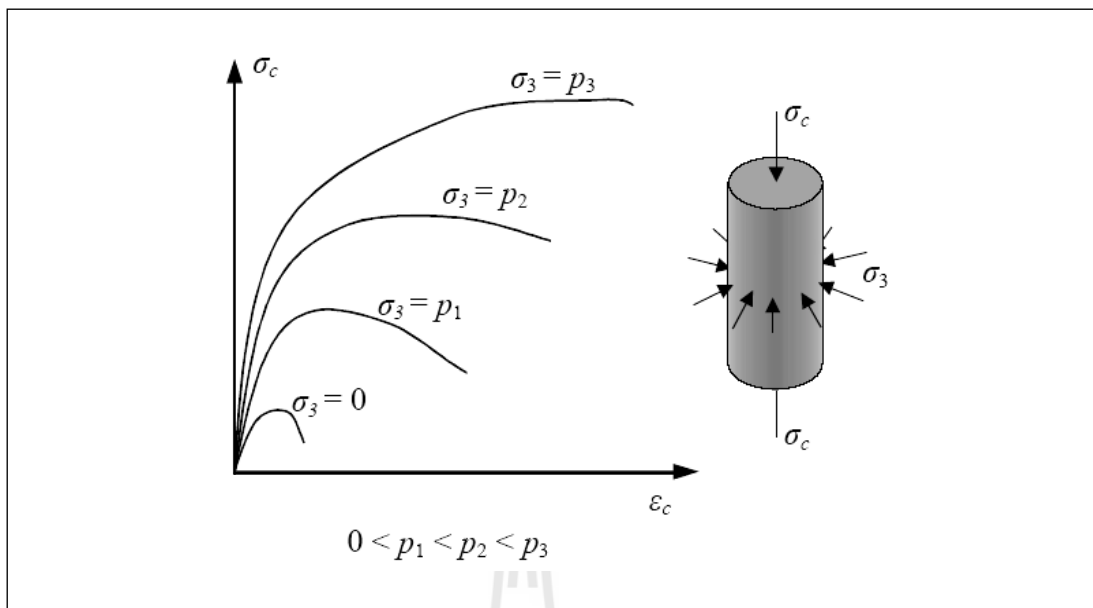
ทำให้ผลการทดสอบในกรณีของ Active confinement มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณี Passive confinement (Richart, Brandtzeag, and Brown, 1928) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

(Richart, Brandtzeag, and Brown, 1928) ได้นำเสนอ สมการเพื่อทำนายกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต โดยให้แรงกระทำทางด้านข้างดังแสดงในสมการ 2.3

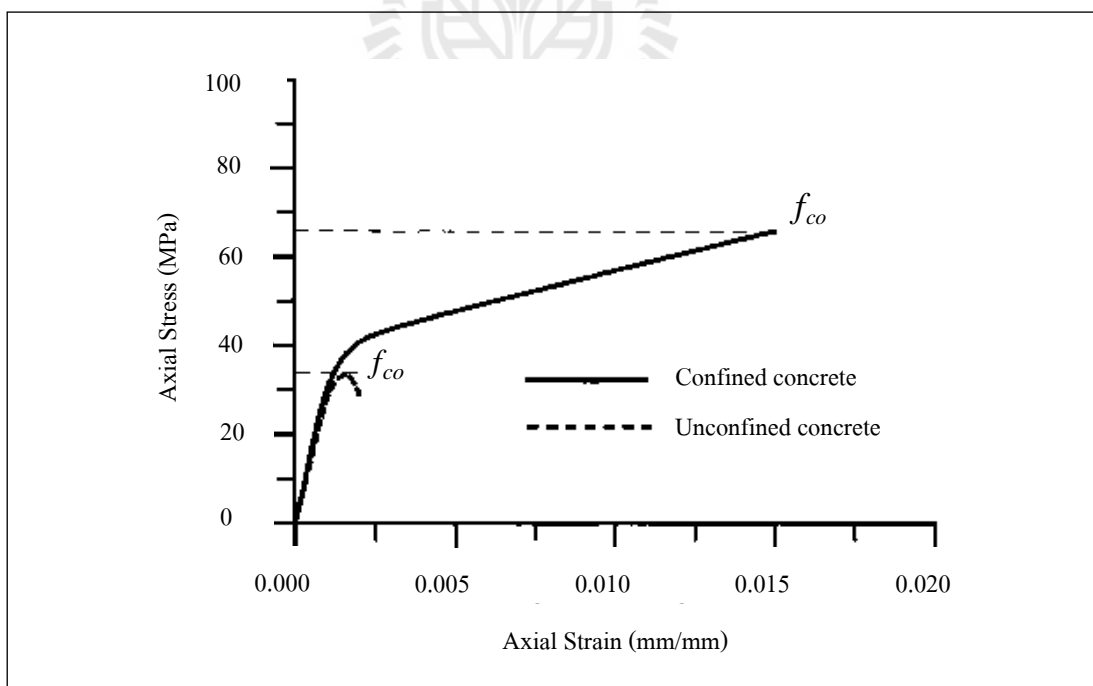
$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1 \quad (2.3)$$

โดยที่ f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันรอบข้าง
 f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง
 f_1 คือ แรงดันรัศรอบ (Confining pressure)
 k_1 คือ สัมประสิทธิ์การโอบรัด (Confinement effectiveness coefficient)
 มีค่าเท่ากับ 4.1

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานและคอนกรีตทรงกระบอกที่ถูกโอบรัดโดยวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยวัสดุ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกความสัมพันธ์ของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานและคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยวัสดุ มีลักษณะคล้ายกันเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุหลักในการรองรับแรงกระทำ หลังจากคอนกรีตรับแรงกระทำในแนวแกนแล้ว จะเกิดการขยายออกทางด้านข้าง แต่เนื่องจากคอนกรีตมีค่า Poisson's ratio ต่ำ ทำให้คอนกรีตขยายตัวออกทางด้านข้างน้อยทำให้ไม่เกิด Composite action ระหว่างคอนกรีตและวัสดุที่นำมาโอบรัดแต่เมื่อคอนกรีตรองรับแรงกระทำจนกระทั่งถึงค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวอย่างต่อเนื่อง ทำให้ค่าความเครียดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วกว่าหน่วยแรงกดอัด ส่งผลทำให้ค่าความชัน (Slope) มีค่าลดน้อยลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งความสัมพันธ์จะกลับมาเป็นเส้นตรงอีกครั้ง เนื่องมาจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวมากขึ้นทำให้เกิดการขยายตัวสูงมากขึ้นจนกระทั่งเกิด Composite action ระหว่างวัสดุที่ใช้โอบรัดกับแกนคอนกรีต ถ้าชิ้นส่วนที่นำมาโอบรัด มีความแกร่งเพียงพอแล้ว คอนกรีตจะถูกกระทำโดยแรงโอบรัด ทำให้คอนกรีตที่ถูกโอบรัดดังกล่าวมีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile material) สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูง จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ



รูปที่ 2.5 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต
(Johansson, 2000)



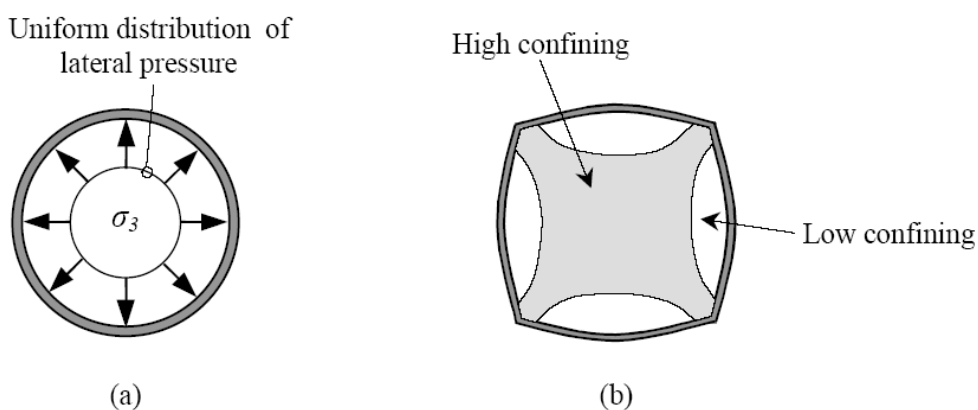
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตทรงกระบอก
ที่ถูกโอบรัดและไม่ถูกโอบรัด (Lin and Chen, 2001)

2.3.2 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง

Attard and Setung (1996) ได้ศึกษาถึงผลการโอบรัดในคอนกรีตกำลังสูงโดยทดสอบแท่งคอนกรีตกำลังสูงภายใต้หน่วยแรงโอบรัดซึ่งมีค่าไม่สูงมาก และ Ansari and Li (1998) ได้ทดสอบแท่งคอนกรีตกำลังสูงภายใต้หน่วยแรงโอบรัดที่มีค่าสูงถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่นำมาศึกษา ผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีพบว่าผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคอนกรีตกำลังปกติและพบว่าในคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตมวลเบา ค่า k_1 ดังแสดงในสมการที่ 2.3 มีค่าลดลงจาก 4.1 เป็น 2.0 และสำหรับพฤติกรรมการรับหน่วยแรงกระทำของคอนกรีตดังกล่าวจะมีกำลังและความเหนียวสูงเพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงโอบรัดที่กระทำแก่คอนกรีต

2.4 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

Schneider (1998) จากการศึกษาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและรองรับแรงกดอัดในแนวแกน พบว่ากำลังรับแรงกดอัดที่จุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบ มีค่าสูงกว่าผลรวมของกำลังคอนกรีตรวมกับกำลังของปลอกเหล็ก และคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลม จะมีความสามารถในการโอบรัดแกนคอนกรีต สูงกว่าคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม เนื่องจากปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลมทำให้เกิดหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง(Hoop stress) ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงรัศรอบที่สม่ำเสมอมากกว่าหน่วยแรงรัศรอบที่เกิดจากปลอกเหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านของหน้าตัดที่เรียบซึ่งมีความแกร่งต่อแรงดัด ไม่เพียงพอในการต้านทานแรงดัด เนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างของคอนกรีตที่กระทำตั้งฉากกับผนังปลอกเหล็ก ดังนั้นการโอบรัดส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่มุมและคอนกรีตด้านในของแกนเสา โดยความดันโอบรัดจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดเมื่อเปรียบเทียบกับเสาหน้าตัดกลมดังแสดงในที่รูป 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด (Johansson, 2000)

2.4.1 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม

ความดันโอบรัด (Confining pressure, f_1) หรือหน่วยแรงโอบรัดในเสาคอนกรีตจะมีค่าคงที่รอบเส้นรอบวงของหน้าตัด โดยค่าความดันโอบรัดมีค่าสูงสุดที่จุดครากของปลอกเหล็ก การหาค่าความดันโอบรัด จะดังแสดงในสมการ 2.4

$$f_1 = \frac{2\sigma_j t}{D} = \frac{2E_s \varepsilon_j t}{D} \quad (2.4)$$

โดยที่ σ_j คือ หน่วยแรงทางขวางของปลอกเหล็ก (Hoop stress)
 ε_j คือ ความเครียดทางขวางของปลอกเหล็ก (Hoop strain)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัด
 E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของปลอกเหล็ก
 t คือ ความหนาของปลอกเหล็ก

อัตราการโอบรัด (Confining ratio) จะบ่งบอกถึงระดับการโอบรัดที่ได้จากปลอกเหล็กซึ่งแสดงในรูปอัตราส่วนของความดันโอบรัดสูงสุด (f_1) และกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (f'_{co}) ดังสมการ 2.5

$$CR = \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (2.5)$$

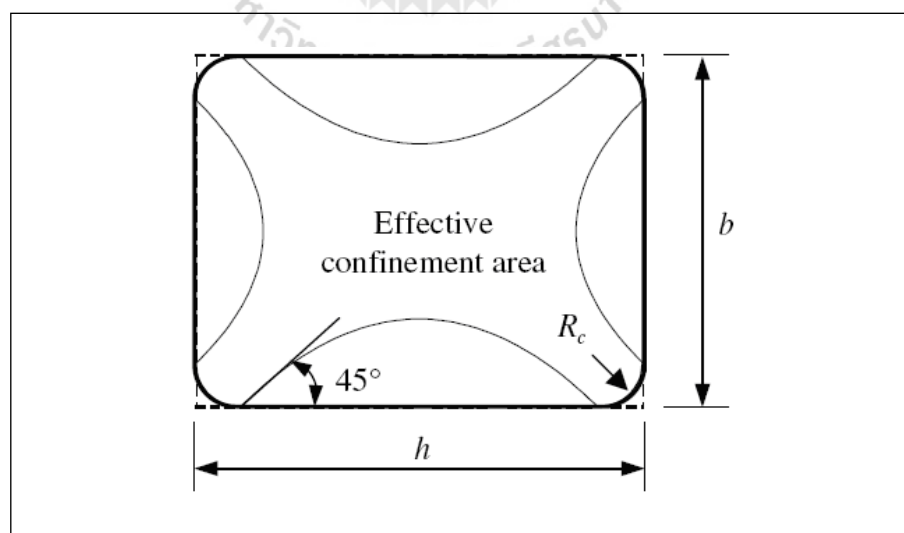
โดยที่ f_1 คือ ความดันโอบรัด
 f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันด้านข้าง

Lam and Teng (2003) จากการศึกษาพบว่าเมื่อความหนาของปลอกเหล็กที่ใช้โอบรัดแกนคอนกรีตมีค่ามากกว่าค่า ๆ หนึ่ง ทำให้กำลังรับแรงกดอัดและค่าความเครียดในแนวแกนของคอนกรีต มีค่าสูงสุด และที่จุดเดียวกันนี้จะทำให้ผลของการโอบรัดมีค่าสูงสุดด้วยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียด พบว่าหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำจะมีพฤติกรรมแบบเส้นตรงและเมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำสูงกว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดของคอนกรีตจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เส้นตรง โดยพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นเส้นตรงอีกครั้ง (Bilinear) แต่จะมีความชันน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมช่วงเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.5

และขนาดความหนาของปลอกเหล็กที่ทำให้กราฟมีลักษณะแบบ Bilinear จะเป็นขนาดที่ทำให้ อัตราส่วนการ โอบรัด (Confinement ratio) มีค่าเท่ากับ 0.07 ถ้าความหนาของปลอกเหล็กมีค่าน้อยกว่า ค่าดังกล่าว ลักษณะกราฟระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอก เหล็กหน่วยจะมีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตกำลังปกติ ซึ่งกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด จะถึงก่อนการครากของปลอกเหล็กทำให้ผลของการ โอบรัดมีค่าไม่สูงนัก

2.4.2 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2.8 แสดงพื้นที่ของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กของเสาคอนกรีตหน้า ตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีหน้าตัดกว้าง (b) และลึก (h) ซึ่งมุมของปลอกเหล็กดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้มี ลักษณะมน โดยมีรัศมี R_c เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการ โอบรัดที่เกิดขึ้นในแกนคอนกรีตจาก การศึกษาของ Mander, J.B., et al., (1988); Lam, L., and Teng, J.G. (2003) พบว่าแกนคอนกรีตจะถูก โอบรัดโดยปลอกเหล็กภายนอกโดยเกิด Arching action ในปลอกเหล็กซึ่งพื้นที่การ โอบรัด ประสิทธิภาพ (Effective confinement area) ของคอนกรีตดังกล่าวอยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้านที่ ตัดกับขอบของหน้าตัดเสาที่มุมประมาณ 45° และเนื่องจากการ โอบรัดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่สม่ำเสมอ ตลอดหน้าตัดของแกนคอนกรีต ดังนั้นที่ความเครียดในแนวแกนค่าหนึ่งที่เกิดขึ้นบนเสาดังกล่าว หน่วยแรงที่ถูกรองรับโดยคอนกรีตจะมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ซึ่งทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบน หน้าตัดเสาถูกประมาณให้อยู่ในรูปของหน่วยแรงในแนวแกนเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงกระทำหารด้วย พื้นที่หน้าตัดของเสา



รูปที่ 2.8 คอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (Lam, L., and Teng, J.G., 2003)

2.4.3 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม

แบบจำลองในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กเป็นที่นิยมนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย คือแบบจำลองของ ACI Committee 440 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้ได้มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Mander, Priestley, and Park (1988) ได้พัฒนาวิธี Unified stress-strain approach สำหรับทำนายกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กทั้งหน้าตัดกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยได้นำเสนอสมการอยู่ในรูปสมการแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) ดังแสดงในสมการ 2.6

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_1}{f'_{co}} - 1.254 \quad (2.6)$$

โดยที่ f_1 คือ ความดันโอบรัด

f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันด้านข้าง

2.4.4 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาซึ่งทำให้ได้แบบจำลองของกำลังรับแรงกดอัดและความเครียดสูงสุดในแนวแกนต่าง ๆ ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของ ACI Committee 440 (2002) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากองค์กรที่มีชื่อเสียงทางด้านคอนกรีตมากที่สุดแห่งหนึ่ง และได้มีการนำไปใช้งานแล้วอย่างกว้างขวาง

สำหรับเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ACI Committee 440 (2002) เสนอให้เปลี่ยนหน้าตัดของเสาจากหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้เป็นหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลกัน โดยที่ใช้อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) สำหรับการพิจารณาผลของการโอบรัดที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากหน้าตัดสี่เหลี่ยม อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) ได้ถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของพื้นที่การโอบรัดประสิทธิผล (Effective confinement area) ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต โดยสมมติให้พื้นที่การโอบรัดประสิทธิผลเป็นพื้นที่ของคอนกรีตที่อยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้านที่ตัดกับขอบของหน้าตัดเสาที่มุม 45° ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่สมการของอัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) จะเขียนได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - ((b - 2R_c)^2 + (h - 2R_c)^2) / 3A_g - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \quad (2.7)$$

- เมื่อ A_e คือ พื้นที่การโอบรัดประสิทธิภาพผลของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต
 A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $bh - (4 - \pi)R_c^2$
 ρ_{sc} คือ ปริมาณเหล็กเสริม (Cross - sectional area ratio) ของเหล็กเสริมในแนวแกน

ในสมการที่ 2.7 ปริมาณเหล็กเสริมของเหล็กเสริมในแนวแกน (ρ_{sc}) ของเสาที่อยู่ นอกพื้นที่รับความดันโอบรัดจะถูกหักลบออกจากพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีตเป็นสองเท่า

ในแบบจำลองนี้ เสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลจะถูกนิยามเป็นเสาที่มีอัตราปริมาตร (Volumetric ratio) ของเหล็กที่เท่ากับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมเดิม ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลหาได้จากสมการที่ 2.8

$$D = \frac{2bh}{b + h} \quad (2.8)$$

- เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลม
 b คือ ความกว้างของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 h คือ ความลึกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จากสมการที่ 2.8 ค่าความดันโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกหาโดยการแทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลลงในสมการที่ 2.5 นอกจากนี้ ACI Committee 440 (2002) ได้เสนอให้ปรับแก้ค่าความดันโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมอีกครั้ง โดยใช้ค่าอัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) เพื่อที่จะได้ปรับความดันโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเรียกความดันโอบรัดที่ผ่านการปรับแก้ว่า ความดันโอบรัดประสิทธิภาพ (Effective confining pressure) ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$f'_1 = k_s f_1 \quad (2.9)$$

- เมื่อ f'_1 คือ ความดันโอบรัดประสิทธิภาพของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 k_s คือ อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor) จากสมการที่ 2.7
 f_1 คือ ความดันโอบรัด จากสมการที่ 2.4

แบบจำลองของ ACI Committee 440 (2002) มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองซึ่งถูกเสนอโดย Mander, J.B., et al., (1988) เป็นบุคคลแรกที่ได้พัฒนาวิธี Unified stress - strain approach สำหรับทำนายกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้ทั้งคอนกรีตที่มีหน้าตัดทรงกลมและคอนกรีตที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยที่แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางที่สุดอีกแบบจำลองหนึ่งโดย Mander, J.B., et al., (1988) ได้มีการแนะนำสมการดังกล่าวอยู่ในรูปสมการแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) โดยเขียนได้ในรูป

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f'_{co}} - 1.254 \quad (2.10)$$

- เมื่อ f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อมีแรงดันด้านข้าง
 f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันด้านข้าง

นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองของ ACI Committee 440 สามารถทำนายค่าความเครียดสูงสุดในแนวแกนของคอนกรีตอื่นเนื่องจากการโอบรัด สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\varepsilon_{cu} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_{co})}{E_c} \quad (2.11)$$

- โดยที่ E_c คือ Modulus of elasticity ของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด
 f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันด้านข้าง
 f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันด้านข้าง

2.5 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Tubed RC column

มาตรฐานในการออกแบบเสาเชิงประกอบที่ใช้ในประเทศไทยคือ มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ส.ท.1008-38) กำหนดไว้ในหัวข้อ 4314 องค์อาคาร

เชิงประกอบรับแรงกดอัด นอกจากนั้นในต่างประเทศ มาตรฐาน American Institute of steel and construction สำหรับมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบของอเมริกา คือ Manual of steel construction: Load and Resistance Factor design (AISC/LRFD) และมาตรฐานการออกแบบของ American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. (ACI 318-05) เป็นต้น

2.5.1 มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ศ.ท.1008-38)

และ มาตรฐานการออกแบบ Building Code requirements for Structural Concrete ของ American Concrete Institute (ACI318-05) and Commentary (ACI318R-05)

มีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องในการศึกษาดังนี้

1) องค์อาคารเชิงประกอบรับแรงกดอัดให้รวมถึงองค์อาคารเสริมเหล็กตามยาวด้วย เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ปลายเหล็กหรือท่อเหลี่ยม ซึ่งอาจมีเหล็กเส้นตามยาวหรือไม่ก็ได้

2) กำลังขององค์อาคารเชิงประกอบให้คำนวณโดยใช้เงื่อนไขขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

3) กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใด ๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแบกทาน โดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบนั้น

4) กำลังรับแรงในแนวแกนทั้งหมดที่ไม่ได้กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านโดยตรงด้วยจุดต่อ ไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม

5) เหล็กโครงสร้างหุ้มแกนคอนกรีต

(ก) ความหนาของเหล็กซึ่งหุ้มแกนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องไม่น้อยกว่า $B \sqrt{\frac{f_y}{3E_s}}$ สำหรับแต่ละด้านซึ่งกว้างเท่ากับ B หรือเป็นไปตามสมการ 2.12

$$\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{3E_s}{f_y}} \quad (2.12)$$

และต้องไม่น้อยกว่า $D \sqrt{\frac{f_y}{8E_s}}$ สำหรับหน้าตัดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ D หรือสมการ 2.13

$$\frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8E_s}{f_y}} \quad (2.13)$$

โดยที่ E_s คือ Modulus of Elasticity ของปลอกเหล็ก

f_y คือ Yielding stress ของปลอกเหล็ก

(ข) เหล็กเส้นตามยาวที่อยู่ภายในแกนคอนกรีตที่ถูกหุ้มอาจนำมาพิจารณาในการคำนวณค่าพื้นที่ของเหล็กรูปพรรณ (A_s) ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยมในหน้าตัดเชิงประกอบและโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กรูปพรรณ ท่อกลม และท่อเหลี่ยม รอบแกนศูนย์กลางของหน้าตัดองค์อาคารเชิงประกอบ (I_r)

สำหรับการคำนวณการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. 1008-38 หรือตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ได้แสดงไว้ในสมการ 2.2 ในหัวข้อ 2.2.2

2.5.2 มาตรฐานการออกแบบ American Institute of Steel: Manual of Steel

Construction: Load and Resistant Factor Design (AISC/LRFD)

สำหรับการออกแบบเสาเชิงประกอบตามมาตรฐาน AISC/LRFD ได้กำหนดสมการออกแบบเสาเชิงประกอบต้องมี อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาเชิงประกอบหรือ $\rho_{sc} = \frac{A_s}{A_g}$ มีค่าได้ไม่น้อยกว่า 4% และมีอัตราส่วน $\frac{B}{t}$ สำหรับปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นไปตามสมการ 2.14

$$\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}} \quad (2.14)$$

และสำหรับเสาน้ำตัดกลมเป็นดังสมการ 2.15

$$\frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8E_s}{f_y}} \quad (2.15)$$

สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบตามมาตรฐาน AISC/LRFD เมื่อพิจารณาผลของ Composite action ระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็ก นอกจากนั้นในการคำนวณต่าง ๆ จะเป็นไปตามเงื่อนไขในการออกแบบของค์อาคารเหล็กโครงสร้างทั่วไป ซึ่งสมการในการคำนวณกำลังรับแรงกดอัดของเสาเชิงประกอบหรือ P_{cr} สามารถหาได้จากหน่วยแรงวิกฤต (Critical stress, F_{cr}) หรือ ดังสมการ 2.16

$$\phi P_{cr} = A_s F_{cr} \quad (2.16)$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็ก

F_{cr} คือ หน่วยแรงวิกฤต

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง = 0.85

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_{my} \quad \text{สำหรับ} \quad \lambda_c \leq 1.5 \quad (2.17)$$

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_{my} \quad \text{สำหรับ} \quad \lambda_c > 1.5 \quad (2.18)$$

โดยที่ $\lambda_c = \sqrt{\frac{F_{my}}{F_E}} = \left(\frac{KL}{r_m \pi}\right) \sqrt{\frac{F_{my}}{E_m}}$ คือ Column slenderness parameter

F_E คือ Euler buckling stress ของเสาเชิงประกอบ

r_m คือ Radius of gyration ของปลอกเหล็ก

KL คือ ความยาวประสิทธิผลของเสาเชิงประกอบ

$E_m = E_s + 0.4E_c \frac{A_c}{A_s}$ คือ Modified elastic modulus ของเสาเชิงประกอบ

$F_{my} = F_y + 0.85 f'_{co} \frac{A_c}{A_s}$ คือ Modified yielding stress ของเสาเชิงประกอบ

จากข้อกำหนดในการออกแบบเสาท่อกรอกคอนกรีต ตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 หรือมาตรฐานการออกแบบของ ACI Committee 318 และมาตรฐานการออกแบบของ AISC/LRFD สามารถสรุปข้อกำหนดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อกำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบของมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ

ข้อกำหนด	มาตรฐาน ว.ส.ท./ มาตรฐาน ACI 318	มาตรฐาน AISC/LRFD
กำลังรับแรงกดอัด ในแนวแกน	$P = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + f_y A_s$	$\phi P_{cr} = A_s F_{cr}$
อัตราส่วน $\frac{B}{t}$	$\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{3E_s}{f_y}}$	$\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{F_y}}$
อัตราส่วน $\frac{D}{t}$	$\frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8E_s}{f_y}}$	$\frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8E_s}{f_y}}$

2.6 กระบวนการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่ใช้หน่วยแรงโอบรัดแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ประยุกต์ใช้สมการคำนวณหาหน่วยแรงในแนวทิศทางเส้นรอบวงของท่อรับความดันผนังบาง (Hoop stress, σ_1) โดยความดันภายในที่เกิดขึ้นนั้น (ρ) เกิดจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตที่รับแรงกดอัดในแนวแกนกระทำในแนวตั้งฉากแก่ผนังของท่อปลอกเหล็ก จึงทำให้เกิดหน่วยดึงแรงในแนวเส้นรอบวงในปลอกเหล็ก หรือเรียกว่าหน่วยแรงโอบรัดที่เกิดขึ้น โดยที่มีอัตราส่วนของรัศมีภายในของท่อรับความดันต่อความหนาของผนังท่อมักจะหรือเท่ากับ 10 หรือ $\frac{r}{t} \geq 10$ สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.19

$$\sigma_1 = \frac{\rho r}{t} \quad (2.19)$$

โดยที่ ρ คือ ความดันภายในท่อรับความดัน
 r คือ รัศมีภายในท่อรับความดัน
 t คือ ความหนาของผนังของท่อรับความดัน

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบกระทำโดยการใช้อุปกรณ์สำหรับโอบรัดแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ที่เกิดขึ้นจากการขันอุปกรณ์ดังกล่าวด้วยสลักเกลียวโดยใช้ประแจปอนด์ (Torque wrench) ซึ่งสามารถระบุขนาดของ โมเมนต์การบิดที่ต้องการได้โดยสามารถคำนวณ โมเมนต์บิดจากสมการ 2.20

$$T = CdF_i \quad (2.20)$$

โดยที่ T คือ โมเมนต์การบิด
 C คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะและคุณภาพของเกลียว ซึ่งค่าที่แนะนำให้ใช้งานคือ
 $C = 0.15$ เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น
 $C = 0.20$ เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของสลักเกลียว
 F_i คือ แรงดึงขั้นต้นในแนวแกนของสลักเกลียว

สำหรับรายละเอียดในการคำนวณ การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบและเสา
คอนกรีตเสริมเหล็ก ได้นำเสนอเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 2.9 การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบ



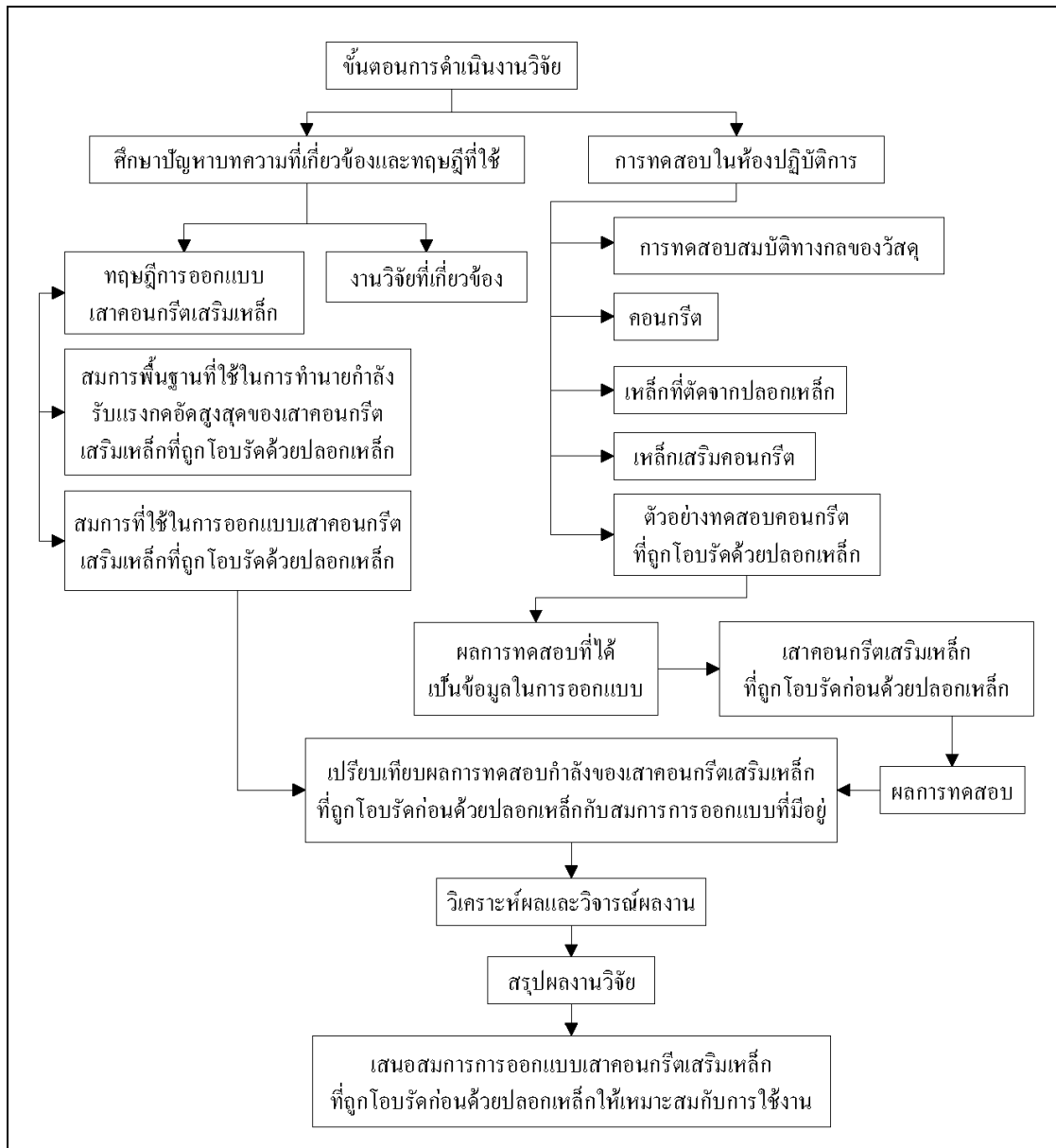
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองที่มีแนวทางในการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการแล้ว นำผลที่ได้มาศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรง คุณสมบัติทางกลและลักษณะการวิบัติของเสาเพื่อให้ งานวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ จึงได้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของทฤษฎีและส่วนที่สองเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนของทฤษฎี นั้นทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งทฤษฎีในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงในข้อกำหนดและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งพัฒนาคัดแปลงสมการที่ใช้ในการทำงานกำลังรับแรงกดอัดและสมการที่ใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

ส่วนของการทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เป็นการทดสอบ คุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ คอนกรีต เหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก เหล็กเสริมคอนกรีตและ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อนำค่าคุณสมบัติและ ข้อมูลเบื้องต้นทั้งความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tube RC column) ส่วนที่สอง ได้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนเพื่อให้สอดคล้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ใน ห้องปฏิบัติการเพื่อที่จะหาคุณสมบัติทางกล พฤติกรรมการรับแรง และลักษณะการวิบัติของเสา และใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ได้กับกำลังที่สามารถคำนวณโดยใช้สมการ ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเป็นการพัฒนารูปแบบของการเสริมกำลังด้วยการให้หน่วยแรงโอบรัด ก่อน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยได้ถูกออกแบบให้อยู่ตาม มาตรฐานในการออกแบบของ ว.ส.ท.1008 - 38 และเพื่อนำค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบเสาเชิง ประกอบ (ซึ่งอยู่ในรูปของTube RC column) มาเปรียบเทียบกับสมการที่ระบุตามมาตรฐานการ ออกแบบของ ว.ส.ท.และที่ระบุสมการตามข้อกำหนดของ AISC/LRFD และสรุปหาแนวทางการ ออกแบบที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งแผนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

ในการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ส่วนของพฤติกรรมทางกล (Mechanical behaviors) และคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ของคอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุในการศึกษาในงานวิจัย ซึ่งได้แก่ หน่วยแรงสูงสุด (Ultimate stress) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และรูปแบบการวิบัติ (Modes of failure)

1) มาตรฐานการทดสอบ

- ASTM C39-96 (Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens)
- ASTM C469-94 (Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression)

2) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

- เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Shimadzu Model UH - Series ขนาด 2000 kN ของ Shimadzu Corporation Japan ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ก)
- ชุดประมวลผลของเครื่อง Data Logger โดยมียี่ห้อ Yokokawa รุ่น DS600 และ Data Acquisition (DAQ) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DA100 เป็นชุดที่ใช้ในการต่อเข้าเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เพื่อรับค่าที่ได้จากการทดสอบและส่งค่าที่ได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข)
- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับต่อเข้ากับชุด Data Logger พร้อมทั้งบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบ
- Linear Variable Differential Transducers (LVDT) capacity 5 mm และอุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ค)
- เครื่องหล่อฝา (Capping) ทับขึ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอก
- เครื่องชั่งน้ำหนักและไม้บรรทัดเหล็ก



(ก) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



(ข) Data Logger and Data Acquisition



(ค) LVDT และอุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต

รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีต

3) ตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาเป็นคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัทผลิตภัณฑ์ และ วัตถุประสงค์ (CPAC) โดยการผสมคอนกรีตจะใช้โม่ผสมคอนกรีตแบบอัตโนมัติ (Batching plant) ที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18 25 และ 32 MPa เพื่อให้ครอบคลุมคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารขนาดเล็กและกลางในประเทศไทย โดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m และมีความสูง 0.30 m และได้รับการบ่มในน้ำจนกระทั่งมีอายุ 28 วัน ก่อนการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้จัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการบัณฑิตศึกษาศาखाวิชาวิศวกรรมโยธา อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การเตรียมแบบหล่อ รายละเอียดของแบบหล่อที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 - 96 และ ASTM C469 - 94 การยึดติดกันของแบบหล่อและฐานจะใช้สลักเกลียว รอยต่อในแบบต้องสนิทพอโดยน้ำในส่วนผสมคอนกรีตไม่ไหลออกจากแบบ ก่อนเริ่มหล่อตัวอย่างทดสอบต้องทำความสะอาดแบบหล่อทรงกระบอกให้เรียบร้อยโดยที่แบบด้านในที่สัมผัส กับคอนกรีตทาน้ำมันให้ทั่วเพื่อไม่ให้คอนกรีตหรือน้ำปูนรั่วไหลออกมาตามรอย ของแบบหล่อได้

- การหล่อตัวอย่าง โดยเทคอนกรีตที่เตรียมไว้ในแบบหล่อรูปร่างทรงกระบอกครั้งละประมาณหนึ่งในสามของความสูงของแบบหล่อ จากนั้นทำการกระทุ้งด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ความยาว 0.60 m มีปลายกลมมน 25 ครั้ง ให้กระจายทั่วทั้งพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอและให้ปลายเหล็กกระทุ้งผ่านไปยังชั้นล่างเล็กน้อยสำหรับชั้นล่างสุดให้กระทุ้งตลอดความหนาของชั้นโดยไม่ให้ปลายเหล็กกระทุ้งโดนฐานแบบหล่อชั้นบนสุด ต้องใส่คอนกรีตให้สูงกว่าขอบแบบตลอดเวลาที่กระทุ้งเมื่อกระทุ้งชั้นบนสุดเสร็จแล้วใช้เกรียงบาดคอนกรีตส่วนเกินออกน้าแผ่นพลาสติกชนิดหนาคลุมผิวหน้าของตัวอย่าง เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ

- การถอดแบบ การถอดแบบทำหลังการหล่อ 24 ชั่วโมง เมื่อถอดแบบแล้วเขียนหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีต จากนั้นนำไปบ่มขึ้น

- การบ่มตัวอย่าง การบ่มตัวอย่างทดสอบใช้การบ่มด้วยน้ำโดยจุ่มตัวอย่างลงในน้ำจนท่วมก่อนตัวอย่างทดสอบและควรรักษาอุณหภูมิน้ำให้คงที่ซึ่งระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน

▪ การเคลือบผิวหน้าตัวอย่าง นำส่วนผสมของกำมะถันมาหลอมที่อุณหภูมิ 180 - 210°C แล้วเทลงบนแผ่นเหล็กขัดมันคว่ำก้อนตัวอย่างลงบนของผสมนี้ โดยการเคลือบทำในลักษณะที่ตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่างและควรเคลือบไปข้างที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข)





(ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้ง



(ข) ตัวอย่างทดสอบ



(ค) การติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน

5) วิธีการทดสอบ

- วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว พร้อมทั้งชั่งน้ำหนัก
- ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงอัดของคอนกรีตในทิศทางที่กำหนดไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.4
 - ทำการต่อสายนำสัญญาณจาก LVDTs และ Load Cell เข้า Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมบันทึกข้อมูล
 - ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยการเพิ่มน้ำหนักกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราที่ต่ำ (0.5 mm/min) จนกว่าตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติเพื่อทำการคำนวณหาค่าหน่วยแรงและความเครียดและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 3.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัด

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กภายใต้แรงดึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ใช้ในการศึกษา โดยคุณสมบัติที่สนใจ ในงานวิจัยได้แก่ หน่วยแรงคราก (Yielding stress) หน่วยแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation)

1) มาตรฐานการทดสอบ

- ASTM E8-98

(Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials)

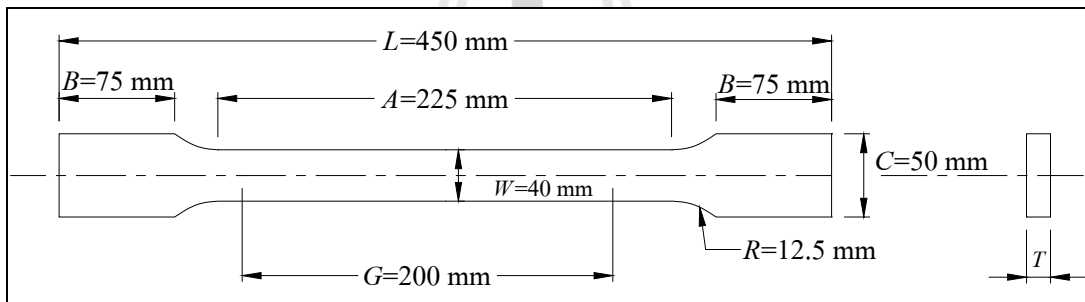
2) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

▪ ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Shimadzu Model UH-Series ขนาด 2000 kN ของ Shimadzu Corporation Japan ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ก)

- Extensometer
- Vernier Caliper

3) ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบถูกจัดเตรียมโดยการตัดตัวอย่างปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยให้เป็นรูปกระดูกตามมาตรฐาน ASTM E8 - 98 ซึ่งใช้ความหนาละ 3 ตัวอย่างและกำหนดระยะพิกัด (Gauge length) มีค่าเท่ากับ 50 mm เพื่อใช้ในการวัดหาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รายละเอียดแผ่นตัวอย่างทดสอบรูปกระดูกของปลอกเหล็ก

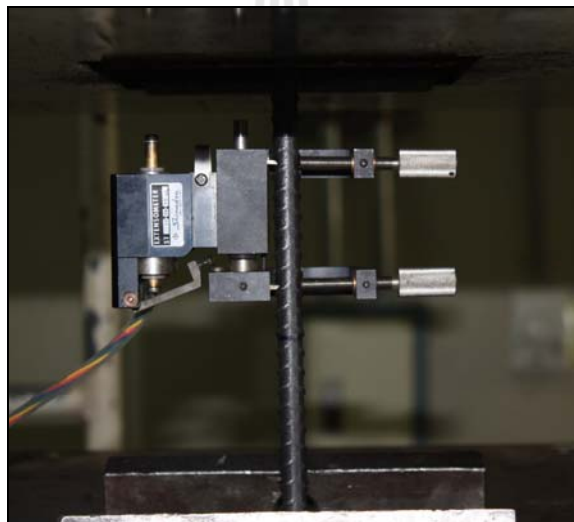
4) วิธีการทดสอบ

- ทำการวัดขนาดความกว้าง ความหนาและกำหนดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้ Vernier caliper 3 จุด เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ย
- ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึง พร้อมทั้งติดตั้ง Extensometer
- เพิ่มแรงดึงให้กับตัวอย่างทดสอบช้า ๆ จนกระทั่งเกิดการวิบัติ
- นำตัวอย่างทดสอบออกจากเครื่องทดสอบและนำตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ส่วน ที่วิบัติมาต่อกันให้สนิท จากนั้นทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบที่จุด

วิบัติและวัดความยาว Gauge length ของตัวอย่างทดสอบเมื่อวิบัติโดยวัดระยะระหว่างจุดที่ใช้วัดความยาวเริ่มต้นและสังเกตรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้น

3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตภายใต้แรงดึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต โดยคุณสมบัติทางกลที่สนใจ คือ หน่วยแรงคราก (Yielding stress) หน่วยแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM

1) มาตรฐานการทดสอบ

- ASTM E8-98 (Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials)

2) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

- เครื่อง UTM ยี่ห้อ Instron มีกำลังทดสอบสูงสุด 1000 kN โดยการยึดตัว
- Extensometer
- Venire Caliper

3) ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นกลม RB6 จำนวน 4 ตัวอย่างและเหล็กข้ออ้อย DB12 จำนวน 4 ตัวอย่าง

4) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- นำชิ้นตัวอย่างทดสอบไปชั่งน้ำหนักและวัดความยาวพร้อมบันทึกค่า
- ใช้ Venire วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยและบันทึกค่า
- ใช้สติกคอคกระยะ Gauge length เท่ากับ 5D ระยะระหว่างหัวจับ 5.5D

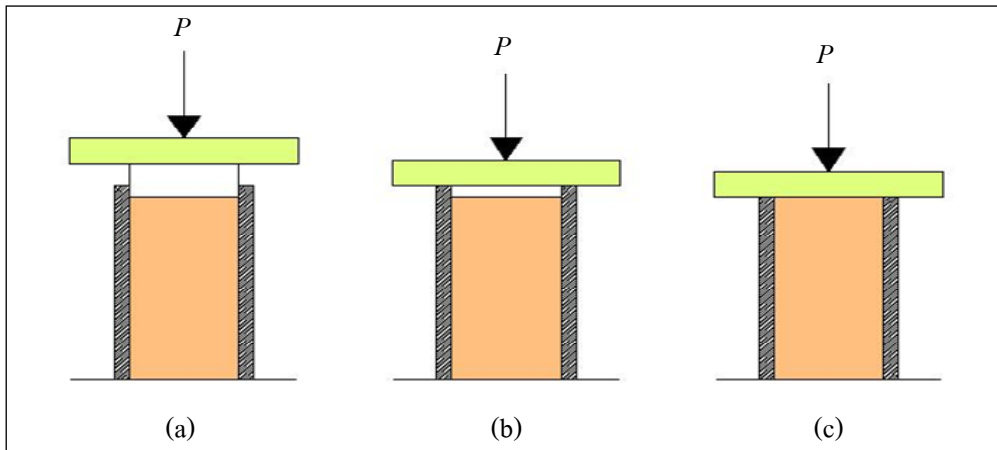
5) วิธีการทดสอบ

- ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึง โดยให้ระยะหัวจับได้มาตรฐานที่กำหนดพร้อมทั้งติดตั้ง Extensometer
- เพิ่มแรงดึงให้กับตัวอย่างทดสอบช้า ๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ
- บันทึกแรงที่กระทำและค่า Deformation ที่เกิดขึ้นจนกระทั่งถึงจุดครากจึงถอด Extensometer ออกแล้วออกแรงดึงต่อไปจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
- จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบที่ได้ ออกจากเครื่องทดสอบสังเกตตำแหน่งและลักษณะของรอยที่ขาดวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขาดนำชิ้นทดสอบที่ขาดมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อบันทึกค่าการยืดตัว (Deformation Length) ในช่วง Gauge length

3.2.4 การทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลและค่าคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่นำมาศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ หน่วยแรงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และลักษณะการวิบัติ (Failure Mode) จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต ลักษณะการให้แรงกระทำแบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูป 3.7 จากการศึกษพบว่า การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบรูปที่ 3.7a (แรงกดอัดกระทำโดยตรงแก่คอนกรีต) และรูปที่ 3.7c (แรงกดอัดกระทำพร้อมกันทั้งคอนกรีตและปลอกเหล็ก) มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน แต่ลักษณะการให้แรงกระทำดังรูปที่ 3.7b (แรงกดอัดกระทำโดยตรงแก่ปลอกเหล็ก) มีพฤติกรรมการรับแรงอัดคล้ายพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กกลวงและมีกำลังรับแรงกดอัดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้แรงกระทำในรูปที่ 3.7a และ 3.7c (Johansson, 2000) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกรูปแบบการให้แรงกระทำดังรูปที่ 3.7a ซึ่งสอดคล้องกับ มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 - 38 ข้อที่ 4314 กำหนดให้ “กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใด ๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแบกทาน โดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบนั้น” และการให้แรงกระทำโดยตรงต่อคอนกรีตสอดคล้องกับรูปแบบการก่อสร้างเพื่อการเสริมกำลังให้แก่เสาโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว



รูปที่ 3.7 ลักษณะการให้แรงกระทำแก่เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต

- a) แรงกดอัดกระทำโดยตรงแก่คอนกรีต
- b) แรงกดอัดกระทำโดยตรงแก่ปลอกเหล็ก
- c) แรงกดอัดกระทำพร้อมกันทั้งคอนกรีตและปลอกเหล็ก

1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

- โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Shimadzu Model UH-Series ขนาด 2000 kN ของ Shimadzu Corporation Japan ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ก)

- ชุดประมวลผลที่ใช้คือเครื่อง Data Logger ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DS600 และ Data Acquisition (DAQ) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DA100 เป็นชุดที่ใช้ต่อเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เพื่อรับค่าที่ได้จากการทดสอบและส่งค่าที่ได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข)

- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับต่อเข้ากับชุด Data Logger พร้อมบันทึก
- Linear Variable Differential Transducers (LVDT) capacity 100 mm และอุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.8

- Bearing plate ขนาด 150 x 150 x 50 mm จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 3.8 LVDT capacity 100 mm

2) ตัวอย่างทดสอบ

▪ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สำหรับการระบุชื่อของ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้ถูกกำหนดในรูปแบบ WX - Y - Z โดยอักษร W หมายถึงชนิดของตัวอย่างทดสอบ (กำหนดให้ CR หมายถึง ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง และ SR หมายถึง ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก) อักษร X หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกำลังอัดประลัย 3 ค่า คือ 18 25 และ 32 MPa) อักษร Y หมายถึง ความหนาของปลอกเหล็กที่โอบรัดตัวอย่างทดสอบ ความหนาของปลอกเหล็ก 3 ค่าคือ 3.2 4.5 และ 6.0 mm) และสำหรับ อักษร Z หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดก่อน (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$) ยกตัวอย่างการระบุชื่อตัวอย่างทดสอบ เช่น SR25 - 4.5 - 0.05 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมมีกำลังอัดประลัย 25 MPa ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 4.5 mm โดยมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$

จากรูปที่ 3.9 ตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของโดยตัวอย่างทดสอบมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 0.15 x 0.15 m ความสูง 0.30 m จำนวน 90 ตัวอย่าง และสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

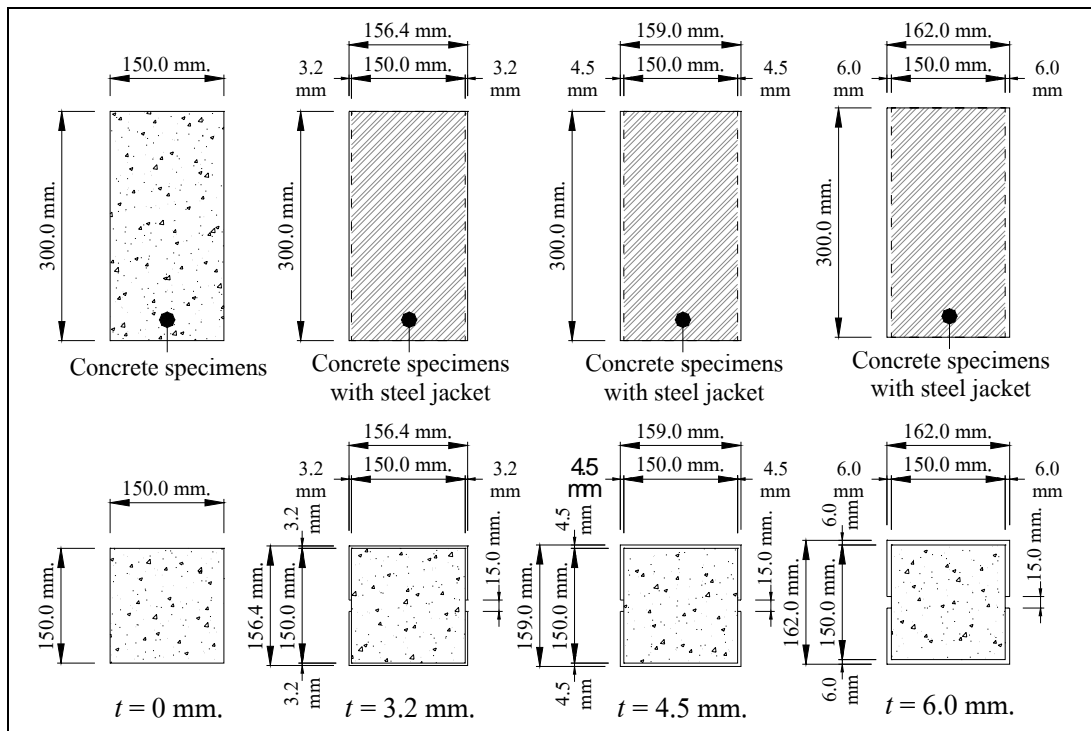
กลุ่มที่ 1 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน (อ้างอิง)

กลุ่มที่ 2 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่มที่ 3 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก
และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$

กลุ่มที่ 4 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก
และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.1 f'_{co}$



รูปที่ 3.9 แสดงแบบรายละเอียดตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัย

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	f'_{co} (MPa)	t (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ ในการโอบรัดก่อน (MPa)	จำนวน
1	CR18-0-0	18	-	-	3
	CR25-0-0	25	-	-	3
	CR32-0-0	32	-	-	3
2	SR18-3.2-0	18	3.2	0	3
	SR18-4.5-0	18	4.5	0	3
	SR18-6.0-0	18	6.0	0	3
	SR25-3.2-0	25	3.2	0	3
	SR25-4.5-0	25	4.5	0	3
	SR25-6.0-0	25	6.0	0	3
	SR32-3.2-0	32	3.2	0	3
	SR32-4.5-0	32	4.5	0	3
	SR32-6.0-0	32	6.0	0	3
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	18	3.2	0.05 f'_{co}	3
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	18	4.5	0.05 f'_{co}	3
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	18	6.0	0.05 f'_{co}	3
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	25	3.2	0.05 f'_{co}	3
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	25	4.5	0.05 f'_{co}	3
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	25	6.0	0.05 f'_{co}	3
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	32	3.2	0.05 f'_{co}	3
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	32	4.5	0.05 f'_{co}	3
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	32	6.0	0.05 f'_{co}	3
4	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	18	3.2	0.1 f'_{co}	3
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	18	4.5	0.1 f'_{co}	3
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	18	6.0	0.1 f'_{co}	3
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	25	3.2	0.1 f'_{co}	3
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	25	4.5	0.1 f'_{co}	3
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	25	6.0	0.1 f'_{co}	3
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	32	3.2	0.1 f'_{co}	3
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	32	4.5	0.1 f'_{co}	3
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	32	6.0	0.1 f'_{co}	3
รวมตัวอย่างทดสอบ					90

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s/A_g$ (%)	คุณสมบัติของคอนกรีต			คุณสมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1	CR18-0-0	3	-	-	-	22500	17.19	20.32	-	-	-
	CR25-0-0	3	-	-	-	22500	24.55	23.29	-	-	-
	CR32-0-0	3	-	-	-	22500	30.84	26.09	-	-	-
2	SR18-3.2-0	3	46.9	-	8.02	22500	17.19	20.32	1961	323.30	203.43
	SR18-4.5-0	3	33.3	-	11.00	22500	17.19	20.32	2781	324.85	204.66
	SR18-6.0-0	3	25.0	-	14.27	22500	17.19	20.32	3744	325.48	194.90
	SR25-3.2-0	3	46.9	-	8.02	22500	24.55	23.29	1961	323.30	203.43
	SR25-4.5-0	3	33.3	-	11.00	22500	24.55	23.29	2781	324.85	204.66
	SR25-6.0-0	3	25.0	-	14.27	22500	24.55	23.29	3744	325.48	194.90
	SR32-3.2-0	3	46.9	-	8.02	22500	30.84	26.09	1961	323.30	203.43
	SR32-4.5-0	3	33.3	-	11.00	22500	30.84	26.09	2781	324.85	204.66
	SR32-6.0-0	3	25.0	-	14.27	22500	30.84	26.09	3744	325.48	194.90

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s / A_g$ (%)	คุณสมบัติของคอนกรีต			คุณสมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	3	46.9	0.90	8.02	22500	17.19	20.32	1961	323.30	203.43
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	3	33.3	0.90	11.00	22500	17.19	20.32	2781	324.85	204.66
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	3	25.0	0.90	14.27	22500	17.19	20.32	3744	325.48	194.90
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	3	46.9	1.25	8.02	22500	24.55	23.29	1961	323.30	203.43
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	3	33.3	1.25	11.00	22500	24.55	23.29	2781	324.85	204.66
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	3	25.0	1.25	14.27	22500	24.55	23.29	3744	325.48	194.90
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	3	46.9	1.60	8.02	22500	30.84	26.09	1961	323.30	203.43
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	3	33.3	1.60	11.00	22500	30.84	26.09	2781	324.85	204.66
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	3	25.0	1.60	14.27	22500	30.84	26.09	3744	325.48	194.90

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s/A_g$ (%)	คุณสมบัติของคอนกรีต			คุณสมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
4	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	3	46.9	1.8	8.02	22500	17.19	20.32	1961	323.30	203.43
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	3	33.3	1.8	11.00	22500	17.19	20.32	2781	324.85	204.66
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	3	25.0	1.8	14.27	22500	17.19	20.32	3744	325.48	194.90
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	3	46.9	2.5	8.02	22500	24.55	23.29	1961	323.30	203.43
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	3	33.3	2.5	11.00	22500	24.55	23.29	2781	324.85	204.66
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	3	25.0	2.5	14.27	22500	24.55	23.29	3744	325.48	194.90
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	3	46.9	3.2	8.02	22500	30.84	26.09	1961	323.30	203.43
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	3	33.3	3.2	11.00	22500	30.84	26.09	2781	324.85	204.66
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	3	25.0	3.2	14.27	22500	30.84	26.09	3744	325.48	194.90

■ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

สำหรับการระบุชื่อของ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม ได้ถูกกำหนดในรูปแบบ AB - C - D โดยอักษร A หมายถึงชนิดของตัวอย่างทดสอบ (กำหนดให้ C หมายถึงตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง และ CS หมายถึงตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก) อักษร B หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกำลังอัดประลัย 3 ค่า คือ 18 25 และ 32 MPa) อักษร C หมายถึง ความหนาของปลอกเหล็กที่โอบรัดตัวอย่างทดสอบ (ความหนาของปลอกเหล็กมี 3 ค่า คือ 3.2 4.5 และ 6.0 mm) และสำหรับ อักษร D หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดก่อน (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$) ยกตัวอย่างการระบุชื่อตัวอย่างทดสอบ เช่น CS25 - 45 - 0.05 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมมีกำลังอัดประลัย 25 MPa ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 4.5 mm โดยมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$

จากรูปที่ 3.10 ตารางที่ 3.3 และ ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m สูง 0.30 m จำนวน 90 ตัวอย่าง และสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน (อ้างอิง)

กลุ่มที่ 2 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

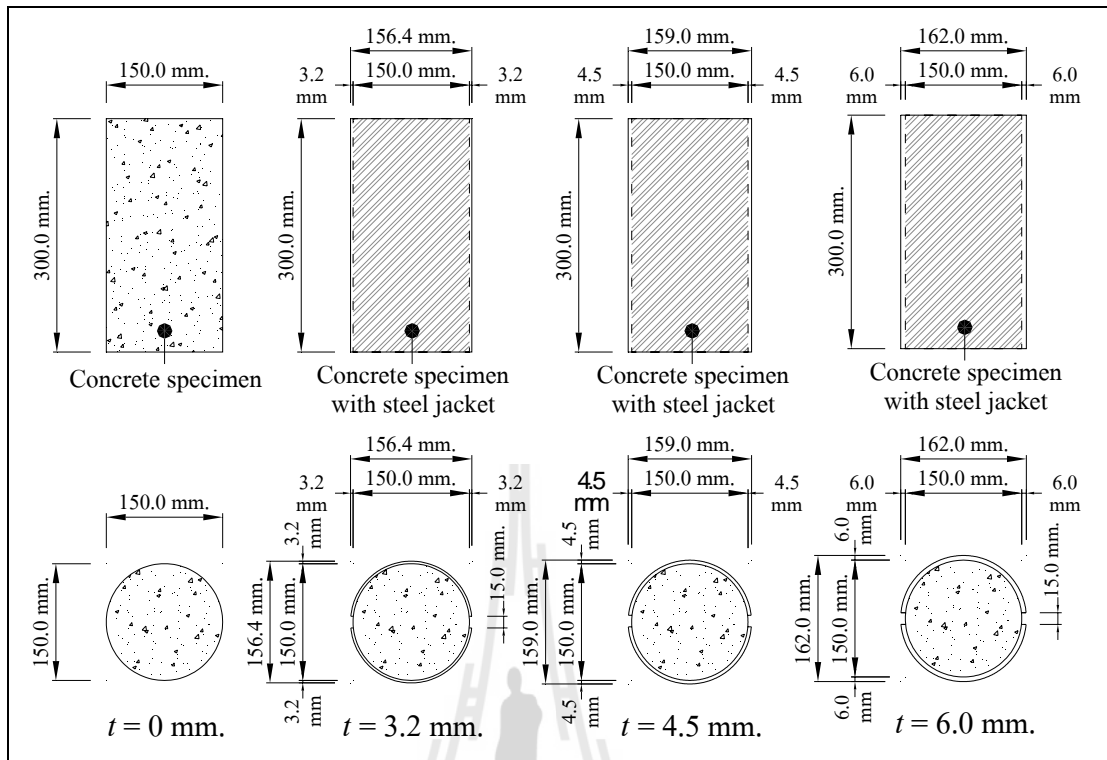
ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่มที่ 3 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$

กลุ่มที่ 4 คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.08 f'_{co}$



รูปที่ 3.10 แสดงแบบรายละเอียดตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ใช้ในงานวิจัย

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	f'_{co} (MPa)	t (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ ในการโอบรัดก่อน (MPa)	จำนวน
1	C18-0-0	18	-	-	3
	C25-0-0	25	-	-	3
	C32-0-0	32	-	-	3
2	S18-3.2-0	18	3.2	0	3
	S18-4.5-0	18	4.5	0	3
	CS18-6.0-0	18	6.0	0	3
	CS25-3.2-0	25	3.2	0	3
	CS25-4.5-0	25	4.5	0	3
	CS25-6.0-0	25	6.0	0	3
	CS32-3.2-0	32	3.2	0	3
	CS32-4.5-0	32	4.5	0	3
	CS32-6.0-0	32	6.0	0	3
3	CS18-3.2-0.05 f'_{co}	18	3.2	0.05 f'_{co}	3
	CS18-4.5-0.05 f'_{co}	18	4.5	0.05 f'_{co}	3
	CS18-6.0-0.05 f'_{co}	18	6.0	0.05 f'_{co}	3
	CS25-3.2-0.05 f'_{co}	25	3.2	0.05 f'_{co}	3
	CS25-4.5-0.05 f'_{co}	25	4.5	0.05 f'_{co}	3
	CS25-6.0-0.05 f'_{co}	25	6.0	0.05 f'_{co}	3
	CS32-3.2-0.05 f'_{co}	32	3.2	0.05 f'_{co}	3
	CS32-4.5-0.05 f'_{co}	32	4.5	0.05 f'_{co}	3
	CS32-6.0-0.05 f'_{co}	32	6.0	0.05 f'_{co}	3
4	CS18-3.2-0.08 f'_{co}	18	3.2	0.08 f'_{co}	3
	CS18-4.5-0.08 f'_{co}	18	4.5	0.08 f'_{co}	3
	CS18-6.0-0.08 f'_{co}	18	6.0	0.08 f'_{co}	3
	CS25-3.2-0.08 f'_{co}	25	3.2	0.08 f'_{co}	3
	CS25-4.5-0.08 f'_{co}	25	4.5	0.08 f'_{co}	3
	CS25-6.0-0.08 f'_{co}	25	6.0	0.08 f'_{co}	3
	CS32-3.2-0.08 f'_{co}	32	3.2	0.08 f'_{co}	3
	CS32-4.5-0.08 f'_{co}	32	4.5	0.08 f'_{co}	3
	CS32-6.0-0.08 f'_{co}	32	6.0	0.08 f'_{co}	3
รวมตัวอย่างทดสอบ					90

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมและคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้อง

กลุ่ม ที่	ตัวอย่างทดสอบ	จำนวน	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s/A_g$ (%)	สมบัติของคอนกรีต			สมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1	C18-0-0	3	-	-	-	17671	19.9	20.4		-	-
	C25-0-0	3	-	-	-	17671	26.7	24.2		-	-
	C32-0-0	3	-	-	-	17671	31.9	27.5		-	-
2	CS18-32-0	3	46.9	0.90	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0	3	46.9	1.25	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0	3	46.9	1.60	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0	3	33.3	0.90	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0	3	33.3	1.25	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0	3	33.3	1.60	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0	3	25.0	0.90	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0	3	25.0	1.25	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
	CS32-60-0	3	25.0	1.60	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมและคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

กลุ่ม ที่	ตัวอย่างทดสอบ	จำนวน	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s/A_g$ (%)	สมบัติของคอนกรีต			สมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
3	CS18-32-0.05	3	46.9	0.90	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0.05	3	46.9	1.25	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0.05	3	46.9	1.60	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0.05	3	33.3	0.90	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0.05	3	33.3	1.25	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0.05	3	33.3	1.60	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0.05	3	25.0	0.90	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0.05	3	25.0	1.25	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
	CS32-60-0.05	3	25.0	1.60	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมและคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

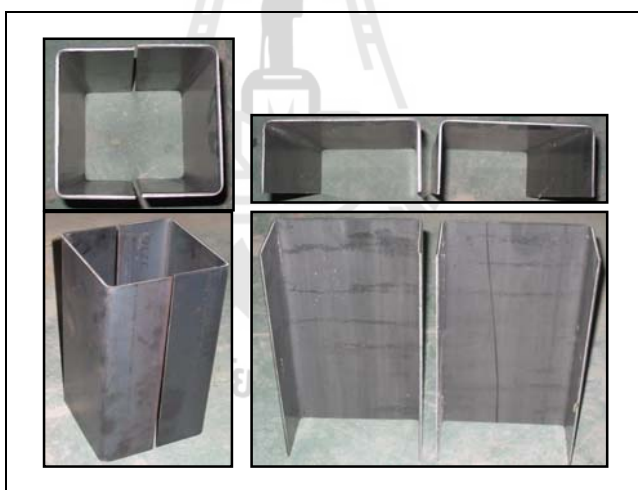
กลุ่ม ที่	ตัวอย่างทดสอบ	จำนวน	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s/A_g$ (%)	สมบัติของคอนกรีต			สมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (MPa)
4	CS18-32-0.08	3	46.9	0.90	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0.08	3	46.9	1.25	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0.08	3	46.9	1.60	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0.08	3	33.3	0.90	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0.08	3	33.3	1.25	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0.08	3	33.3	1.60	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0.08	3	25.0	0.90	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0.08	3	25.0	1.25	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
	CS32-60-0.08	3	25.0	1.60	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5

3) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ตัดปลอกเหล็ก (Steel jacket) โดยการนำเหล็กแผ่นโครงสร้างแบบเย็น (Cold formed) โดยมีความหนาของปลอกเหล็ก 3 ขนาดคือ 3.2 4.5 และ 6.0 mm ขนาดแสดงตามแบบที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 - 3.12

- i. ในหน้าตัดสี่เหลี่ยมนำเหล็กแผ่นดังกล่าวมาพับเป็นสองส่วน ขนาด 75 x 150 x 75 mm ความสูง 300 mm จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นนำมาประกบกันเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้วเชื่อมติดกันเพื่อนำไปเป็นแบบหล่อชั่วคราวแก่ตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัย

- ii. ในหน้าตัดกลมม้วนเหล็กแผ่นดังกล่าวเป็นรูปครึ่งวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ความสูง 300 mm จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นนำมาประกบกันมีลักษณะเป็นทรงกระบอกแล้วเชื่อมติดกันเพื่อนำไปเป็นแบบหล่อชั่วคราวแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.12



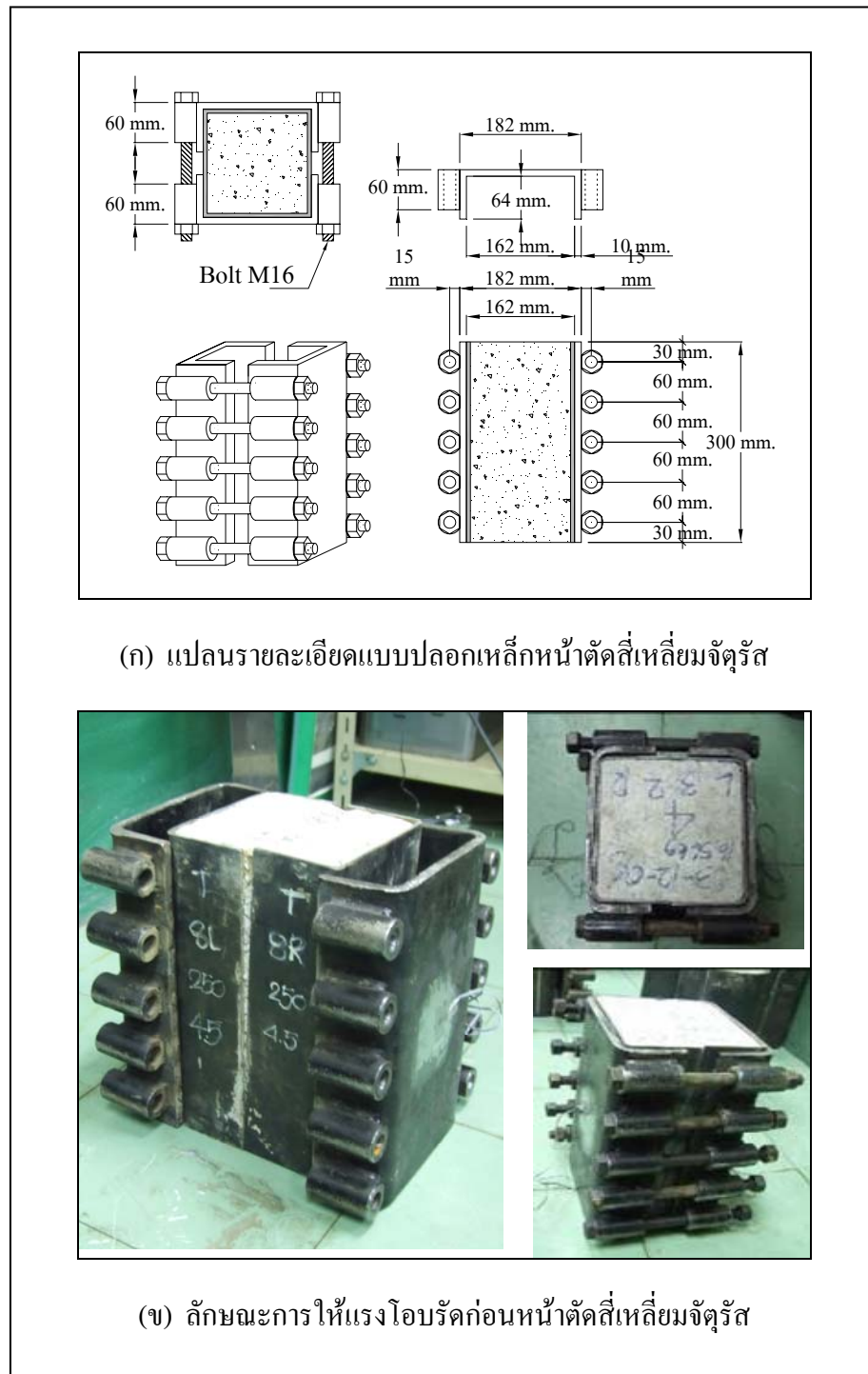
รูปที่ 3.12 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กหน้าตัดกลมที่ใช้ในงานวิจัย

- จากนั้นนำปลอกเหล็กที่ใช้เป็นแบบของเสารูปตัวซี 2 ชิ้นประกบกันพร้อมกับทำการพันแบบให้ติดกันด้วยเทปกาวเพื่อใช้เป็นแบบชั่วคราว แล้วนำมาตั้งบนพื้นเรียบและทำการจัดตั้งของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นเทคอนกรีตผสมเสร็จลงในปลอกเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.13
- เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 24 ชั่วโมงแล้วนั้น ทำการถอดแบบและเขียนหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีตแล้วนำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตไปทำการบ่มชื้น โดยใช้กระสอบชุบน้ำคลุมเป็นเวลา 28 วัน
- ภายหลังจากการบ่มตัวอย่างทดสอบครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำปลอกเหล็กรูปตัวซีที่มีลักษณะที่ได้กำหนดไว้ทั้ง 2 ส่วนประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต จากนั้นนำแบบปลอกเหล็กมาประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบและนำนอตที่ได้ทำการออกแบบไว้มาช่วยยึดปลอกเหล็กรูปตัวซีเข้าหากัน โดยที่ระยะที่นอตยึดนั้นจะยึดตามระยะที่ได้กำหนดไว้ทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กโดยที่พิจารณาหน่วยแรงสำหรับการขันสลักเกลียวเป็น 2 ค่ากรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส คือ $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) และ (ข) และกรณีหน้าตัดกลม คือ $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข)
- เมื่อทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กแล้วนั้นขณะที่นอตช่วยยึดปลอกเหล็กอยู่นั้นทำการเชื่อมไฟฟ้าตามรอยต่อในแนวแกนโดยใช้ Machine welding หลังจากนั้นถอดนอตออกและทำการเชื่อมปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบตลอดแนวอีกครั้งโดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญเพื่อเตรียมทำการทดสอบ

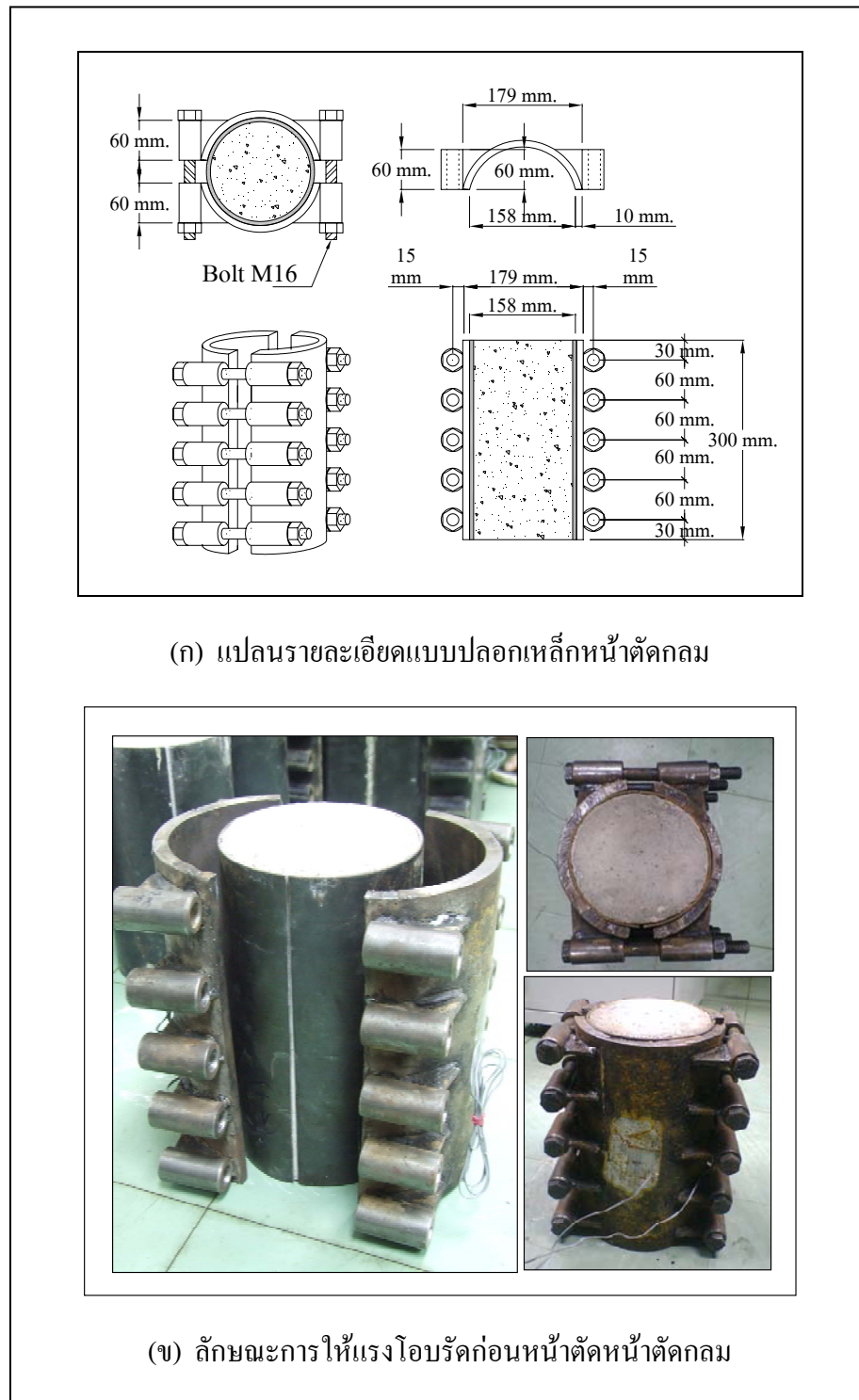
- ก่อนการทดสอบ 1 วันทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) จำนวน 2 ตัวลงบนพื้นผิวของเสาที่ใช้ทดสอบและพื้นผิวของปลอกเหล็กตรงบริเวณกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบในแนวแกนและในแนวขวางเพื่อตรวจสอบความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวขวางของตัวอย่างทดสอบ ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน



รูปที่ 3.13 การหล่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีต



รูปที่ 3.14 แสดงรายละเอียดบล็อกเหล็กอัดแรงของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



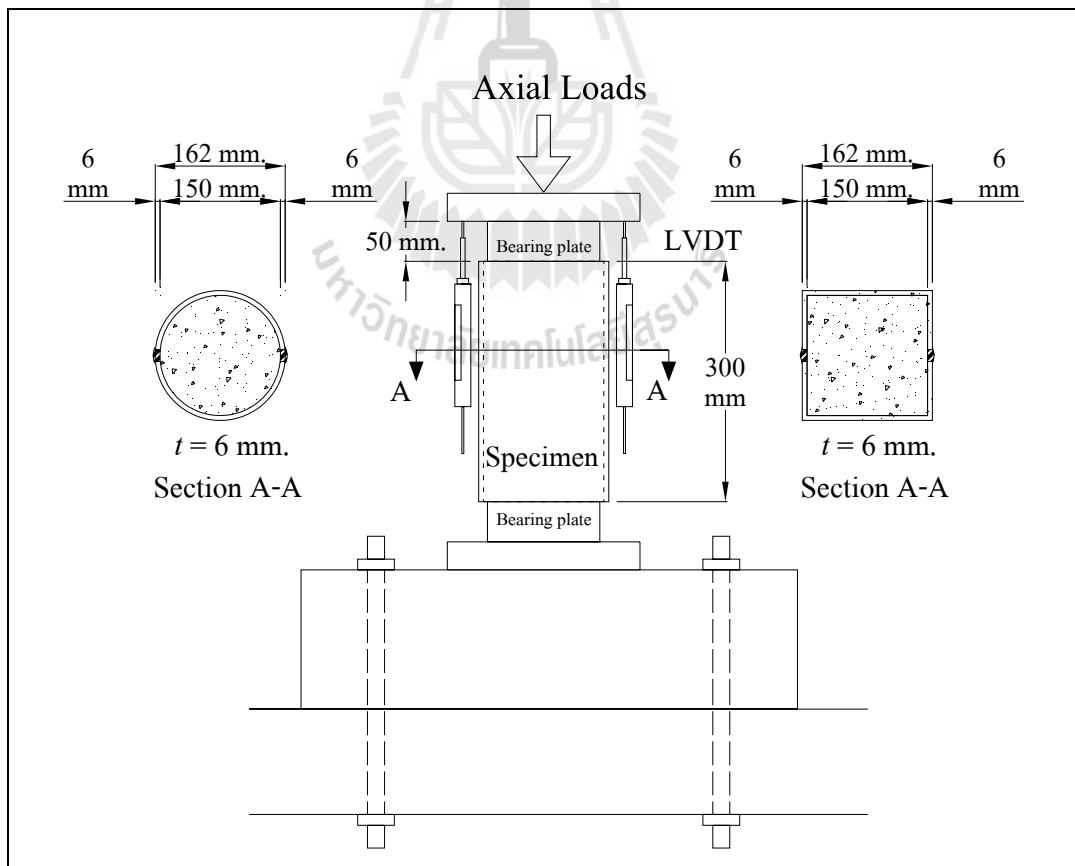
รูปที่ 3.15 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กอัดแรงของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดวงกลม

4) ขั้นตอนการทดสอบ

- ปรับฐานรองรับตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน
- ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง UTM โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบถูกรองรับโดยแผ่นรับแรงแบกทาน (Bearing plate) หนา 50 mm ติดตั้ง LVDT ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกด (Crosshead) ของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะการหดของตัวอย่างทดสอบในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17
- จากนั้นต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้ากับ Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อเก็บข้อมูล
- เตรียมตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือให้พร้อมทดสอบทำการ Preloading โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 50 kN
- จากนั้น Unloading เซตศูนย์เครื่องมือวัดต่าง ๆ และทำการบันทึกค่าต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นการทดสอบตัวอย่างทดสอบ
- จากนั้นเพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่อง UTM อย่างช้า ๆ ประมาณ 1 mm/min และทำการสังเกต อีกทั้งทำการบันทึกพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบควบคู่ด้วย ได้แก่ ค่าแรงกดอัดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและการหดตัวในแนวแกนเริ่มเป็นเส้นโค้ง และค่าแรงกดอัดที่ผนังของปลอกเหล็กเริ่มเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่
- ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ ทำการสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ
- ทำการคำนวณหา หน่วยแรง ความเครียด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 3.16 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.17 แบบจำลองการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

3.3 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) ที่ถูกโอบรัดก่อน

ด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารขนาดเล็ก เช่น บ้าน ทาวเฮาส์ และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น โดยเป็นอาคารที่มีจำนวนมากสุดในประเทศไทย และเป็นลักษณะเสาสั้นออกแบบตามมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 ในส่วนของลักษณะการให้แรงกระทำแก่ Tubed RC column มีลักษณะเช่นเดียวกับการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่โอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 คือให้แรงกระทำโดยตรงต่อแกนคอนกรีต และจากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2 พบว่า ขนาดของตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมที่นำมาศึกษาต่อการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน คือ

- สำหรับขนาดของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดหน้าตัด 0.15×0.15 m ความสูง 0.75 m คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ค่า ดังนี้ 18 25 และ 32 MPa ปลอกเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ มีความหนา 6.0 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.1 f'_{co}$ ซึ่งค่าดังกล่าวมีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาต่อใน Tubed RC column

- สำหรับขนาดของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม มีขนาดหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m ความสูง 0.75 m คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ค่า ดังนี้ 18 25 และ 32 MPa ปลอกเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ มีความหนา 4.5 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ ซึ่งค่าดังกล่าวมีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาต่อใน Tubed RC column

2) จุดประสงค์การทดสอบ

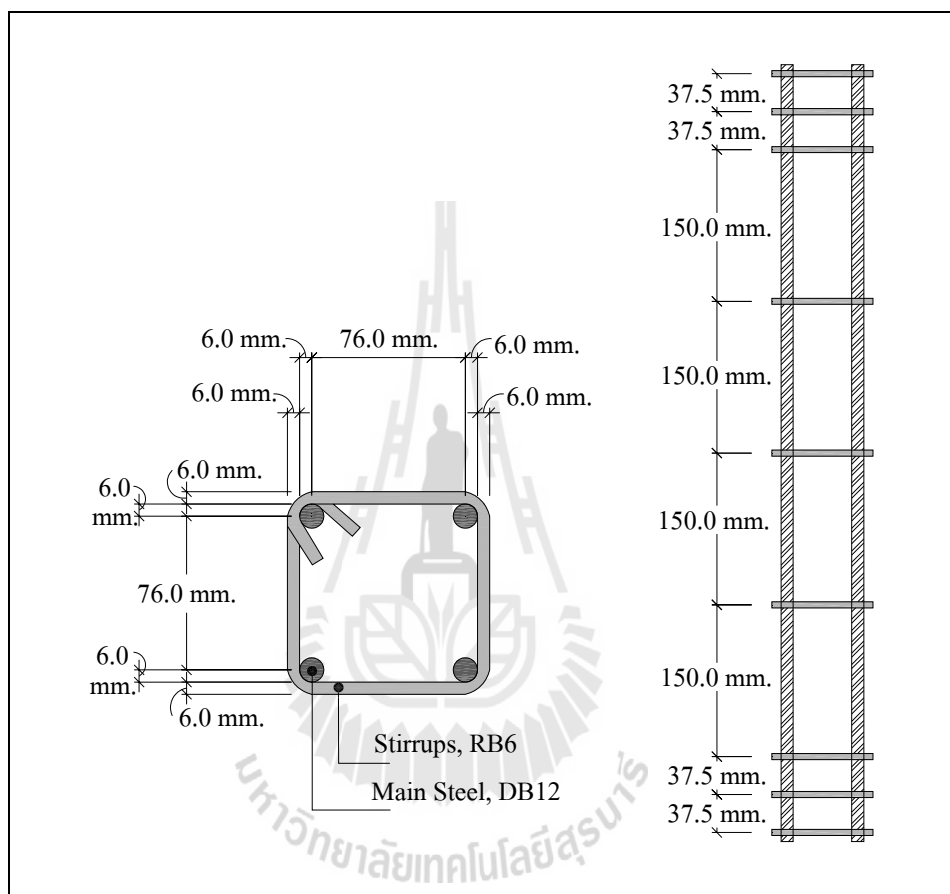
- เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้ปลอกเหล็ก (Steel jacket) ที่มีผลต่อกำลัง (Strength) และความเหนียว (Ductility) ของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

- เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) รวมทั้งลักษณะของการวิบัติในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

3) ตัวอย่างทดสอบ

ขนาดหน้าตัดของเสาตัวอย่างทดสอบกำหนดโดยสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท.1008 - 38 (ตามข้อกำหนดที่ระบุของ ว.ส.ท. ข้อที่ 4314(ข)) และสมการแบบจำลองของ ACI committee 440 (2002) และเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ได้กับความสามารถของเครื่องมือทดสอบที่มีในห้องปฏิบัติการและการเลือกขนาดที่เหมาะสม ซึ่งเสาดังกล่าวมีค่า B/t ที่ผ่านข้อกำหนดความหนาของ ว.ส.ท. ข้อที่ 4314(ฉ) และ AISC LRFD และมี $L/B = 5.0$ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้

งานของเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete - filled steel tube column) ของขนาดอาคารเดี่ยว และอาคารสูงปานกลางในสหรัฐอเมริกา (Schneider, S.P., 1998) และมีปริมาณของเหล็กปลอกในแนวแกน $\rho_{sc} > 4\%$ ตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ AISC LRFD (AISC, 1994) ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 รายละเอียดของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column

■ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สำหรับการระบุชื่อของ ตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้ถูกกำหนดในรูปแบบ AX - Y - Z โดยอักษร A หมายถึงชนิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (กำหนดให้ CRC หมายถึง เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง และ SRC หมายถึง เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก) อักษร X หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกำลังอัดประลัย 3 ค่า คือ 18 25 และ 32MPa) อักษร Y หมายถึง ความหนาของปลอกเหล็กที่โอบรัดตัวอย่างทดสอบ (ความหนาของปลอกเหล็ก

มี 1 ค่า คือ 6.0 mm) และสำหรับ อักษร Z หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดก่อน (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.1 f'_{co}$) ยกตัวอย่างการระบุชื่อตัวอย่างทดสอบ เช่น SRC25 - 6.0 - 0.1 หมายถึง ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีกำลังอัดประลัย 25 MPa ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 6.0 mm โดยมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$

จากรูปที่ 3.19 ตารางที่ 3.5 และ ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 0.15 x 0.15 m ความสูง 0.75 m จำนวน 18 ตัวอย่าง และสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 คือ เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีวัสดุโอบรัด

จำนวน 6 ตัวอย่าง ซึ่งใช้เป็นเสาตัวอย่างทดสอบอ้างอิง

(Control RC columns)

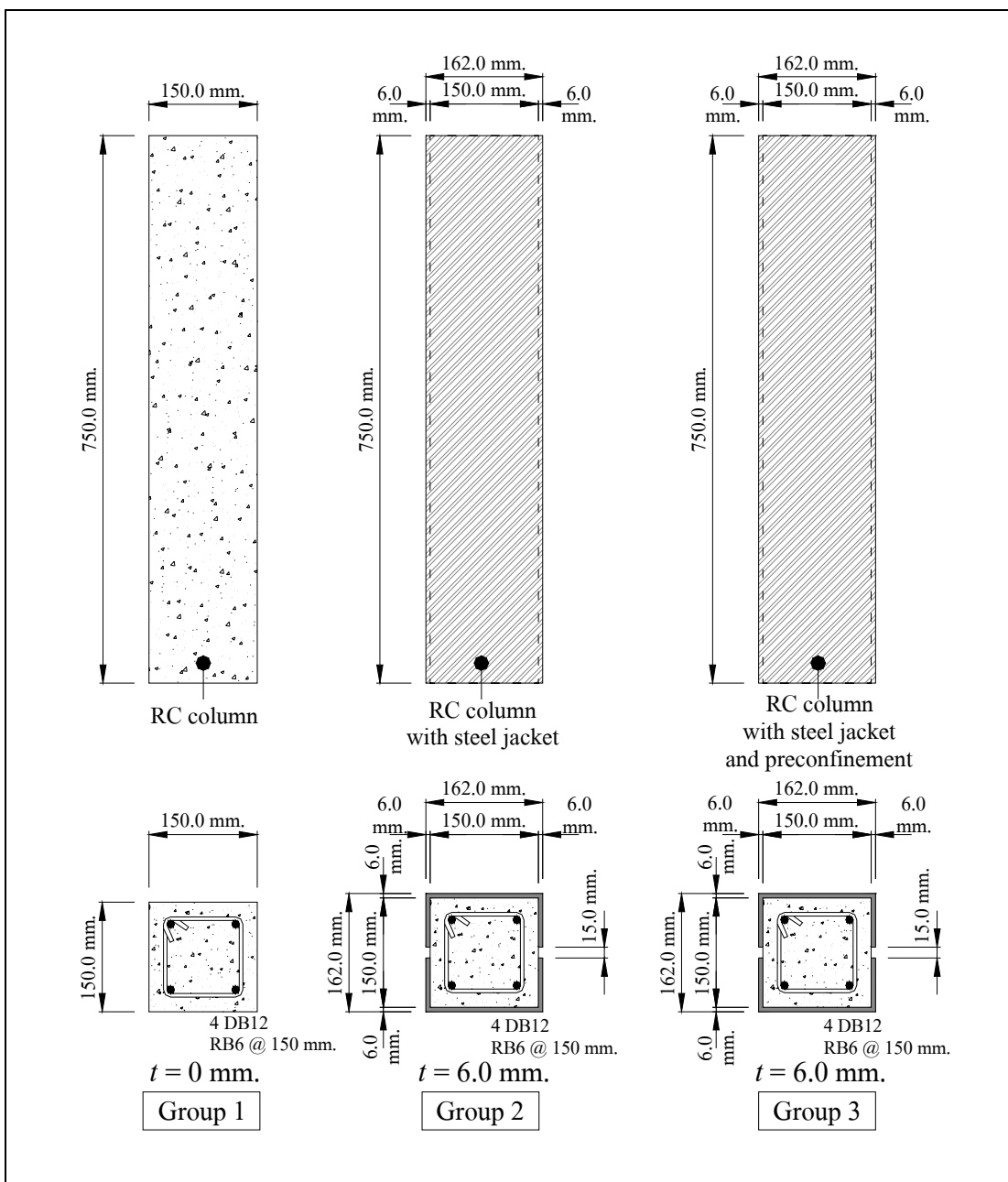
กลุ่มที่ 2 คือ เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก

โดยไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนจำนวน 6 ตัวอย่าง

กลุ่มที่ 3 คือ เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก

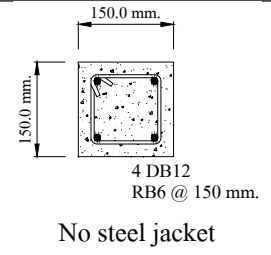
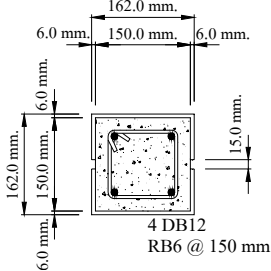
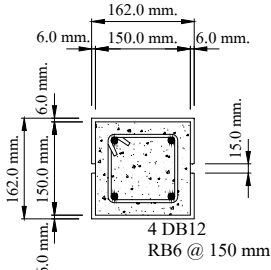
และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$ จำนวน 6 ตัวอย่าง





รูปที่ 3.19 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัย

กลุ่มที่	ตัวอย่างทดสอบ	f'_{co} (MPa)	t (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ ในการโอบรัดก่อน (MPa)	จำนวน	วัสดุโอบรัด (Confined materials)	รูปหน้าตัด (Cross section)
1	CRC18-0-0	18	-	-	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	 <p>150.0 mm. 150.0 mm. 4 DB12 RB6 @ 150 mm. No steel jacket</p>
	CRC25-0-0	25	-	-	2		
	CRC32-0-0	32	-	-	2		
2	SRC18-6.0-0	18	6.0	0	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก + ปลอกเหล็ก	 <p>162.0 mm. 6.0 mm. 150.0 mm. 6.0 mm. 6.0 mm. 6.0 mm. 150.0 mm. 15.0 mm. 4 DB12 RB6 @ 150 mm.</p>
	SRC25-6.0-0	25	6.0	0	2		
	SRC32-6.0-0	32	6.0	0	2		
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	18	6.0	0.1 f'_{co}	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก + ปลอกเหล็ก + หน่วยแรงโอบรัดก่อน	 <p>162.0 mm. 6.0 mm. 150.0 mm. 6.0 mm. 6.0 mm. 6.0 mm. 150.0 mm. 15.0 mm. 4 DB12 RB6 @ 150 mm.</p>
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	25	6.0	0.1 f'_{co}	2		
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	32	6.0	0.1 f'_{co}	2		
รวมตัวอย่างทดสอบ					18		

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง

กลุ่ม ที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t ratio	L/B ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s / A_g$ (%)	คอนกรีต		ปลอกเหล็ก		เหล็กเสริม DB12		เหล็กปลอก RB6	
							A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)
1	CRC18-0-0	2	-	-	-	2.0	22500	19.6	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
	CRC25-0-0	2	-	-	-	2.0	22500	26.3	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
	CRC32-0-0	2	-	-	-	2.0	22500	32.6	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
2	SRC18-6.0-0	2	33.3	5.0	-	14.27	22500	19.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC25-6.0-0	2	33.3	5.0	-	14.27	22500	26.3	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC32-6.0-0	2	33.3	5.0	-	14.27	22500	32.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	2	33.3	5.0	1.80	14.27	22500	19.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	2	33.3	5.0	2.50	14.27	22500	26.3	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	2	33.3	5.0	3.20	14.27	22500	32.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43



■ **เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม**

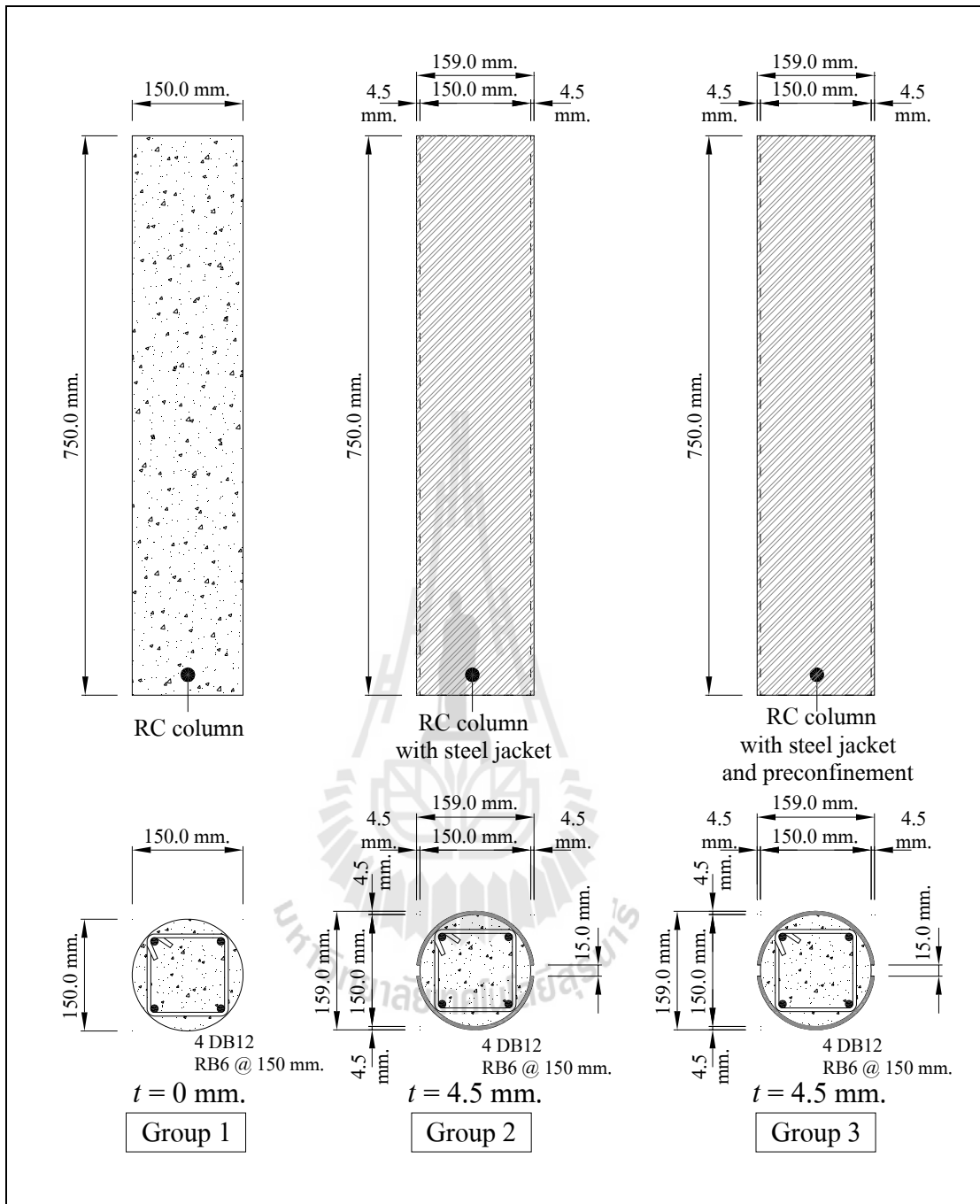
สำหรับการระบุชื่อของ ตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม ได้ถูกกำหนดในรูปแบบ EB - C - D โดยอักษร E หมายถึงชนิดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (กำหนดให้ C หมายถึง เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง และ CST หมายถึง เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก) อักษร B หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกำลังอัดประลัย 3 ค่า คือ 18 25 และ 32MPa) อักษร C หมายถึง ความหนาของปลอกเหล็กที่โอบรัดตัวอย่างทดสอบ (ความหนาของปลอกเหล็กมี 1 ค่า คือ 4.5 mm) และสำหรับ อักษร D หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดก่อน (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$) ยกตัวอย่างการระบุชื่อตัวอย่างทดสอบ เช่น CST25 - 4.5 - 0.05 หมายถึงตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม มีกำลังอัดประลัย 25 MPa ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 4.5 mm โดยมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$

จากรูปที่ 3.20 ตารางที่ 3.7 และ ตารางที่ 3.8 แสดงรายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m ความสูง 0.75 m จำนวน 18 ตัวอย่าง และสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 คือ เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีวัสดุโอบรัด
จำนวน 6 ตัวอย่าง ซึ่งใช้เป็นเสาตัวอย่างทดสอบอ้างอิง
(Control RC columns)

กลุ่มที่ 2 คือ เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก
โดยไม่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนจำนวน 6 ตัวอย่าง

กลุ่มที่ 3 คือ เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก
และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ จำนวน 6 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.20 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลม

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลมที่ใช้ในงานวิจัย

กลุ่มที่	ตัวอย่างทดสอบ	f'_{co} (MPa)	t (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ ในการโอบรัดก่อน (MPa)	จำนวน	วัสดุโอบรัด (Confined materials)	รูปหน้าตัด (Cross section)
1	C18-0-0	18	-	-	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	 <p>150.0 mm. 150.0 mm. 4 DB12 RB6 @ 150 mm.</p>
	C25-0-0	25	-	-	2		
	C32-0-0	32	-	-	2		
2	CST18-4.5-0	18	4.5	0	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก + ปลอกเหล็ก	 <p>159.0 mm. 4.5 mm. 150.0 mm. 4.5 mm. 4.5 mm. 150.0 mm. 4.5 mm. 4.5 mm. 15.0 mm. 4 DB12 RB6 @ 150 mm.</p>
	CST25-4.5-0	25	4.5	0	2		
	CST32-4.5-0	32	4.5	0	2		
3	CST18-4.5-0.05 f'_{co}	18	4.5	0.05 f'_{co}	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก + ปลอกเหล็ก + หน่วยแรงโอบรัดก่อน	 <p>159.0 mm. 4.5 mm. 150.0 mm. 4.5 mm. 4.5 mm. 150.0 mm. 4.5 mm. 4.5 mm. 15.0 mm. 4 DB12 RB6 @ 150 mm.</p>
	CST25-4.5-0.05 f'_{co}	25	4.5	0.05 f'_{co}	2		
	CST32-4.5-0.05 f'_{co}	32	4.5	0.05 f'_{co}	2		
รวมตัวอย่างทดสอบ					18		

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง

กลุ่ม ที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t ratio	L/B ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} = A_s / A_g$ (%)	คอนกรีต		ปลอกเหล็ก		เหล็กเสริม DB12		เหล็กปลอก RB6	
							A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)
1	C18-0-0	2	-	-	-	2.0	17671	19.9	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
	C25-0-0	2	-	-	-	2.0	17671	26.7	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
	C32-0-0	2	-	-	-	2.0	17671	31.9	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
2	CST18-4.5-0	2	33.3	5.0	-	11.0	17671	19.9	2184.2	321.6	113.1	358.40	28.3	260.43
	CST25-4.5-0	2	33.3	5.0	-	11.0	17671	26.7	2184.2	321.6	113.1	358.40	28.3	260.43
	CST32-4.5-0	2	33.3	5.0	-	11.0	17671	31.9	2184.2	321.6	113.1	358.40	28.3	260.43
3	CST18-4.5-0-0.05 f'_{co}	2	33.3	5.0	0.90	11.0	17671	19.9	2184.2	321.6	113.1	358.40	28.3	260.43
	CST18-4.5-0-0.05 f'_{co}	2	33.3	5.0	1.25	11.0	17671	26.7	2184.2	321.6	113.1	358.40	28.3	260.43
	CST18-4.5-0-0.05 f'_{co}	2	33.3	5.0	1.60	11.0	17671	31.9	2184.2	321.6	113.1	358.40	28.3	260.43



4) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

โดยที่ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนดังนี้

- จัดเตรียมตัดปลอกเหล็ก (Steel jacket) โดยการนำเหล็กแผ่นโครงสร้างแบบเย็นนำมาพับเป็นสองส่วน สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้ความหนา 6.0 mm และสำหรับหน้าตัดกลมใช้ความหนา 4.5 mm จากนั้นนำมาประกบกันตามแบบที่กำหนด ให้มีความยาว 750 mm เพื่อนำมาใช้เป็นแบบในการหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบและใช้เป็นปลอกเหล็ก (Steel jacket) ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

- นำปลอกเหล็กที่ใช้เป็นแบบเสารูปตัวซี 2 ชั้นประกบกันพร้อมกับตีแบบยึดกันไว้เป็นแบบชั่วคราวแล้วนำมาตั้งบนพื้นเรียบและทำการจัดตั้งของเสา จากนั้นทำการเทคอนกรีตผสมเสร็จลงในปลอกเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.20

- เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 24 ชั่วโมง จัดทำการถอดแบบและเขียนหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีตแล้วนำเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไปทำการบ่มชื้น โดยใช้กระสอบชุบน้ำคลุมเป็นเวลา 28 วัน

- ภายหลังจากการบ่มตัวอย่างทดสอบครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำปลอกเหล็กรูปตัวซีที่มีลักษณะดังที่ได้กำหนดไว้แล้วทั้ง 2 ส่วนนำมาประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต จากนั้นจึงนำแบบปลอกเหล็กมาประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบและนำนอตที่ได้ทำการออกแบบไว้มาช่วยยึดปลอกเหล็กรูปตัวซีเข้าหากัน โดยที่ระยะที่นอตยึดนั้นจะยึดตามระยะที่ได้กำหนดไว้ทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กโดยที่ต้องพิจารณาหน่วยแรงสำหรับการขันสลักเกลียวที่ $0.1 f'_{co}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.21

- เมื่อทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กแล้วนั้นขณะที่นอตช่วยยึดปลอกเหล็กอยู่นั้นทำการเชื่อมไฟฟ้าตามรอยต่อในแนวแกน โดยใช้ Machine welding จากนั้นถอดนอตออกและทำการเชื่อมปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบตลอดแนวอีกครั้งหนึ่ง โดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญเพื่อเตรียมทำการทดสอบ

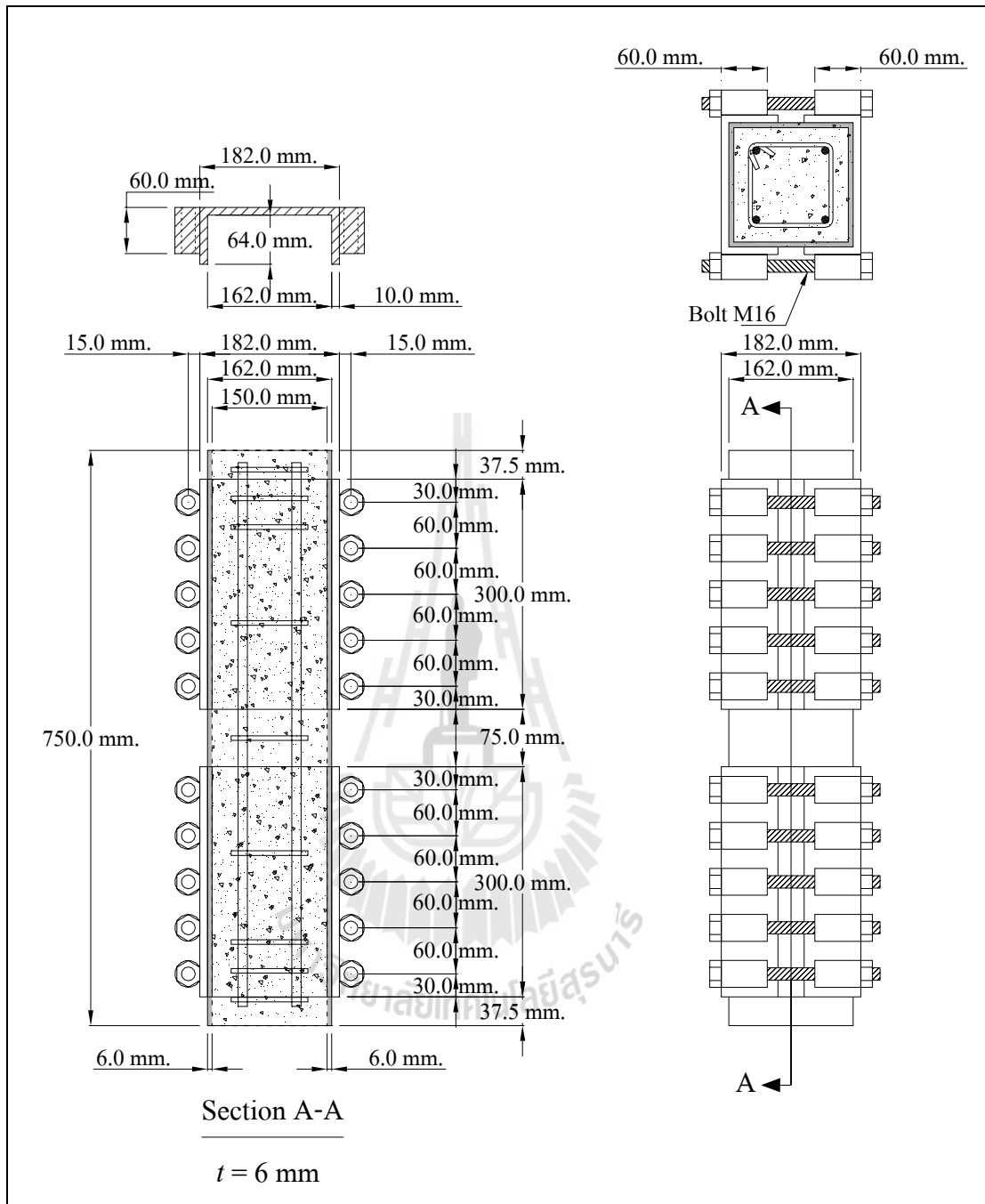
- ก่อนทดสอบ 1 วันทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) จำนวน 2 ตัวลงบนพื้นผิวของเสาที่ใช้ทดสอบและในบริเวณพื้นผิวของปลอกเหล็กตรงจุดกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบในแนวแกนและในแนวขวางเพื่อที่จะตรวจสอบความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวขวางที่ใช้ทดสอบและปลอกเหล็กภายใต้แรงกระทำในแนวแกน



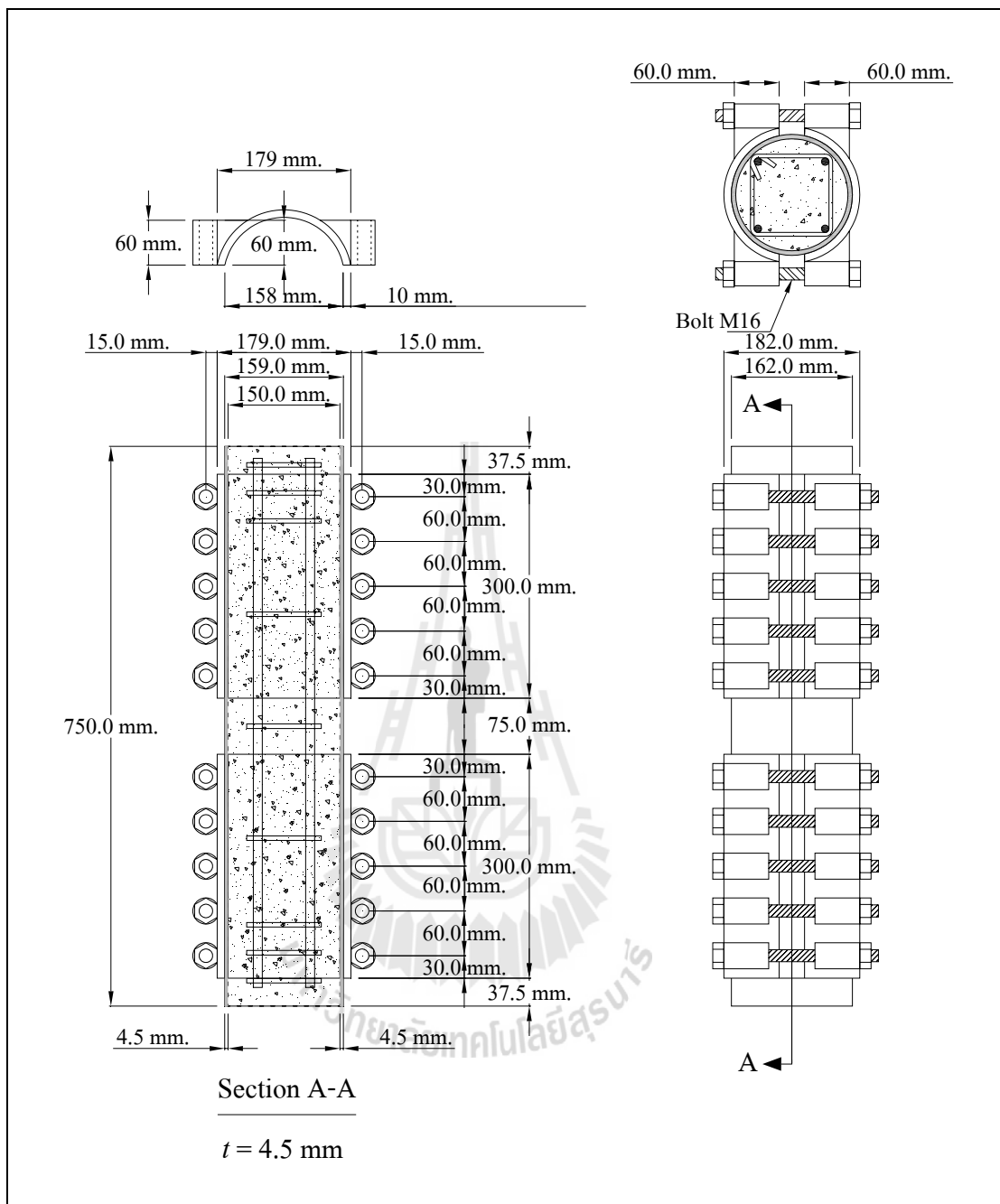
รูปที่ 3.21 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.22 การหล่อตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column



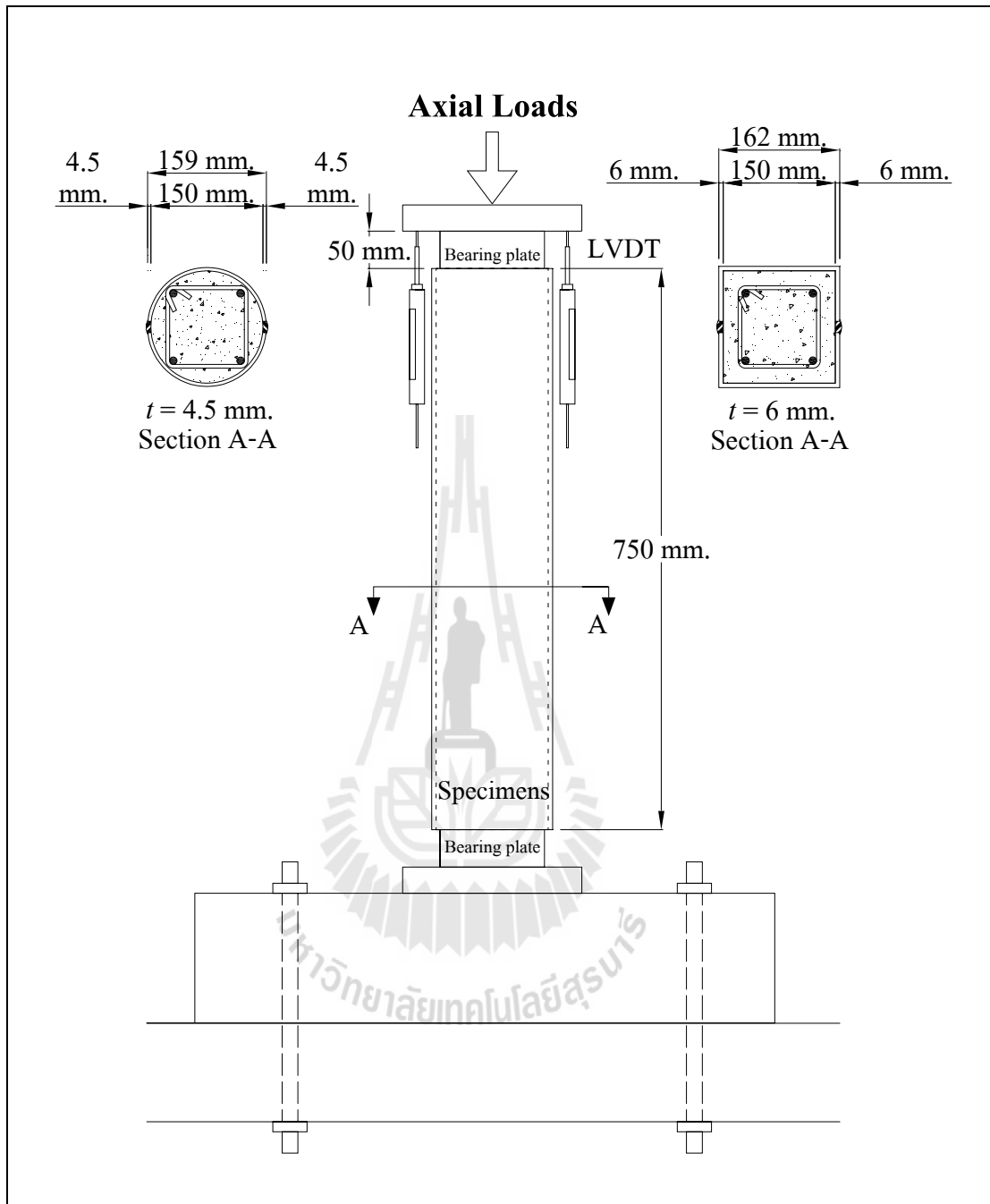
รูปที่ 3.23 รายละเอียดแบบแปลนเหล็กของ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ความหนา 6.0 mm และ ลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก



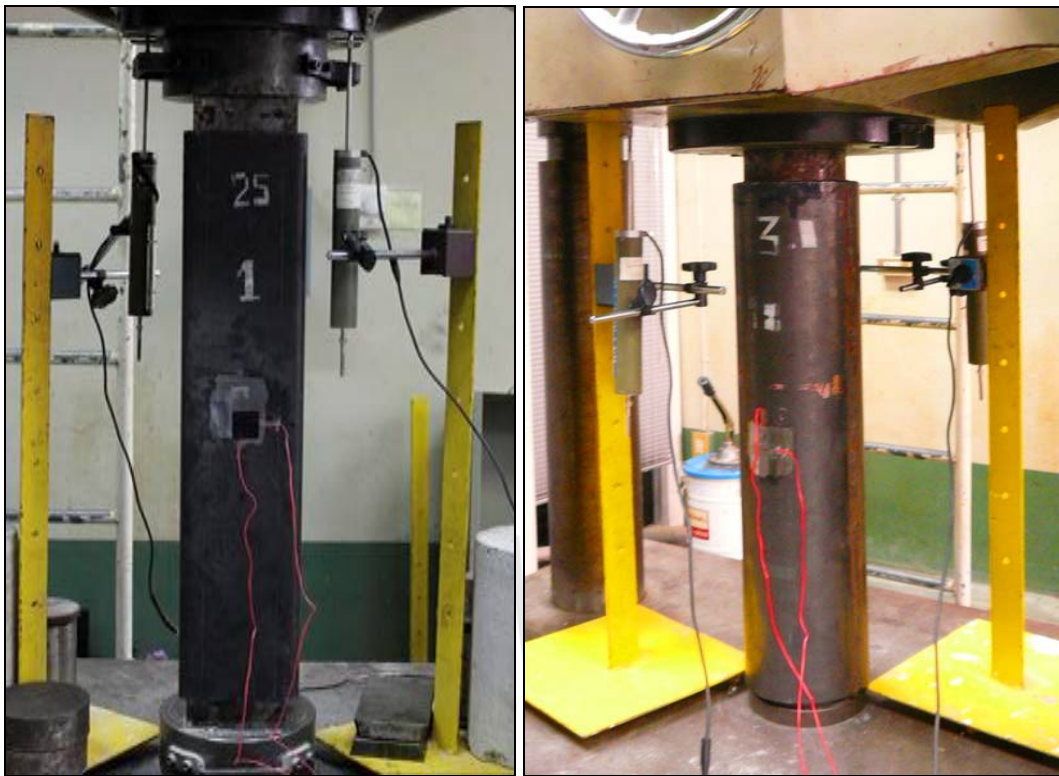
รูปที่ 3.24 รายละเอียดแบบแปลนของ Tubed RC column หน้าตัดกลม
 ที่ความหนา 6.0 mm และ ลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
 ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

5) ขั้นตอนการทดสอบ

- ปรับฐานรองรับตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน
- ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง UTM ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบถูกรองรับโดยแผ่นรับแรงแบกทาน (Bearing plate) หนา 50 mm ติดตั้ง LVDT ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกด (Crosshead) ของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะการหดของตัวอย่างทดสอบในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.22
- จากนั้นต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้า Data logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อเก็บข้อมูล
 - เมื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือพร้อมที่จะทดสอบแล้วทำการ Preloading โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 50 kN
 - จากนั้น Unloading เซตศูนย์เครื่องมือวัดต่าง ๆ และบันทึกค่าต่าง ๆ
 - เพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่อง UTM อย่างช้า ๆ ประมาณ 1 mm/min และทำการสังเกตและทำการบันทึกพฤติกรรมของเสา ซึ่งได้แก่ ค่าแรงกดอัดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและการหดตัวในแนวแกนเริ่มเป็นเส้นโค้งและค่าแรงกดอัดที่ผนังของปลอกเหล็กเริ่มเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่
 - ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปเรื่อย ๆ จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ทำการสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ
 - ทำการคำนวณหาหน่วยแรง ความเครียด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและหดตัวในแนวแกนของเสา Tube RC column



รูปที่ 3.25 แผนภาพแสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column เพื่อทดสอบแรงกดอัด



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column เพื่อทดสอบแรงกดอัด

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอถึง ผลของการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ คอนกรีต ปลอกเหล็ก และเหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากนั้นได้นำเสนอถึงพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ซึ่งประกอบด้วย พฤติกรรมในการรับแรงกดอัดในแนวแกน ลักษณะการวิบัติ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น รวมทั้งได้เปรียบเทียบกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบตามมาตรฐานออกแบบที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งนำเสนอ สมการที่เหมาะสมในการทำนายกำลัง รับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้ หน่วยแรงโอบรัดก่อน

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

4.1.1. ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอก ประกอบด้วย หน่วยแรงกดอัดสูงสุด และโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C39 และ ASTM C469 โดยคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC)

ในการแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตจะนำเสนอ 2 ส่วนคือ (1) กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย 19.3 26.0 และ 32.0 MPa และมีค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 20.5 24.2 และ 27.8 GPa ตามลำดับ (2) กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ยดังนี้ 19.9 26.7 และ 31.8 MPa และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยมีค่า 20.4 24.2 และ 27.6 GPa ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดสอบแสดงในรูปแบบที่ 4.1 และตารางที่ 4.1

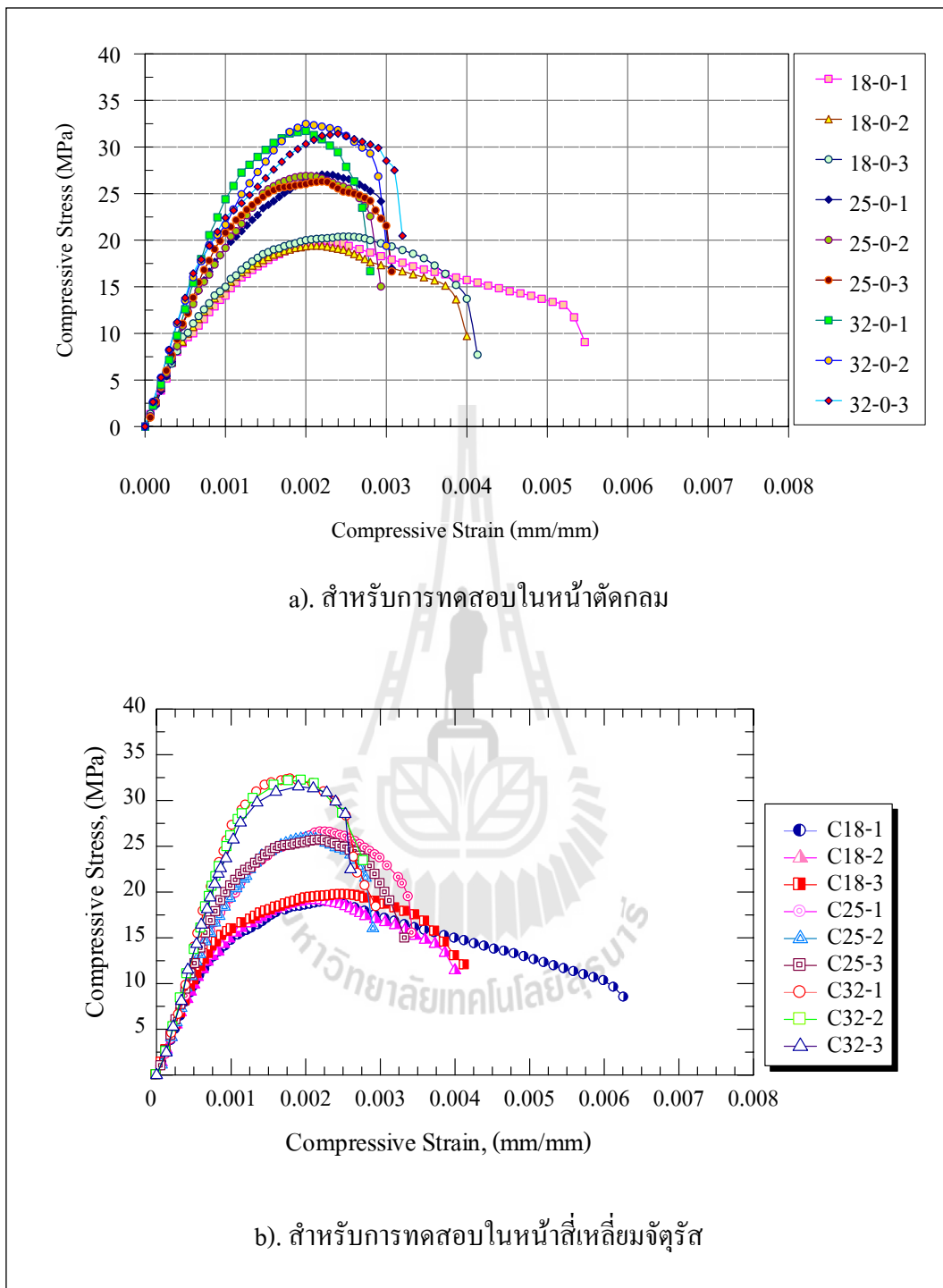
เมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำในแนวแกน ความชันของกราฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง (Linear elastic) จนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดมีค่าสูงขึ้นประมาณ 40-50% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด และเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro crack) เกิดขึ้นที่เนื้อคอนกรีต หลังจากนั้นความชันของกราฟจะมีค่าลดลงจนมีความชันเท่ากับศูนย์ ซึ่งพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในช่วงนี้จะเป็นแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) เมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำสูงสุดแล้ว ความสามารถในการรับแรงกระทำจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และรอยแตกร้าวจะมีการขยายขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

สำหรับการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนร่วมกัน แต่ลักษณะการวิบัติเกิดจากหน่วยดึงและหน่วยแรงเฉือนในเนื้อคอนกรีต โดยมีระนาบการวิบัติทำมุมประมาณ 50-60 องศากับแนวแกนของตัวอย่าง สาเหตุเกิดจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุและจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่หัวสัมผัสกับตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างดังนั้นจึงมีผลให้สภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ดังรูปที่ 4.2 และลักษณะการวิบัติแสดงในรูปที่ 4.3

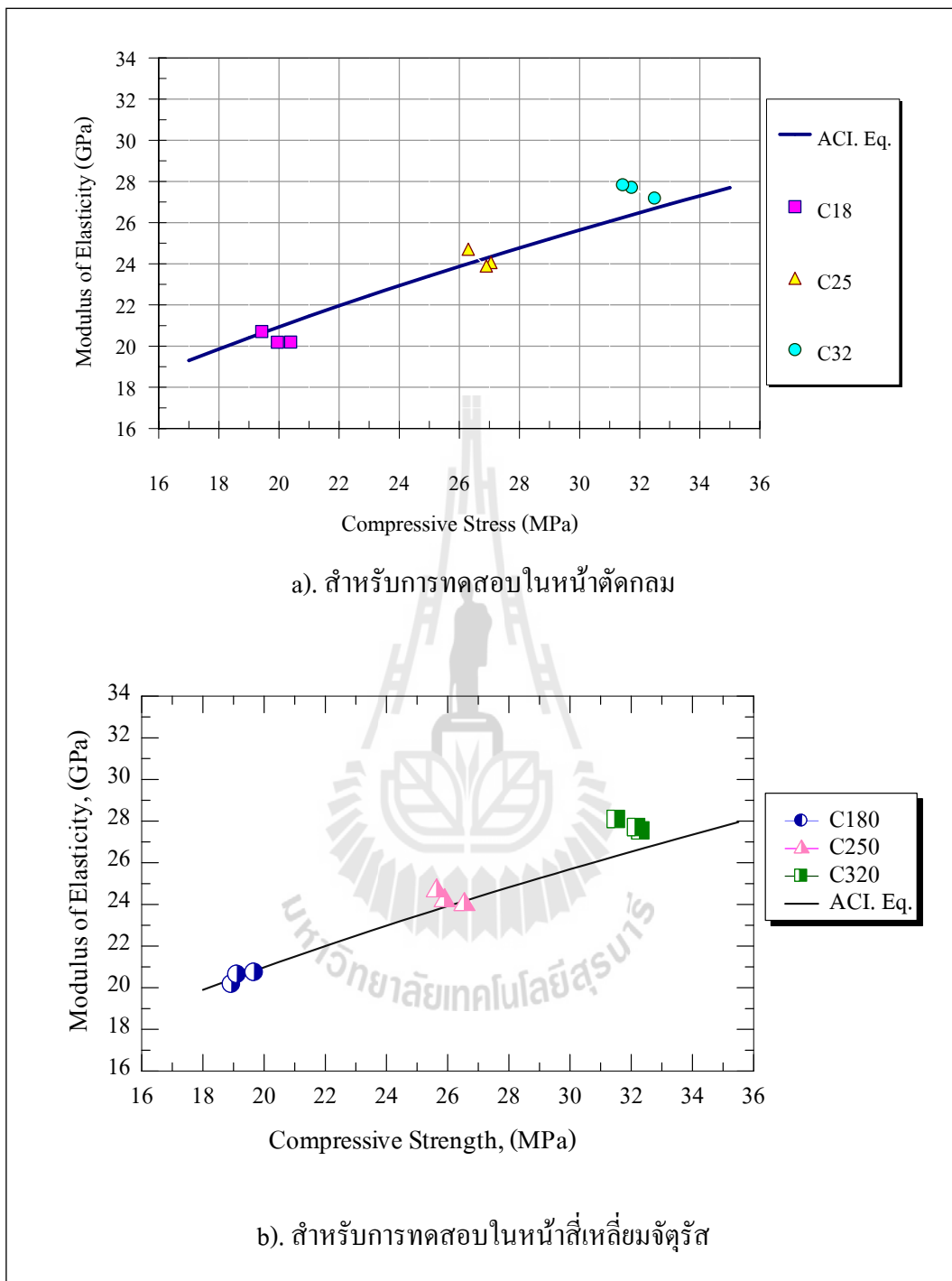


ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

สำหรับตัวอย่างทดสอบหน้าสี่เหลี่ยมจัตุรัส			
ตัวอย่าง	ลำดับ	กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด, f'_{co} (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)
C18	1	19.0	20.2
	2	19.1	20.6
	3	19.7	20.7
	เฉลี่ย	19.3	20.5
C25	1	26.6	24.0
	2	25.9	24.2
	3	25.6	24.7
	เฉลี่ย	26.0	24.3
C32	1	32.3	27.5
	2	32.2	27.7
	3	31.5	28.1
	เฉลี่ย	32.0	27.8
สำหรับตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม			
ตัวอย่าง	ลำดับ	กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด, f'_{co} (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)
C18	1	19.9	20.2
	2	19.4	20.7
	3	20.4	20.2
	เฉลี่ย	19.9	20.4
C25	1	27.1	24.1
	2	26.9	23.9
	3	26.3	24.7
	เฉลี่ย	26.7	24.2
C32	1	31.7	27.7
	2	32.5	27.2
	3	31.4	27.8
	เฉลี่ย	31.9	27.6



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

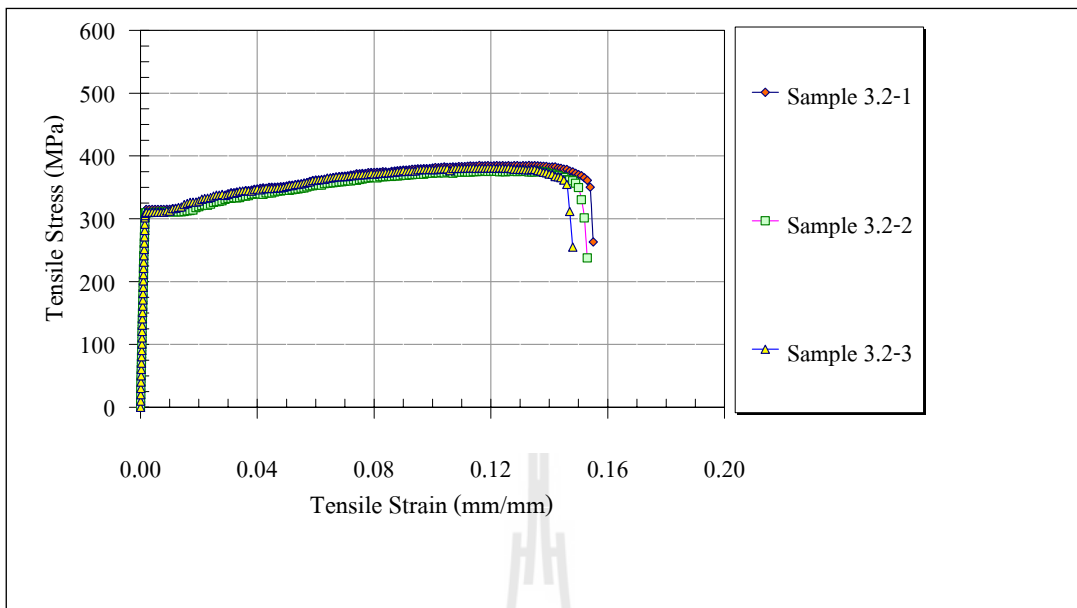
4.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็ก โดยตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบมาจากปลอกเหล็กและจากการทดสอบได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8-98 ด้วยปลอกเหล็กมีความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดในแนวแกนตั้งแสดงในรูปที่ 4.4-4.6 ตามลำดับ จากการทดสอบได้นำเสนอถึง หน่วยแรงดึงที่จุดคราก (Yielding stress) หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ของตัวอย่างทดสอบเหล็กจำนวน 3 ความหนา ในตารางที่ 4.2

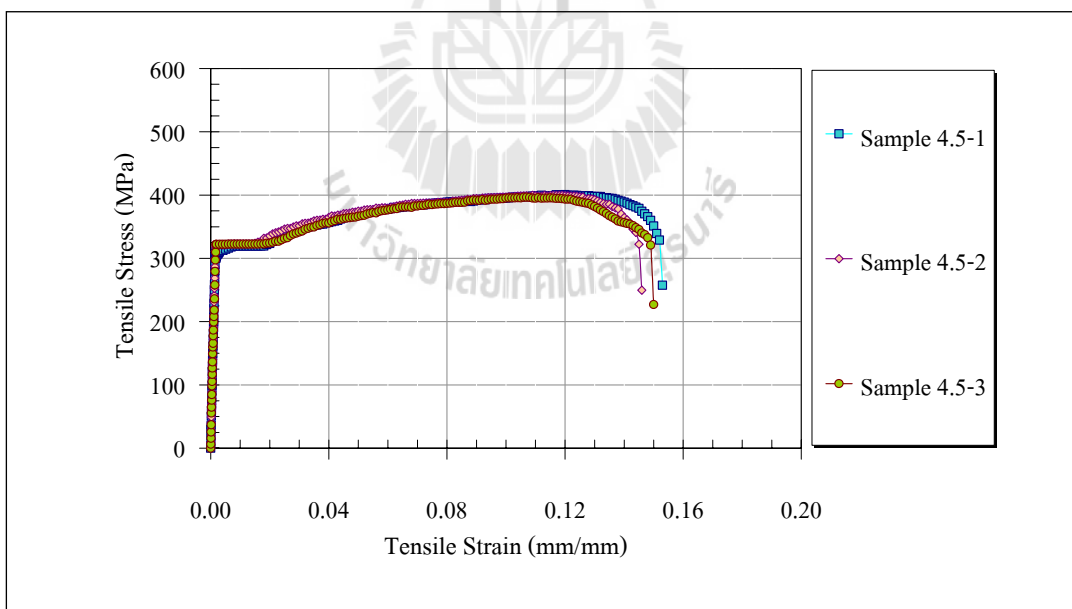
จากการทดสอบการรับแรงดึงของปลอกเหล็ก พบว่าหน่วยแรงดึงที่จุดครากของตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร มีหน่วยแรงดึงที่จุดครากเฉลี่ย ดังนี้ 312.10 321.16 และ 326.06 MPa ตามลำดับ จากนั้นปลอกเหล็กจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงครากโดยที่ปลอกเหล็กจะรับแรงได้คงที่แต่มีความเครียดมากขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากนั้นปลอกเหล็กจะสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยกราฟจะมีความชันสูงชันเรื่อย ๆ และจากนั้นกราฟจะมีค่าความชันค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นจุดที่มีหน่วยแรงดึงสูงสุด และมีค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบปลอกเหล็กความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร มีค่าดังนี้ 380.59 398.97 และ 479.89 MPa ตามลำดับ หลังจากนั้นปลอกเหล็กจะรับแรงดึงได้ลดลง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยตัวอย่างทดสอบเหล็กจะมีพฤติกรรมแบบเหนียว เนื่องจากเกิดคอคอด (Necking) และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งตัวอย่างทดสอบเหล็กความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ดังนี้ 15.18 14.95 และ 18.98% ตามลำดับ สำหรับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็ก ได้แสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกลของตัวอย่างทดสอบเหล็ก

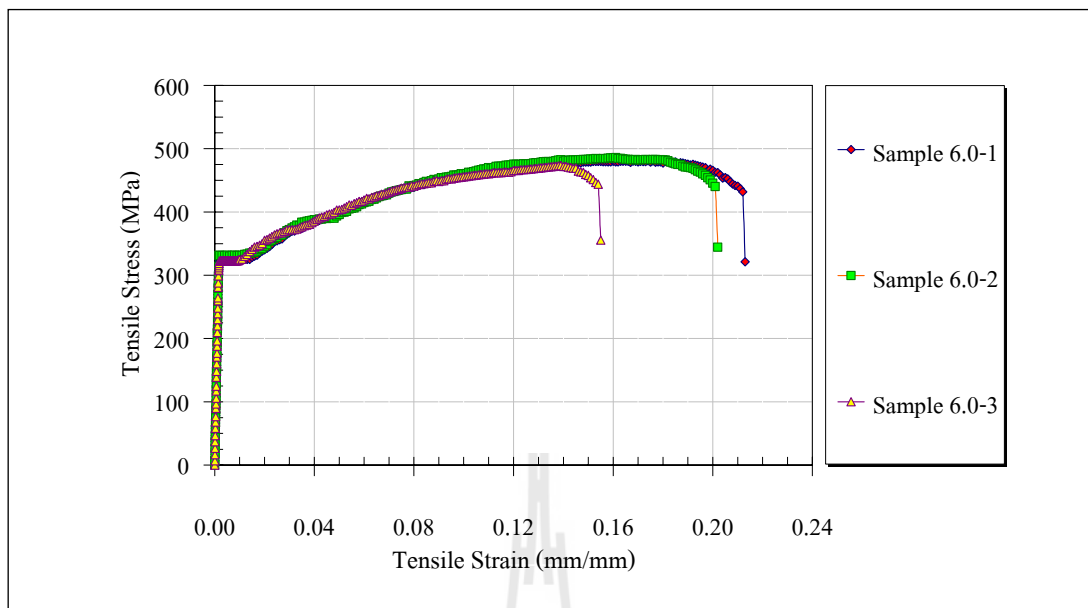
ตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 3.2 มิลลิเมตร				
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	314.83	384.93	202.76	15.50
2	311.10	375.93	201.00	15.25
3	310.38	380.89	200.98	14.80
เฉลี่ย	312.10	380.59	201.58	15.18
ตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 4.5 มิลลิเมตร				
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	319.40	400.60	201.48	15.25
2	322.86	399.64	200.59	14.60
3	322.54	396.67	213.01	15.00
เฉลี่ย	321.60	398.97	205.03	14.95
ตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 6.0 มิลลิเมตร				
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	324.26	480.76	195.19	21.30
2	331.12	485.74	199.35	20.20
3	322.80	473.17	197.86	15.45
เฉลี่ย	326.06	479.89	197.47	18.98



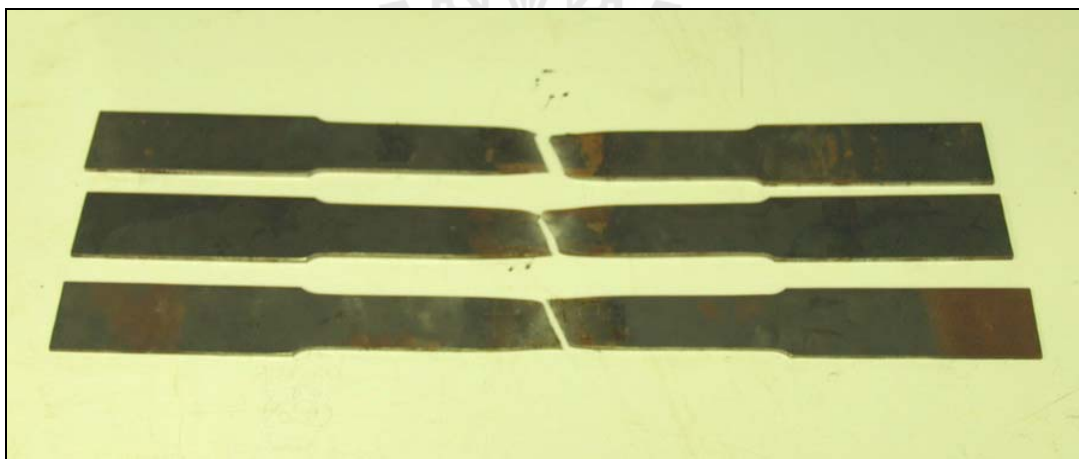
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก
ความหนา 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก
ความหนา 4.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก
ความหนา 6.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็ก

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน B/t ตามข้อกำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบตามทีกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5 สามารถสรุปการเปรียบเทียบปลอกเหล็กอัตราส่วน B/t ตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 หรือ มาตรฐานออกแบบของ ACI Committee 318 และมาตรฐานออกแบบของ AISC/LRFD ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบอัตราส่วน B/t ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ

คุณสมบัติของปลอกเหล็ก	อัตราส่วน B/t	มาตรฐานการออกแบบ	
		ว.ส.ท./ACI	AISC/LRFD
		$\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{3E_s}{f_y}}$	$\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{F_y}}$
1. ความหนา 3.2 mm • $E_s = 201.58$ GPa • $f_y = 312.10$ MPa	46.9	44.0 (ไม่ผ่านข้อกำหนด)	35.9 (ไม่ผ่านข้อกำหนด)
2. ความหนา 4.5 mm • $E_s = 205.03$ GPa • $f_y = 321.60$ MPa	33.3	43.7 (ผ่านข้อกำหนด)	35.7 (ผ่านข้อกำหนด)
3. ความหนา 6.0 mm • $E_s = 197.47$ GPa • $f_y = 326.06$ MPa	25.0	42.6 (ผ่านข้อกำหนด)	34.8 (ผ่านข้อกำหนด)

หมายเหตุ ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm

4.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงเหล็กเสริมคอนกรีต

จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีตอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8-98 โดยเหล็กเส้นที่นำมาเสริมคอนกรีตในคอนกรีตเป็นเหล็กกลม (RB6) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.0 มิลลิเมตร และเหล็กข้ออ้อย (DB12) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียด ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากกราฟพบว่าในพฤติกรรมช่วงแรกของทั้งเหล็กเสริมคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง จนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นถึงหน่วยแรงคราก ซึ่งตัวอย่างทดสอบเหล็กเสริมมีหน่วยแรงดึงที่จุดครากดังนี้สำหรับเหล็กกลม มีค่า 259.09 MPa และ เหล็กข้ออ้อย มีค่า 353.32 MPa จากนั้นเหล็กเส้นดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงคราก คือตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นจะรับหน่วยแรงดึงได้คงที่แต่จะมีความเครียดสูงเพิ่มขึ้น

หลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตจะสามารถกลับมารับหน่วยแรงดึงได้อีกครั้ง สังเกตจากกราฟที่มีความชันเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงหน่วยแรงดึงสูงสุด ความชันของกราฟจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบมีค่าดังนี้ สำหรับเหล็กกลม (RB6) มีค่า 333.10 MPa และ เหล็กข้ออ้อย (DB12) มีค่า 493.28 MPa และหลังจากนั้น

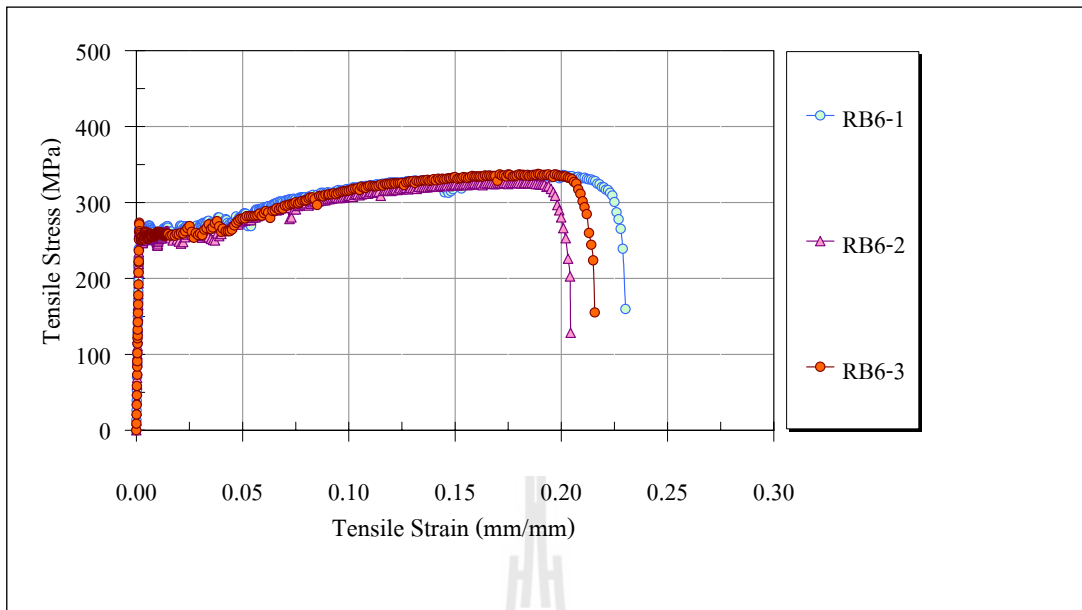
ตัวอย่างทดสอบจะรับหน่วยแรงดึงได้ลดลงส่งผลให้ความชันของกราฟ มีค่าความชันลดลง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ และที่จุดวิบัติมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดังนี้ 21.67% และ 33.70% ตามลำดับของเหล็กกลม (RB6) และเหล็กข้ออ้อย (DB12) โดยแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 และลักษณะการวิบัติของเหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อยแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม (RB6)

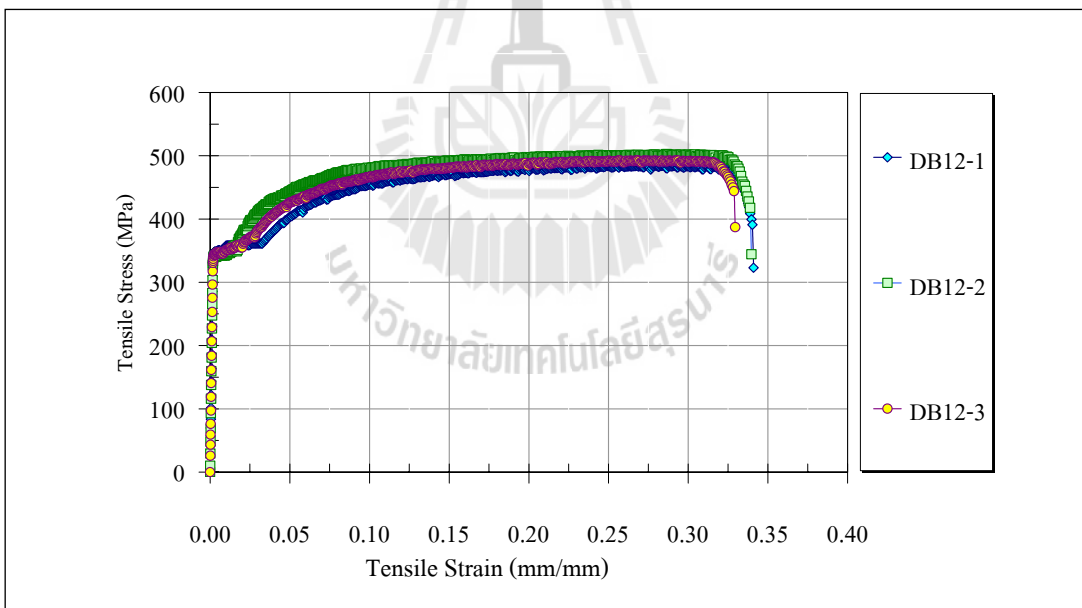
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	262.43	336.00	196.50	23.0
2	257.10	325.71	192.20	20.4
3	257.73	337.60	194.80	21.6
เฉลี่ย	259.09	333.10	194.50	21.67

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย (DB12)

ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	361.32	484.92	190.30	34.1
2	350.95	502.36	191.30	34.0
3	347.70	492.56	190.70	33.0
เฉลี่ย	353.32	493.28	190.77	33.70



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นกลม



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นข้ออ้อย



รูปที่ 4.10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นกลม



รูปที่ 4.11 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อย

4.2 ผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

4.2.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ในหัวข้อนี้ได้แบ่งการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม (2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

(1) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 4.12-4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) และความเครียด (Strain) ของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงและตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก โดยจัดกลุ่มตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ($f'_{co} = 18, 25$ และ 32 MPa) ความหนาของเหล็ก ($t = 3.2, 4.5$ และ 6.0 mm) และหน่วยแรงโอบรัดก่อน ($0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$)

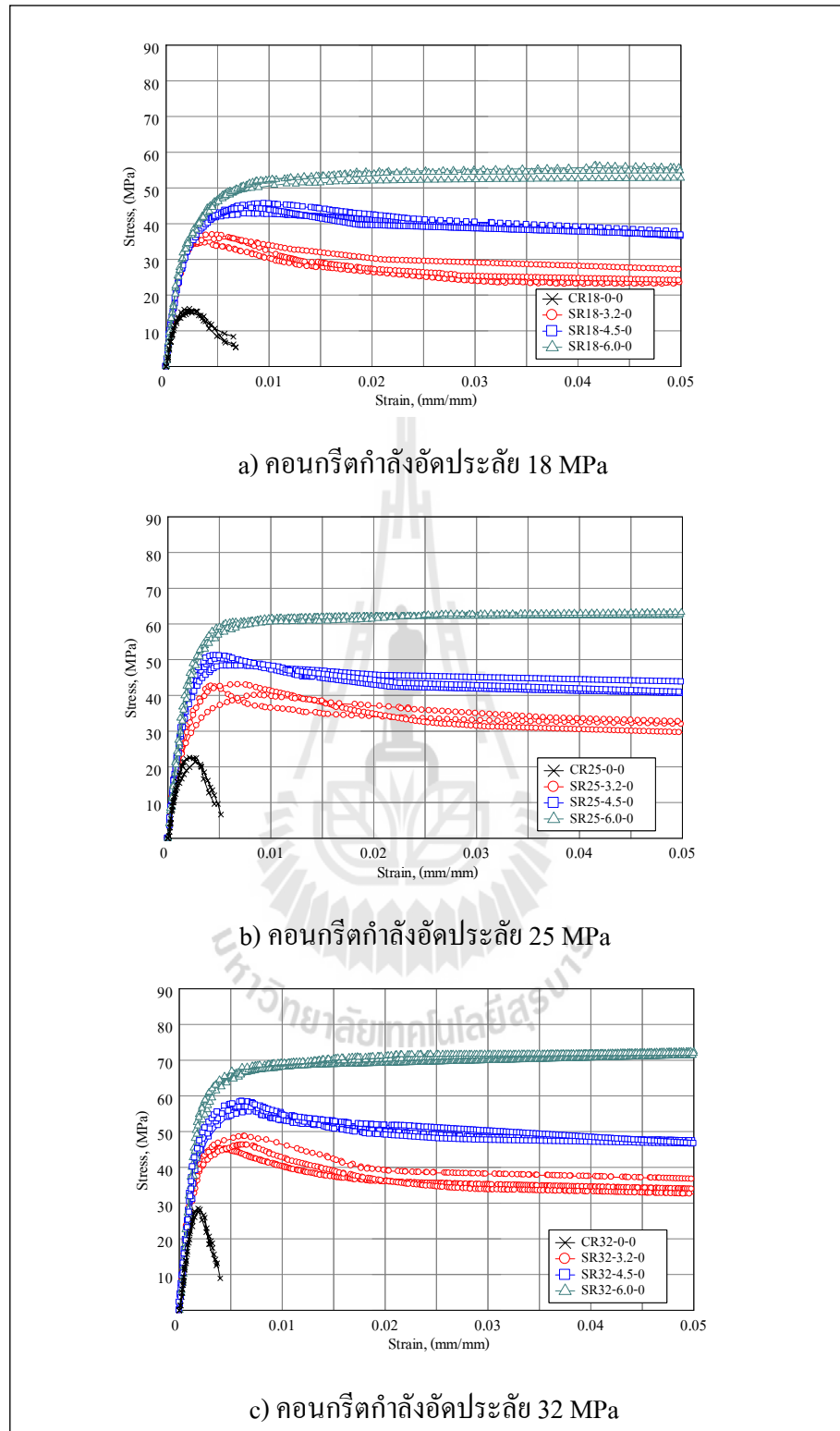
และจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวมีค่า 15 mm หรือเทียบเท่าค่าความเครียด (Strain) ในคอนกรีตที่ค่า 0.050 mm/mm เป็นค่าความเครียด (Strain) ที่สูงกว่า Ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 18.75 เท่า

จากรูปที่ 4.12-4.14 พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ พฤติกรรมแบบเส้นตรง (Linear) และพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) ในช่วงแรกตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) ซึ่งพบว่ามี ค่าความชัน (Slope) และลักษณะเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการศึกษานี้แรงกดอัดนั้น ถูกกำหนดให้กระทำต่อคอนกรีตโดยตรงและคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ที่ต่ำ ดังนั้นคอนกรีตจึงขยายตัวทางด้านข้างที่น้อยมาก ในช่วงแรกและเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกดอัดโดยปลอกเหล็กพร้อมรับแรงกดอัดได้บ้าง โดยอาศัยการถ่ายแรงบางส่วนจากแกนคอนกรีตโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยว (Bond) และแรงเสียดทานระหว่างผิวแกนของคอนกรีตและผิวในของปลอกเหล็ก (Johansson, M., 2000) โดยพฤติกรรมช่วงนี้มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดประมาณ 60 - 80% ของหน่วยแรงสูงสุดและเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่า พฤติกรรมในช่วงแรกนั้นจะมีค่าความชันสูงมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ ตามลำดับซึ่งก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น จากนั้นช่วงที่สองเมื่อแกนคอนกรีตถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro cracking) ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้นค่าความชัน (Slope) ของกราฟความสัมพันธ์จึงเริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) มากขึ้นในขณะเดียวกันเมื่อแกนคอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น ก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กมากขึ้นแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะต้านทานต่อแรงดันดังกล่าวโดยอาศัยความแกร่งต่อการคดของผนังในรูปของแผ่น (Plate) ซึ่งก่อให้เกิดแรงตั้งฉากและแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแกนคอนกรีตและในส่วนผนังด้านในของปลอกเหล็กมากขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ปลอกเหล็กต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนร่วมกับแกนของคอนกรีตอย่างต่อเนื่องและเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่ที่ผนังของปลอกเหล็ก (Local tube wall buckling) ขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้นได้ไม่มากนักโดยปลอกเหล็กทำหน้าที่ในการจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้มากขึ้นและทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนที่สูงมาก (คล้ายพฤติกรรมของวัสดุเหนียว) ก่อนการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

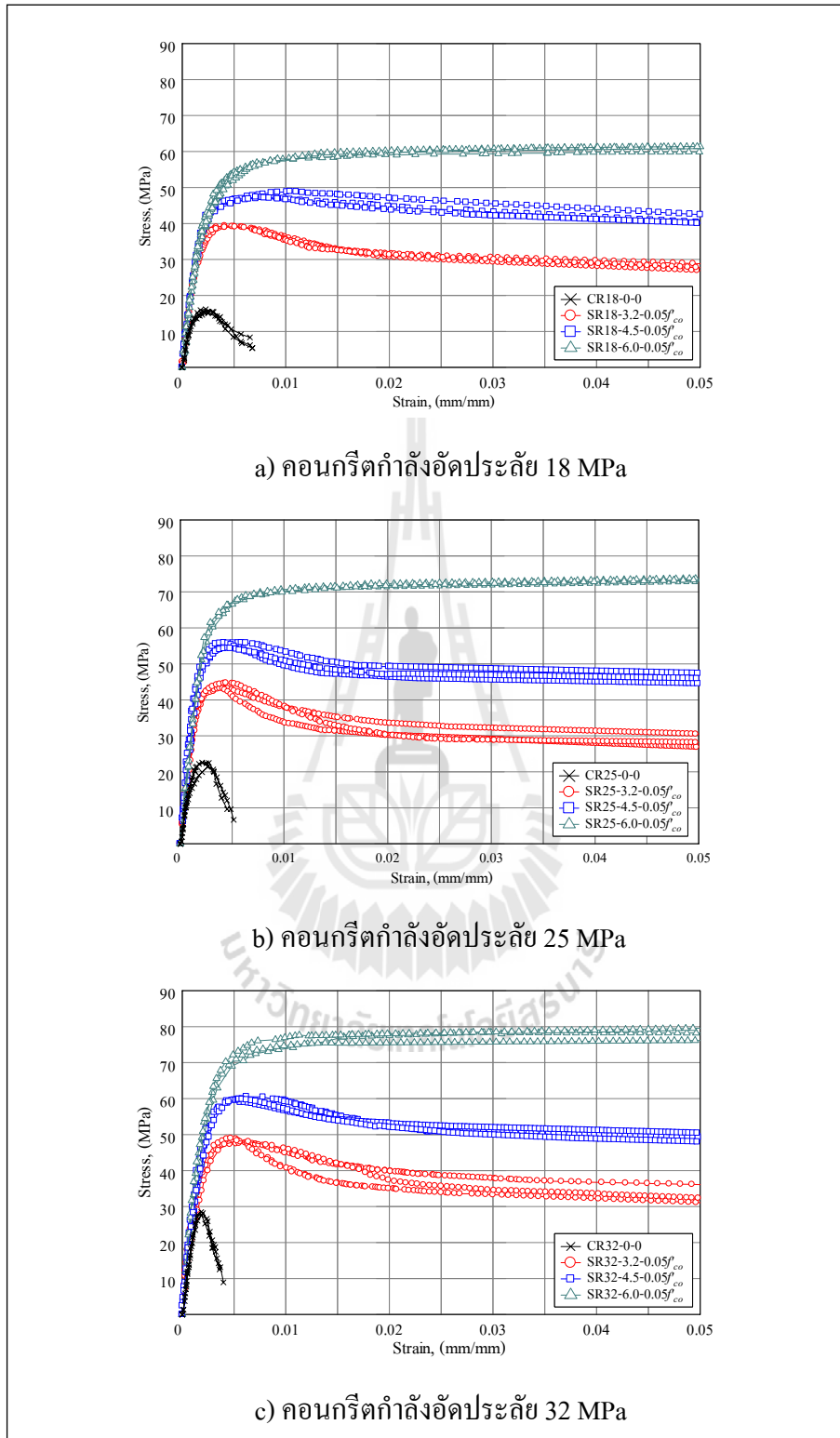
พฤติกรรมในช่วงที่สองของตัวอย่างทดสอบพบอยู่ 2 รูปแบบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12-4.14 และตารางที่ 4.6 โดยลักษณะของพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น เป็นดังนี้

แบบที่ 2 ตัวอย่างทดสอบรองรับแรงกระทำสูงถึงค่าหนึ่งจากนั้นตัวอย่างทดสอบมีความแข็งแรงประมาณศูนย์หรือ Elastic - perfectly plastic ซึ่งพบว่าเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ S18 - 6.0 S25 - 6.0 และ S32 - 6.0 ซึ่งเกิดในทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและในปลอกเหล็กที่มีความหนา (6.0 mm) ทั้งหมด และพบในตัวอย่างทดสอบ S18 - 4.5 - 0.1 f'_{co} S25 - 4.5 - 0.1 f'_{co} และ S32 - 4.5 - 0.1 f'_{co} มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.1 f'_{co} เกิดขึ้นในปลอกเหล็กหนาปานกลาง (4.5 mm) และทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเช่นกัน ในกรณีนี้เมื่อพบว่ามีแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดและแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและขยายตัวทางด้านข้างมากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะมีความแข็งแรงต่อการัดในการต้านทานต่อผลของการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัดคงที่ได้อย่างต่อเนื่องถึงจุดหนึ่ง ในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งเป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบมีค่าแรงสูงสุดเกิดได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติ โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก

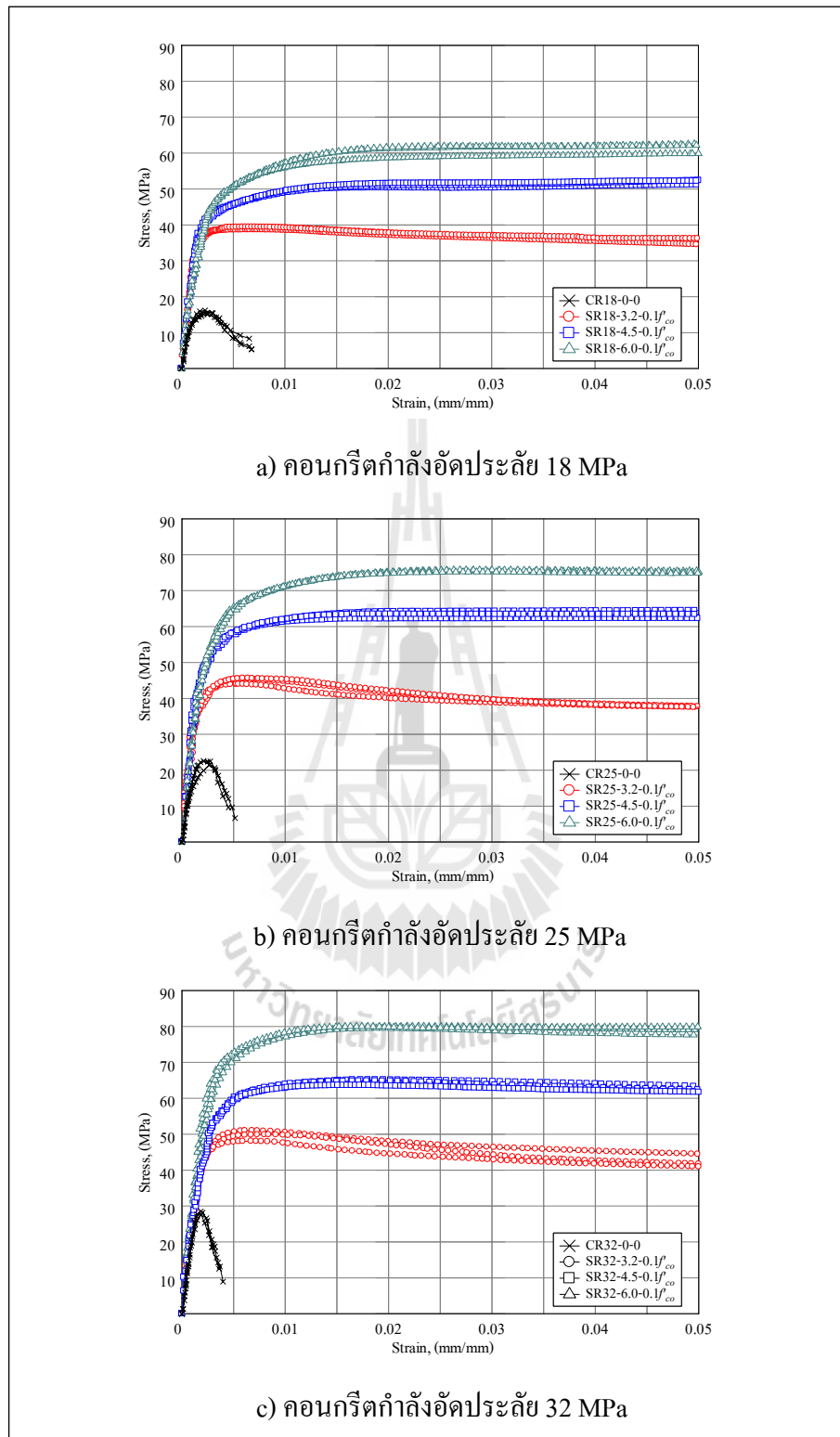
แบบที่ 3 เมื่อรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะมีความแข็งแรงลดลงหรือ Strain softening เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ S18 - 3.2 S25 - 3.2 และ S32 - 3.2 เป็นตัวอย่างทดสอบที่มีผนังของปลอกเหล็กบาง (3.2 mm) และในตัวอย่างทดสอบ S18 - 4.5 S25 - 4.5 และ S32 - 4.5 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีผนังของปลอกเหล็กหนาปานกลาง (4.5 mm) โดยในกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดแล้วนั้นแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้วผนังของปลอกเหล็กไม่มีความแข็งแรงต่อการัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยปลอกเหล็กไม่สามารถจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่ามากขึ้นแล้ว ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตและเกิดการแตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กจะถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีกรงให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.1 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมรับแรง
1	CR18-0-0	15.50	-	0.26	-	20.5	Concrete crushing
	CR25-0-0	21.79	-	0.28	-	24.3	Concrete crushing
	CR32-0-0	26.47	-	0.23	-	27.8	Concrete crushing
2	SR18-3.2-0	35.50	2.29	0.36	1.38	22.17	Strain softening
	SR25-3.2-0	39.90	1.83	0.42	1.52	26.40	Strain softening
	SR32-3.2-0	44.72	1.69	0.34	1.48	28.73	Strain softening
	SR18-4.5-0	40.48	2.61	0.40	1.53	25.81	Strain softening
	SR25-4.5-0	49.59	2.28	0.46	1.67	27.09	Strain softening
	SR32-4.5-0	53.33	2.01	0.37	1.61	29.70	Strain softening
	SR18-6.0-0	43.74	2.82	0.41	1.58	26.23	Elastic perfectly plastic
	SR25-6.0-0	58.74	2.70	0.55	1.99	28.21	Elastic perfectly plastic
	SR32-6.0-0	63.72	2.41	0.41	1.80	30.92	Elastic perfectly plastic

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ต่อ)

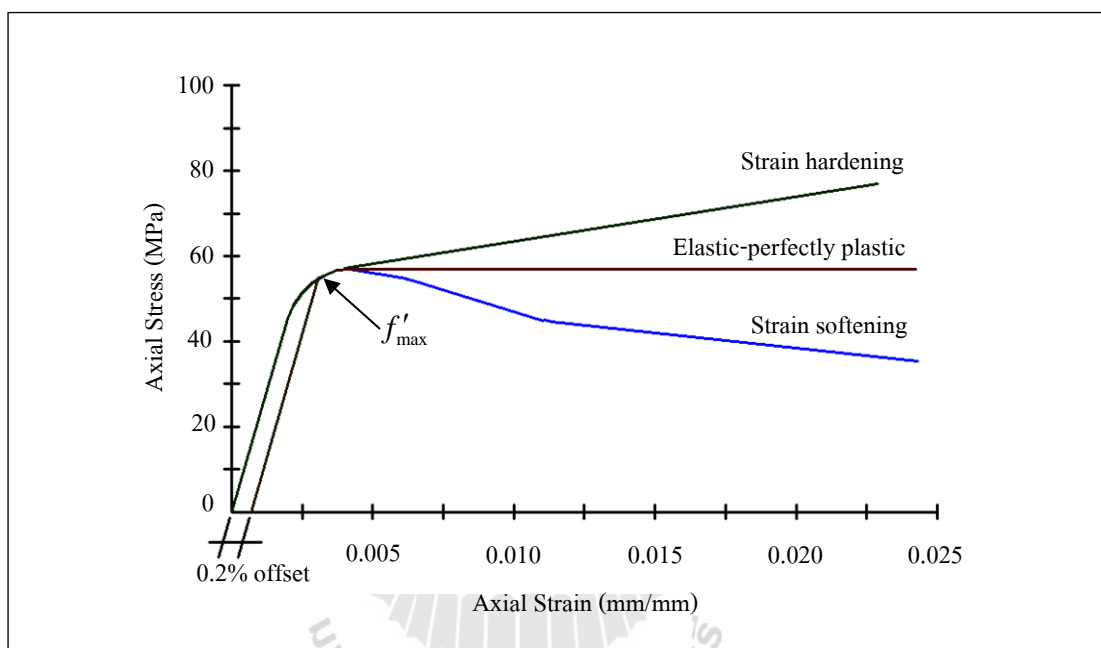
กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมรับแรง
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	39.09	2.52	0.41	1.58	23.24	Strain softening
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	43.64	2.00	0.36	1.30	27.59	Strain softening
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	47.53	1.80	0.40	1.74	30.62	Strain softening
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	45.53	2.94	0.41	1.57	25.91	Strain softening
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	54.82	2.52	0.39	1.40	28.14	Strain softening
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	57.21	2.16	0.43	1.88	31.21	Strain softening
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	51.70	3.34	0.44	1.69	27.03	Elastic perfectly plastic
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	66.29	3.04	0.43	1.57	29.50	Elastic perfectly plastic
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	70.43	2.66	0.49	2.12	32.40	Elastic perfectly plastic

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมรับแรง
4	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	39.84	2.57	0.37	1.44	25.87	Strain softening
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	44.49	2.04	0.37	1.33	27.74	Strain softening
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	49.14	1.86	0.42	1.82	31.81	Strain softening
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	46.91	3.03	0.40	1.55	25.90	Elastic perfectly plastic
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	56.84	2.61	0.39	1.43	29.04	Elastic perfectly plastic
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	59.15	2.23	0.43	1.87	33.44	Elastic perfectly plastic
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	52.40	3.38	0.40	1.55	29.77	Elastic perfectly plastic
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	68.04	3.12	0.65	2.37	30.48	Elastic perfectly plastic
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	72.19	2.73	0.49	2.14	33.76	Elastic perfectly plastic

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

ในการศึกษาได้จำกัดการแสดงผลการทดสอบที่ค่าระยะการหดตัว 20 มิลลิเมตร หรือเทียบเท่าค่าความเครียด 0.070 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าสูง และได้นิยามค่า f'_{max} เป็นค่าหน่วยแรงสูงสุด ที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และจำกัดการทดสอบไว้ที่ระยะการหดตัวไม่เกิน 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงการหาค่าหน่วยแรงสูงสุดของ Tubed concrete specimen

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดดังรูปที่ 4.16-4.18 พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะถูกแบ่งออกได้ 2 ช่วงคือ ช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงและช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยในช่วงแรกเมื่อพิจารณาตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) พบว่ากราฟในช่วงนี้มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยจะมีความเป็นเส้นตรงถึงประมาณ 50-60% ของหน่วยแรงสูงสุด (f'_{max}) เนื่องจากเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำ แกนคอนกรีตจะเป็นวัสดุหลักในการรองรับแรงกระทำ และจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง อันเนื่องมาจาก Poisson's ratio และเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ Poisson's ratio ต่ำกว่าเหล็ก ดังนั้นการเกิด Confining effect ระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กจะมีค่าน้อยมากอย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่าพฤติกรรมในช่วงแรกของตัวอย่างทดสอบจะมีความชันสูง

มากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่มนี้ มีการให้หน่วยแรงโอบริคก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ และ 0.08 ตามลำดับซึ่งจะก่อให้เกิดการโอบริคแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16-4.18 เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยคอนกรีตและความหนาปลอกเหล็กที่เท่ากัน พบว่าค่าความแกร่งหรือค่าความชันของตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบริคก่อนที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยที่เท่ากันและการให้หน่วยแรงโอบริคก่อน ที่มีค่าเท่ากันค่าความแกร่งของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาปลอกเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยที่ความชันของตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ และตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4 นี้จะมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงมีค่าประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุด (f'_{max}) ซึ่งสูงกว่าในกรณีของกลุ่มที่ 1 และ 2 เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มการให้หน่วยแรงโอบริคก่อนแก่ตัวอย่างให้สูงขึ้นทำให้พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

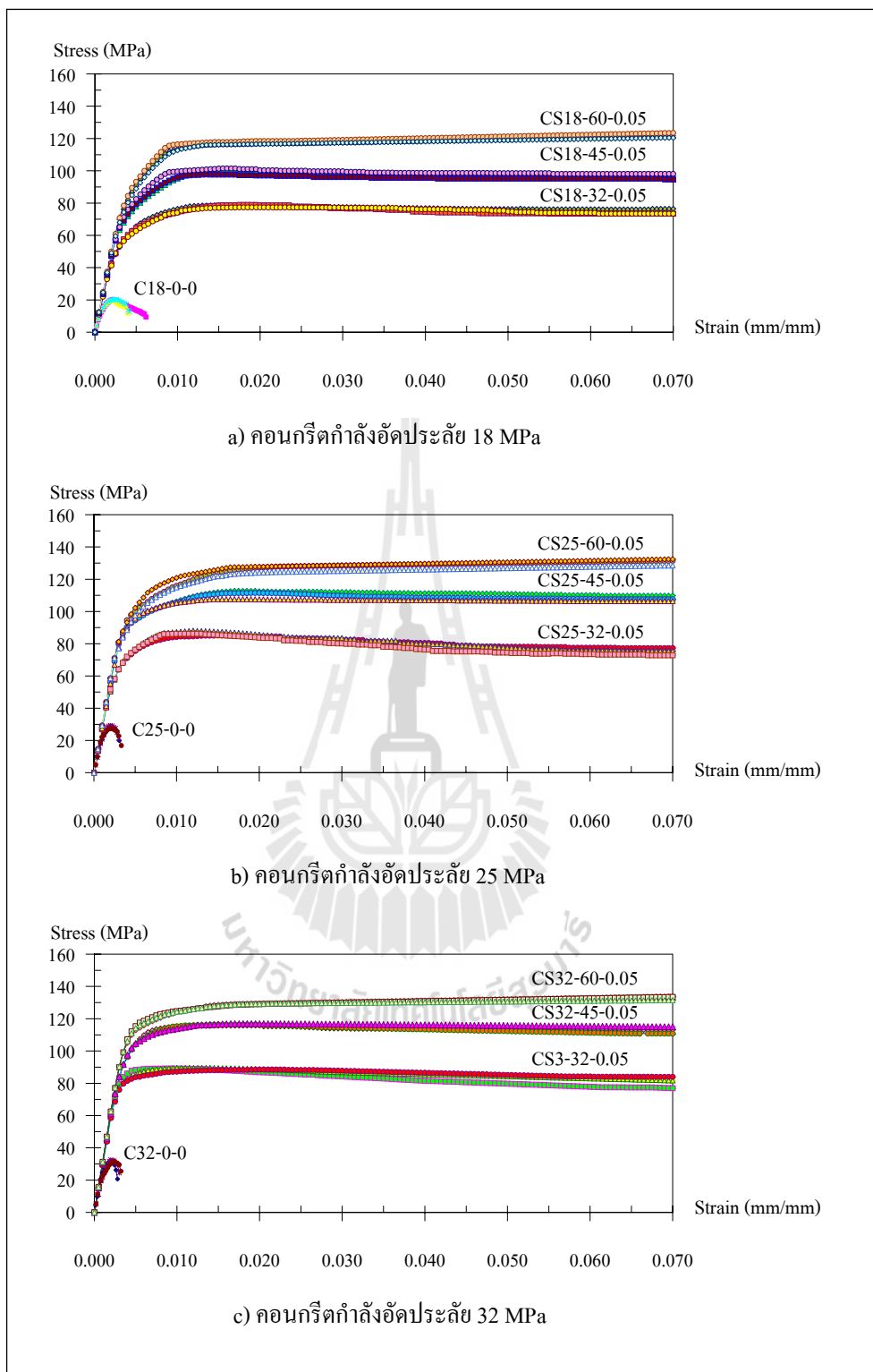
หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ค่าความชันของกราฟจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวในอัตราที่เร็วขึ้นทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านข้างและแรงดันทางด้านขวางกระทำต้งจากต่อผนังของปลอกเหล็กทำให้เกิดการรับแรงกระทำร่วมกันระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง ด้วยปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ช่วยจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าว เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนได้สูงขึ้นก่อนการวิบัติ จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16-4.18

แบบที่ 1 พฤติกรรมแบบ Strain hardening เกิดขึ้นจากการที่ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำในแนวแกนได้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบริคด้วยปลอกเหล็กความหนาสูง (6.0 มิลลิเมตร) เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแกร่งมากเพียงพอสามารถจำกัดการขยายตัวทางด้านของแกนคอนกรีตหลังจากรับกระทำได้เป็นอย่างดี โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ CS18-60-0

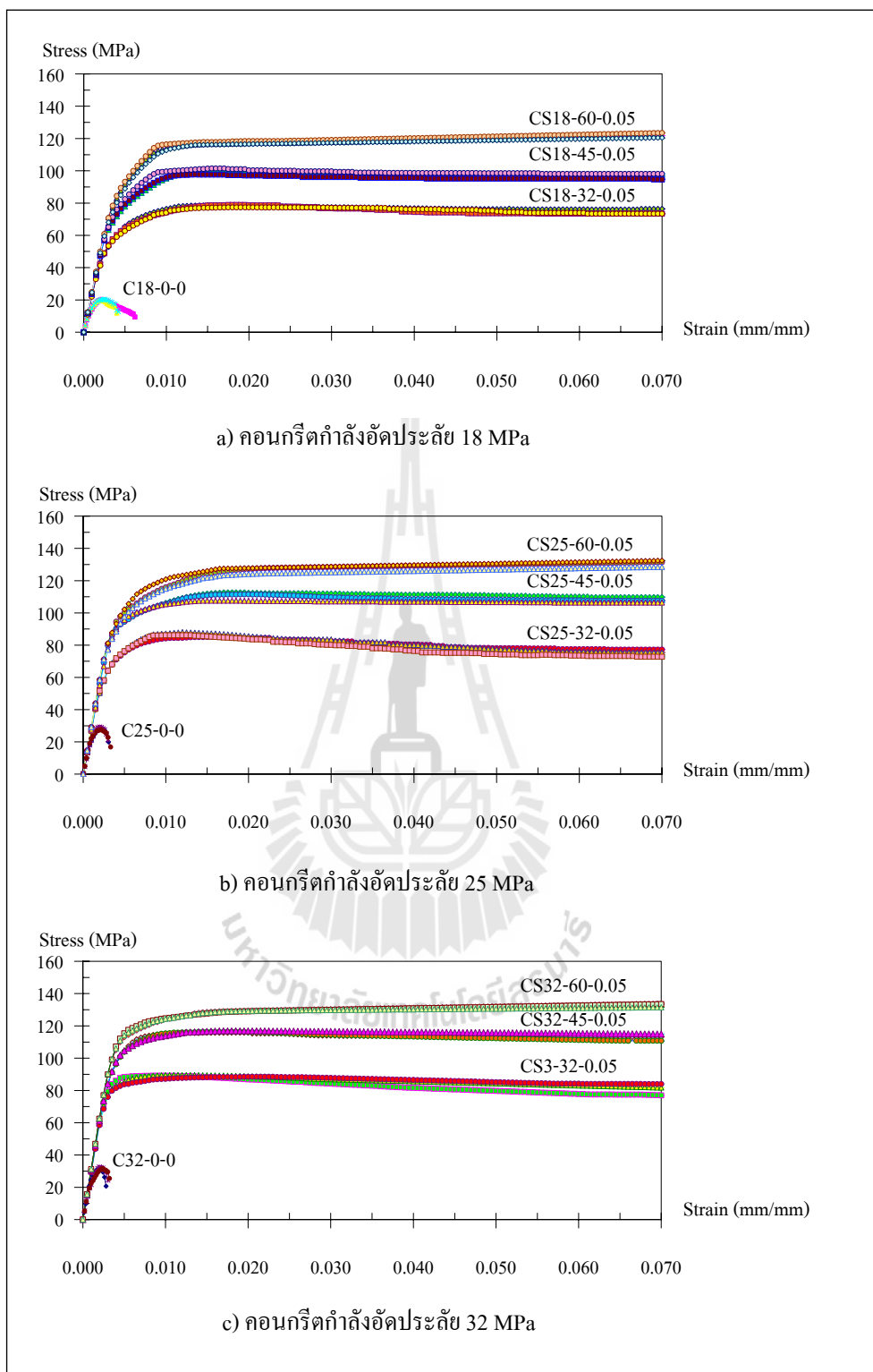
แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ Elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่ง โดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์ เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแข็งแรงในการต้านทานการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ โดยส่วนใหญ่พฤติกรรมเช่นนี้จะเกิดกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กำลังอัดประลัย และเกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่มีขนาดความหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาปานกลางและความหนาสูง) ดังต่อไปนี้ CS18-45-0 CS18-45-0.05 CS18-45-0.08 CS18-60-0.05 CS18-60-0.08 CS25-45-0 CS25-45-0.05 CS25-45-0.08 CS25-60-0 CS25-60-0.05 CS25-60-0.08 CS32-45-0 CS32-45-0.05 CS32-45-0.08 CS32-60-0 CS32-60-0.05 และ CS32-60-0.08

แบบที่ 3 พฤติกรรมแบบ Strain softening โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาน้อย) ดังต่อไปนี้ CS18-32-0 CS18-32-0.05 CS18-32-0.08 CS25-32-0 CS25-32-0.05 CS25-32-0.08 CS32-32-0 CS32-32-0.05 และ CS32-32-0.08 เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต ดังนั้นหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดสูงสุด จึงไม่สามารถต้านทานแรงได้อีก และเกิดการโป่งออกทางด้านข้างที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร โดยการโป่งออกทางด้านข้างเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางสูงของตัวอย่างทดสอบ ดังในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26

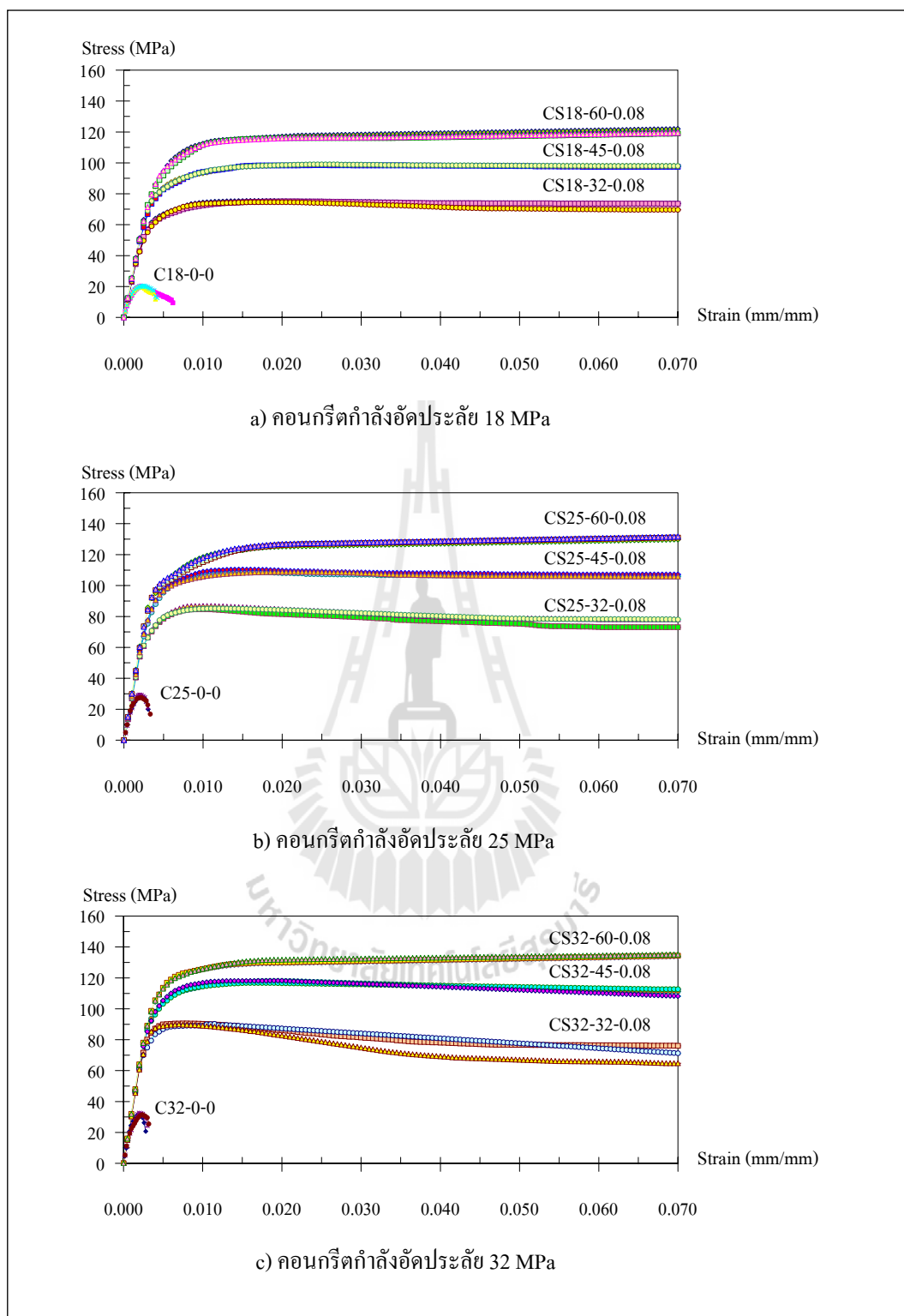
โดยสรุปพบว่าการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างต่อตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น แต่ความหนาของปลอกเหล็กจะมีผลทำให้พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น โดยตัวอย่างทดสอบที่มีปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร จะมีพฤติกรรมเกิดขึ้น 2 รูปแบบ คือ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic ซึ่งเหมาะนำไปใช้งาน เพราะตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม
 ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม
 ที่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม
 ที่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.08 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดกลมที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมการรับแรง
1	C18-0-0	19.9	-	0.22	-	20.4	Concrete crushing
	C25-0-0	26.7	-	0.21	-	24.2	Concrete crushing
	C32-0-0	31.9	-	0.21	-	27.6	Concrete crushing
2	CS18-32-0	58.4	2.93	0.44	2.00	21.6	Strain softening
	CS25-32-0	69.2	2.59	0.45	2.14	25.4	Strain softening
	CS32-32-0	82.2	2.58	0.48	2.29	27.9	Strain softening
	CS18-45-0	74.0	3.72	0.51	2.32	22.6	Elastic perfectly plastic
	CS25-45-0	86.1	3.22	0.49	2.33	26.5	Elastic perfectly plastic
	CS32-45-0	96.7	3.03	0.51	2.43	28.9	Elastic perfectly plastic
	CS18-60-0	90.3	4.54	0.56	2.55	23.8	Strain hardening
	CS25-60-0	100.9	3.78	0.54	2.57	27.5	Elastic perfectly plastic
CS32-60-0	108.7	3.41	0.53	2.52	29.7	Elastic perfectly plastic	

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดกลมที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมการรับแรง
3	CS18-32-0.05	64.4	3.24	0.50	2.27	22.7	Strain softening
	CS25-32-0.05	74.1	2.78	0.48	2.29	27.0	Strain softening
	CS32-32-0.05	85.6	2.68	0.49	2.33	29.6	Strain softening
	CS18-45-0.05	83.4	4.19	0.55	2.50	24.0	Elastic perfectly plastic
	CS25-45-0.05	96.8	3.63	0.53	2.52	27.9	Elastic perfectly plastic
	CS32-45-0.05	104.8	3.29	0.53	2.52	30.4	Elastic perfectly plastic
	CS18-60-0.05	97.1	4.88	0.58	2.64	24.8	Elastic perfectly plastic
	CS25-60-0.05	104.5	3.91	0.53	2.52	29.3	Elastic perfectly plastic
	CS32-60-0.05	115.6	3.62	0.54	2.57	31.3	Elastic perfectly plastic

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมรับแรง
4	CS18-32-0.08	67.0	3.37	0.51	2.32	23.1	Strain softening
	CS25-32-0.08	76.5	2.87	0.48	2.29	27.1	Strain softening
	CS32-32-0.08	88.4	2.77	0.49	2.33	30.6	Strain softening
	CS18-45-0.08	85.6	4.30	0.54	2.45	24.8	Elastic perfectly plastic
	CS25-45-0.08	98.4	3.69	0.52	2.48	28.5	Elastic perfectly plastic
	CS32-45-0.08	107.0	3.35	0.53	2.52	31.6	Elastic perfectly plastic
	CS18-60-0.08	98.4	4.94	0.56	2.55	25.3	Elastic perfectly plastic
	CS25-60-0.08	106.6	3.99	0.53	2.52	30.1	Elastic perfectly plastic
	CS32-60-0.08	117.5	3.68	0.55	2.62	32.0	Elastic perfectly plastic

4.2.2 การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

สำหรับการศึกษาถึงการถ่ายแรงระหว่างแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ได้นำเสนอโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

สามารถคำนวณหาหน่วยแรงเนื่องจากความเครียดได้จากสมการของ Hooke ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.1)$$

โดยที่ E คือ Modulus of elasticity ของปลอกเหล็ก
 ε คือ ค่าความเครียดที่วัดได้จาก Strain gauge ในแนวแกน

$$P = \sigma A \quad (4.2)$$

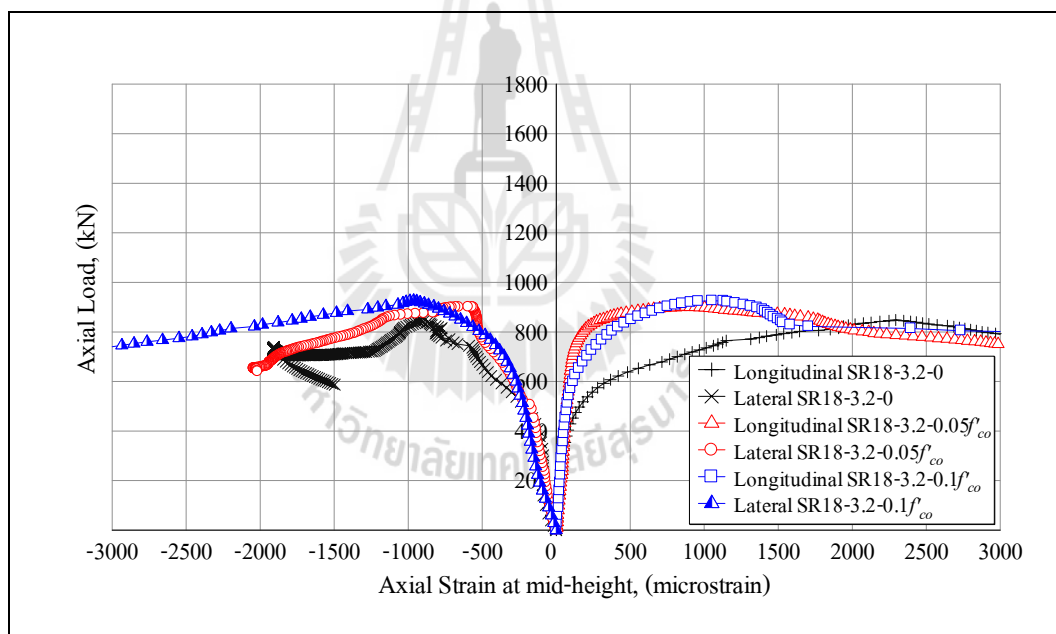
โดยที่ σ คือ หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็กซึ่งได้จากสมการ 4.1
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก

(1) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) กระทำต่อแกนคอนกรีตและค่าความเครียดในแนวแกน (ค่าเป็นลบ) และในแนวขวาง (ค่าเป็นบวก) ที่วัดได้จากสเตรนเกจ (Strain gage) ที่ตรงจุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กตัวอย่าง SR18 - 3.2 จัดกลุ่มตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ($f'_{co} = 18, 25$ และ 32 MPa) และความหนาของเหล็ก ($t = 3.2, 4.5$ และ 6.0 mm) จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตที่ปลายของตัวอย่างทดสอบบางส่วน ได้ถูกถ่ายไปยังปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบอย่างต่อเนื่องจากจุดที่แรงเริ่มกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก Interaction ระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็ก โดยอาศัย Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตเป็นระบบถ่ายแรงหลัก (Johansson, M., 2000) โดยในส่วนช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนแนวโน้มเป็น

เส้นตรง จนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วง 50% - 60% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P'_{max} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงนี้การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กมีค่าที่ค่อนข้างสมบูรณ์

ในช่วงที่สองความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกดอัดที่กระทำต่อแกนคอนกรีตได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับอัตราการที่เพิ่มขึ้นของแรงกระทำซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าปลอกเหล็กยังช่วยรับแรงกดอัดในสัดส่วนที่เพิ่มสูงมากขึ้น โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่แกนของคอนกรีตที่อยู่ภายใต้แรงกระทำเริ่มมีการแตกร้าวมากขึ้นและรองรับแรงกระทำลดลง ส่งผลให้มีการกระจายแรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต และมีการถ่ายแรงไปยังปลอกเหล็กมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการวิบัติค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กนั้นยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียด ที่จุดครากของเหล็ก ซึ่งมีค่าประมาณ 0.002 mm/mm หรือ 2000 microstrain ซึ่งแสดงว่าที่จุดดังกล่าว ปลอกเหล็กยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของตัวอย่างทดสอบ SR18 - 3.2

จากผลของแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อแกนคอนกรีตที่ปลายตัวอย่างทดสอบบางส่วนได้ถูกถ่ายไปยังปลอกเหล็ก จึงทำให้เกิดความเสียหายระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นในการพิจารณาค่า

หน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทดสอบ จากผลของการให้แรงกดอัดกระทำต่อคอนกรีต โดยตรงนั้นจากตารางที่ 4.8 จึงทำการพิจารณาผลที่เกิดขึ้นของความเสียหายระหว่างผิวสัมผัสของ ผิวด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตด้วย จากค่าหน่วยแรง f'_{max} ที่ทดสอบได้โดยการแปลง ค่าความเครียดตามยาวของปลอกเหล็กที่วัดได้จากสเตรนเกจ (Strain gage) โดยที่จุดกึ่งกลางความ สูงของตัวอย่างทดสอบ ตามกราฟความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก โดยใช้สมการของ Hooke ดังแสดง ในสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2 ดังที่แสดงไว้ในข้างต้น

จากการศึกษางานวิจัยของเสา Tubed Concrete column หน้าตัดกลมที่ถูกกระทำ โดยแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตของเสาเช่นเดียวกับที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งสามารถคำนวณ โดยใช้ Nonlinear finite element analysis (Johansson, M., 2000) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดใน แนวแกนที่ถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กนั้นจะมีค่าไม่เกิน 30% ของเสา Tubed Concrete column หน้า ตัดกลมซึ่ง จากตารางที่ 4.8 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อ เทียบกับแรง P'_{max} ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ ถูกโอบรัดก่อน (Tubed concrete specimens) ค่าอยู่ในช่วง 17.27 - 37.26% ส่วนใหญ่สูงกว่า 30% สาเหตุที่ปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงกดอัดในสัดส่วนที่มากกว่าปลอกเหล็กหน้าตัดกลมนั้น น่าจะเกี่ยวเนื่องมาจากการที่ผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมดังกล่าวมีความแกร่งต่อการดัด ค่าที่ไม่เพียงพอในการต้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างของแกนคอนกรีตที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวเป็น ผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่และไม่สามารถที่จะพัฒนาการ โอบรัดต่อ แกนคอนกรีตขึ้นได้ ดังนั้นแกนคอนกรีตจึงเกิดการวิบัติที่ค่ามากขึ้นและในแรงกดอัดดังกล่าวจึงถูก กระจายเข้าสู่แนวแกนของปลอกเหล็กมากขึ้น

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
1	CR18-0-0	15.57	350.33	-	-	-	-
	CR25-0-0	22.23	500.18	-	-	-	-
	CR32-0-0	28.26	635.85	-	-	-	-
2	SR18-3.2-0	35.50	798.64	746.00	151.76	297.59	37.26
	SR25-3.2-0	39.90	897.84	685.00	139.35	273.26	30.44
	SR32-3.2-0	44.72	1006.26	724.00	147.28	288.82	28.70
	SR18-4.5-0	40.48	910.70	507.00	103.76	288.56	31.69
	SR25-4.5-0	49.59	1115.74	679.00	138.96	386.46	34.64
	SR32-4.5-0	53.33	1199.93	696.00	142.44	396.13	33.01
	SR18-6.0-0	43.74	984.05	296.00	57.69	215.99	21.95
	SR25-6.0-0	58.74	1321.56	659.00	128.44	480.88	36.39
	SR32-6.0-0	63.72	1433.65	703.00	137.01	512.98	35.78

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{\max} (kN)	f'_{\max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	39.09	879.55	818.00	166.41	326.31	37.10
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	43.64	981.89	808.00	164.37	322.33	32.83
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	47.53	1069.33	806.00	163.96	321.53	30.07
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	45.53	1024.43	552.00	112.97	314.18	30.67
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	54.82	1233.47	783.00	160.25	445.65	36.13
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	57.21	1287.20	754.00	154.31	429.15	33.34
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	51.70	1163.15	344.00	67.05	251.02	21.58
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	66.29	1491.59	715.00	139.35	521.74	34.98
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	70.43	1584.68	788.00	153.58	575.01	36.29

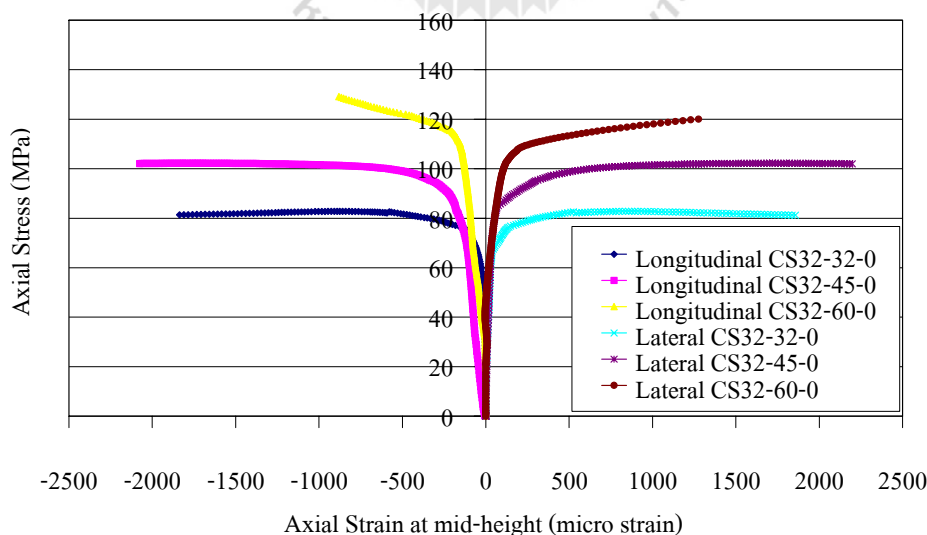
ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
4	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	39.84	896.46	776.00	157.86	309.56	34.53
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	44.49	1000.92	788.00	160.30	314.35	31.41
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	49.14	1105.75	843.00	171.49	336.29	30.41
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	46.91	1055.50	516.00	105.60	293.69	27.82
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	56.84	1278.96	777.00	159.02	442.24	34.58
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	59.15	1330.88	750.00	153.50	426.87	32.07
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	52.40	1179.04	279.00	54.38	203.59	17.27
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	68.04	1530.79	677.00	131.95	494.01	32.27
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	72.19	1624.37	759.00	147.93	553.85	34.10

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตและค่าความเครียดในแนวแกน (ค่าความเครียดเป็นลบ) และค่าความเครียดทางขวาง(ค่าความเครียดเป็นบวก) ของปลอกเหล็กที่ใช้โอบรัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังรูปที่ 4.20 โดยใช้ Strain gauge ในการวัดค่าความเครียด บริเวณกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ ในช่วงแรกแกนคอนกรีตจะทำหน้าที่หลักในการรับแรงกระทำในแนวแกน หลังจากนั้นจะเกิดการถ่ายแรงกระทำบางส่วนไปยังปลอกเหล็ก ซึ่งปลอกเหล็กมีส่วนช่วยรับแรงกระทำร่วมกับคอนกรีตจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ สำหรับการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างแกนคอนกรีตกับปลอกเหล็ก โดยอาศัย Micro interlocking และความเสียดทานของผิวสัมผัสด้านในระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต (Johansson, 2000)

เมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.20 สามารถแบ่งพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกกราฟจะมีความเป็นเส้นตรง จนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วง 60-70% ของหน่วยแรงกดอัดใช้งาน f'_{max} แสดงให้เห็นว่าในการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กมีค่าค่อนข้างสมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาในช่วงที่ 2 ของกราฟความสัมพันธ์ พบว่าความชันของกราฟมีค่าลดลงเรื่อย ๆ และค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งหมายความว่าเกิดการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพราะว่าคอนกรีตเกิดแตกร้าวมากขึ้นซึ่งทำให้รับแรงกระทำได้ลดลง และเกิดการกระจายแรงกระทำจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กมากยิ่งขึ้น จากตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางเกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ CS32-32-0 CS32-45-0 และ CS32-60-0

Johansson (2000) ได้ศึกษา Tubed RC column หน้าตัดทรงกลม รองรับแรงกระทำในแนวแกน ลักษณะการให้แรงกระทำเป็นการให้แรงโดยตรงแก่ตัวอย่างเสาทดสอบ ช่วงแรกแกนคอนกรีตจะเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกระทำใน Tubed RC column หลังจากเสาดังกล่าวรับแรงกระทำสูงเพิ่มขึ้นแกนคอนกรีตจะเกิดการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปที่ปลอกเหล็กมากขึ้น ซึ่งปลอกเหล็กจะมีช่วยคอนกรีตในการรองรับแรงกระทำ จากการวิเคราะห์โดย Finite element analysis พบว่าการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตจะสู่ปลอกเหล็กจะมีค่าไม่สูงเกินกว่า 30% เนื่องจากปลอกเหล็กไม่ใช่วัสดุในการรับแรงกระทำโดยตรง เพียงแต่มีช่วยในการรองรับแรงกระทำร่วมกับคอนกรีตเท่านั้น

จากตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบไปยังปลอกเหล็ก โดยพิจารณา เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงที่ค่าหน่วยแรงสูงสุด (f'_{max}) ของ Tubed RC column จากผลการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงมีค่าอยู่ในช่วง 2.5-14.8% ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับศึกษาที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีค่าไม่เกิน 30% เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแข็งแรงเพียงพอสามารถต้านทานการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตที่แตกร้าว และปลอกเหล็กหน้าตัดวงกลม มีความสามารถในการโอบรัดได้ดีกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาการโอบรัดต่อแกนคอนกรีตได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของ Tubed RC column หน้าตัดสี่เหลี่ยม ในงานวิจัยของ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2550) พบว่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงอยู่ในช่วง 26.1-65.7% ซึ่งมีค่าแตกต่างกับผลของการศึกษาของ Johansson (2000) และผลการทดสอบในครั้งนี้อย่างมาก เนื่องจากรูปร่างของหน้าตัดเสาเป็นรูปสี่เหลี่ยมจึงมีความแข็งแรงไม่เพียงพอในการต้านทานการดันออกทางด้านข้างของแกนคอนกรีตหลังจากรองรับแรงกระทำในแนวแกน ทำให้ผนังปลอกเหล็กเกิดการโก่งตัวเฉพาะที่ไม่สามารถพัฒนาการโอบรัดต่อแกนคอนกรีตได้

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
1	C18-0-0	306.3	19.9	-	-	-	-
	C25-0-0	411.0	26.7	-	-	-	-
	C32-0-0	491.1	31.9	-	-	-	-
2	CS18-32-0	899.0	58.4	231.6	46.7	71.9	8.0
	CS25-32-0	1065.3	69.2	171.1	34.5	53.1	5.0
	CS32-32-0	1265.4	82.2	603.9	121.7	187.5	14.8
	CS18-45-0	1139.1	74.0	103	21.1	46.1	4.0
	CS25-45-0	1325.4	86.1	127.6	26.2	57.1	4.3
	CS32-45-0	1488.6	96.7	375.6	77.0	168.2	11.3
	CS18-60-0	1390.1	90.3	120.4	23.8	69.9	5.0
	CS25-60-0	1553.2	100.9	315	62.2	182.9	11.8
	CS32-60-0	1673.3	108.7	149.3	29.5	86.7	5.2

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{\max} (kN)	f'_{\max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
3	CS18-32-0.05	991.4	64.4	81	16.3	25.1	2.5
	CS25-32-0.05	1140.7	74.1	143.9	29.0	44.7	3.9
	CS32-32-0.05	1317.7	85.6	530.6	107.0	164.7	12.5
	CS18-45-0.05	1283.8	83.4	94.5	19.4	42.3	3.3
	CS25-45-0.05	1490.1	96.8	163.2	33.5	73.1	4.9
	CS32-45-0.05	1613.3	104.8	390.3	80.0	174.8	10.8
	CS18-60-0.05	1494.7	97.1	101.5	20.0	58.9	3.9
	CS25-60-0.05	1608.7	104.5	192.5	38.0	111.8	6.9
	CS32-60-0.05	1779.5	115.6	134.2	26.5	77.9	4.4

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม (ต่อ)

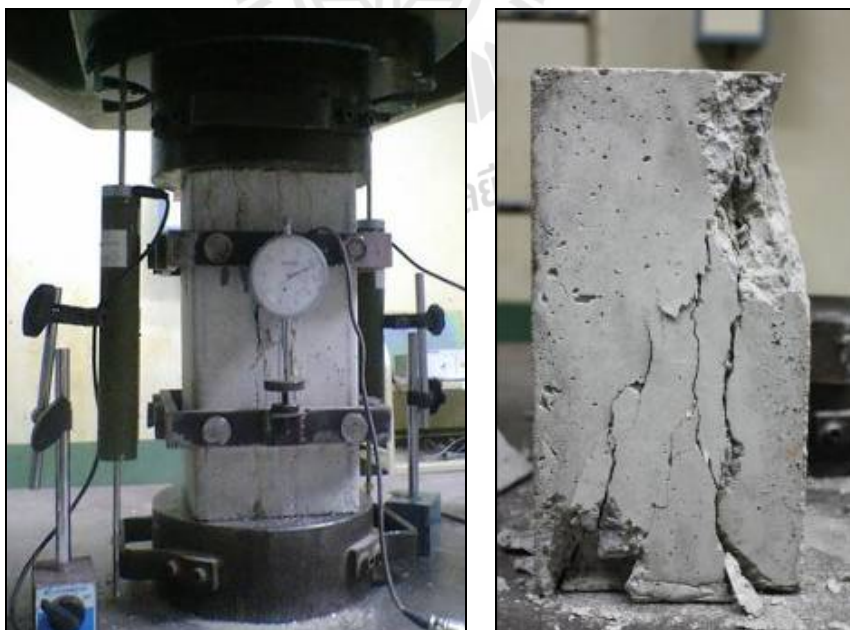
กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
4	CS18-32-0.08	1031.4	67.0	117	23.6	36.3	3.5
	CS25-32-0.08	1177.6	76.5	175	35.3	54.3	4.6
	CS32-32-0.08	1360.8	88.4	576.6	116.2	179.0	13.2
	CS18-45-0.08	1317.7	85.6	97.8	20.1	43.8	3.3
	CS25-45-0.08	1514.8	98.4	145.4	29.8	65.1	4.3
	CS32-45-0.08	1647.1	107.0	412	84.5	184.5	11.2
	CS18-60-0.08	1514.8	98.4	113.7	22.5	66.0	4.4
	CS25-60-0.08	1641.0	106.6	176.2	34.8	102.3	6.2
	CS32-60-0.08	1808.8	117.5	155.6	30.7	90.4	5.0

4.2.3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ในการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

(1) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากการทดสอบพบว่าลักษณะการวิบัติตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) ที่ถูกให้แรงกดอัดในแนวแกนในส่วนช่วงแรกเกิดการแตกร้าวในบริเวณผิวด้านบนและล่าง เนื่องจากช่วงที่ตัวอย่างทดสอบอ้างอิงมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) ความเครียดแนวกดอัดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวในแนวแกนและเกิดการขยายตัวออกด้านข้างตามหลักของ Poisson's effect ผลทำให้รอยแตกร้าวมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นรวมทั้งผิวด้านนอกของคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนส่งผลให้กำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงมีค่าลดลง อันเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงมีขนาดลดลงตามการแตกร้าวที่มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างทดสอบอ้างอิงสามารถที่รับแรงต่อไปอีกระยะหนึ่งจนกระทั่งเกิดการวิบัติตามแนวแกนอย่างทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง

สำหรับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 นั้นพบว่า มีลักษณะคล้ายกันเมื่อทำการทดสอบให้แรงกดอัดในแนวแกน โดยควบคุมการให้แรงกระทำอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอเริ่มต้นจากการอัดแตก (Crushing) ของคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำ (ซึ่งเป็นการวิบัติเฉพาะส่วน (Local failure) และเกิดจากหน่วยแรงรวมศูนย์ (Stress concentration)) ช่วงแรกลักษณะการหดตัวในแนวแกนมีค่าน้อยมากและไม่แสดงอาการภายนอกให้เห็นในช่วงต้น เมื่อการหดตัวลงในแนวแกนและการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก Poisson's effect โดยการขยายตัวทางด้านข้างจะก่อให้เกิดแรงค้ำกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กประกอบกับปลอกเหล็กอยู่ในรูปของแผ่น (Plate) และความแกร่งต่อการค้ำไม่สูงมากนักกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกน เนื่องจาก Micro - interlocking และแรงเสียดทานที่ถ่ายมาจากแรงกดอัดของคอนกรีต ส่งผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กอยู่ในสภาพ Beam - column และเป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็ก จะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำอย่างรวดเร็ว โดยการโก่งเดาะของผนังของปลอกเหล็กดังกล่าวจะเกิดขึ้นมากสุดในบริเวณที่กึ่งกลางความสูง ช่วงความสูง 100 - 150 mm ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ดังนั้นปลอกเหล็ก จึงไม่มีความสามารถในการโอบรัดคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามปลอกเหล็ก ดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าด้วยกันและทำให้การอัดแตก (Crushing) ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงมีความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่องและทำให้แรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็กตามกลไก (Mechanism) เมื่อการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่าสูงมากขึ้นแล้วนั้น ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบมีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติโดยรวม



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างลักษณะหน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ความหนา 3.2 4.5 6.0 mm

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive failure) โดยจะหยุดการทดสอบที่ระยะการหดตัวที่ 25 มิลลิเมตร เทียบเท่ากับค่าความเครียดประมาณ 0.080 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตประมาณ 30 เท่า และตัวอย่างทดสอบจะยังไม่เกิดการวิบัติที่สมบูรณ์ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ ตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) และ ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (กลุ่มที่ 2-4)

การวิบัติของตัวอย่างอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) หลังจากตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงเริ่มรับแรงกระทำอย่างช้า ๆ และตัวอย่างทดสอบเริ่มมีการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ ซึ่งรูปแบบของการวิบัตินั้นมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติคอนกรีตกำลังอัดปกติทั่วไป ตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงกดอัดร่วมกัน โดยทำมุมประมาณ 50 องศา และลักษณะการวิบัติเป็นรอยแตกแบบเฉือนหรือรูปกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.24

สำหรับการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน โดยเกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีตซึ่งดันผนังปลอกเหล็กให้เกิดการโป่งตัวออกทางด้านข้างโดยเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26

โดยสรุปพบว่าตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2-4 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติ และมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิงและตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร เกิดการโป่งตัวออกทางด้านข้างน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กหนา 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กดังกล่าวมีความแข็งแรงเพียงพอในการจำกัดการขยายตัวของแกนคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเพียงพอดำเนินการ

มาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของ ว.ส.ท. 1008-38 และ AISC/LRFD โดยที่ความหนา
ปลอกเหล็กทั้ง 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.24 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงกลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.25 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2



รูปที่ 4.26 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4

4.2.4 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอถึงหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัด โดยนำเสนอ 2 ส่วน คือ (1) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

(1) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เมื่อพิจารณาหน่วยแรงใช้งานของตัวอย่างทดสอบ (f'_{max}) เปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงใช้งานของคอนกรีตในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($f'_{max,conc}$) มีค่าแตกต่างกันมากเนื่องจากตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีความสามารถในการโอบรัดต่ำกว่าหน้าตัดกลมทำให้เกิดการถ่ายเทแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กมีค่าสูงมาก ดังนั้นในการพิจารณากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส จึงพิจารณาที่ค่า $f'_{max,conc}$ ซึ่งค่าดังกล่าวเกิดจากการหักกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กออก

เมื่อนำค่า $f'_{max,conc}$ ที่แสดงในตารางที่ 4.10 มาพิจารณาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนจากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 4.23 - 18.76% และ 7.25 - 27.00% ที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ ตามลำดับ เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากัน อัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น (เช่น จาก 1.10 เป็น 1.04 ใน $f'_{max,conc,0.05 f'_{co}} / f'_{max,conc,0}$ ที่ความหนา 3.2 mm เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} สูงขึ้น จาก 18 MPa เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก) - (ค) และอัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นในปลอกเหล็กที่มีความหนามาก (6.0 mm) และลดลงเมื่อความหนาน้อยลง (เช่น จาก 1.10 เป็น 1.19 ใน $f'_{conc,0.05 f'_{co}} / f'_{conc,0}$ ที่ $f'_{co}=18$ MPa เมื่อปลอกเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น จาก 3.2 mm เป็น 6.0 mm)

โดยสรุปแล้ว พบว่าอัตราส่วนกำลังที่เพิ่มขึ้นของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ มีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$ แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่มากขึ้น อีกทั้งอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังอัดประลัย (f'_{co}) ที่ต่ำ (18 MPa) และปลอกเหล็กที่มีค่าความหนามาก (6.0 mm) นั่นคือ SR18-6.0-0.1 f'_{co}



ตารางที่ 4.10 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส
เมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปดอกเหล็ก

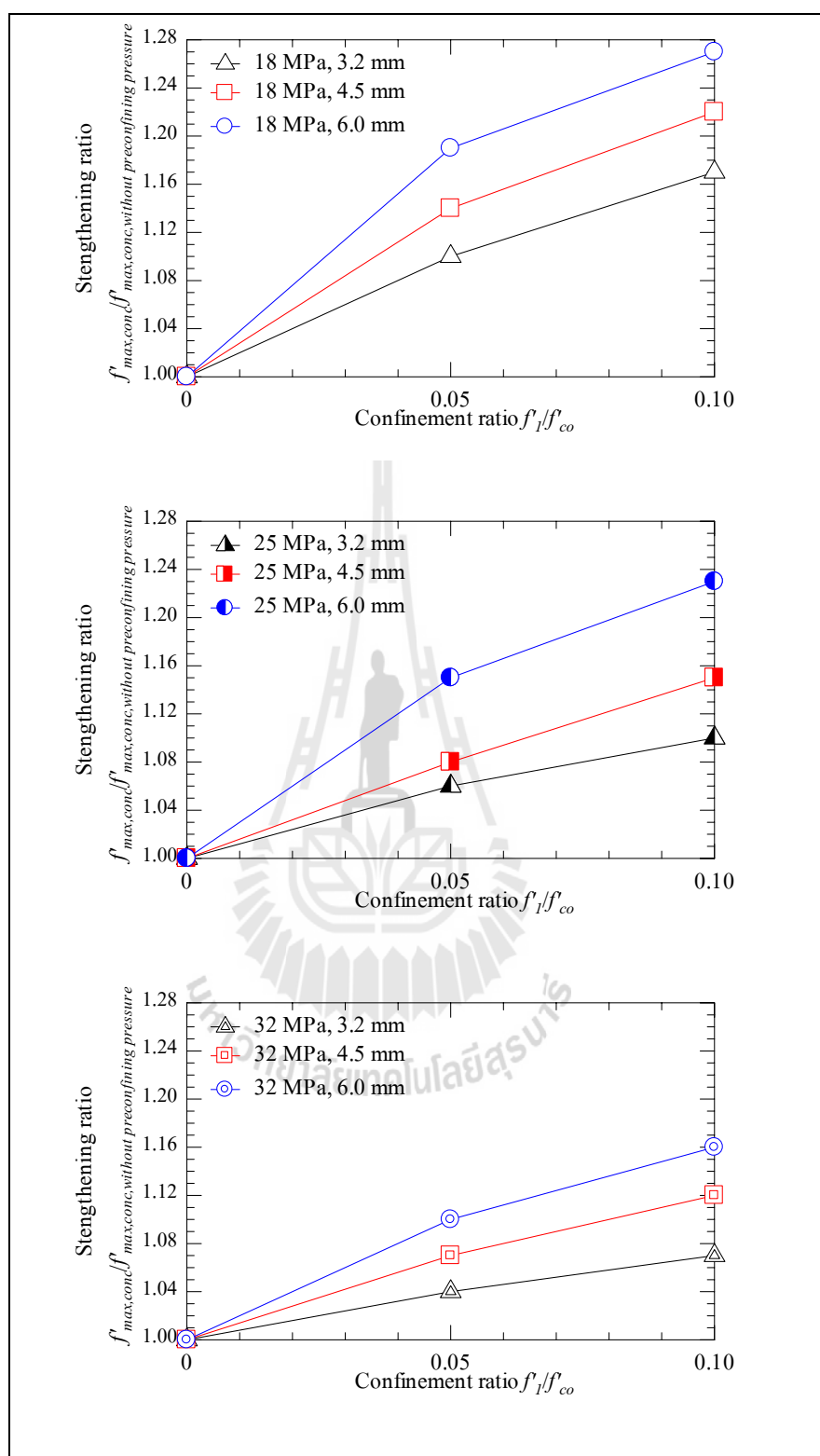
กลุ่ม	ตัวอย่าง	f'_{max} (MPa)	P'_{max} (kN)	แรงกดอัดในแนวแกน ของคอนกรีต $P'_{max,conc}$ (kN)	หน่วยแรงกดอัด ในแนวแกนของ คอนกรีต $f'_{max,conc}$ (MPa)
2	SR18-3.2-0	35.50	798.64	501.05	22.27
	SR25-3.2-0	39.90	897.84	624.58	27.76
	SR32-3.2-0	44.72	1006.26	717.45	31.89
	SR18-4.5-0	40.48	910.70	622.13	27.65
	SR25-4.5-0	49.59	1115.74	729.28	32.41
	SR32-4.5-0	53.33	1199.93	803.80	35.72
	SR18-6.0-0	43.74	984.05	768.06	34.14
	SR25-6.0-0	58.74	1321.56	840.69	37.36
	SR32-6.0-0	63.72	1433.65	920.67	40.92
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	39.09	879.55	553.24	24.59
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	43.64	981.89	659.57	29.31
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	47.53	1069.33	747.80	33.24
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	45.53	1024.43	710.26	31.57
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	54.82	1233.47	787.82	35.01
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	57.21	1287.20	858.05	38.14
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	51.70	1163.15	912.13	40.54
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	66.29	1491.59	969.85	43.10
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	70.43	1584.68	1009.68	44.87

ตารางที่ 4.10 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส
เมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปดอกเหล็ก (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	f'_{\max} (MPa)	P'_{\max} (kN)	แรงกดอัดในแนวแกน ของคอนกรีต $P'_{\max,conc}$ (kN)	หน่วยแรงกดอัด ในแนวแกนของ คอนกรีต $f'_{\max,conc}$ (MPa)
4	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	39.84	896.46	586.90	26.08
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	44.49	1000.92	686.57	30.51
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	49.14	1105.75	769.46	34.20
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	46.91	1055.50	761.81	33.86
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	56.84	1278.96	836.72	37.19
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	59.15	1330.88	904.01	40.18
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	52.40	1179.04	975.45	43.35
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	68.04	1530.79	1036.78	46.08
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	72.19	1624.37	1070.53	47.58

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน
กับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$

ตัวอย่าง	$f'_{\max,conc}$ (MPa)			$\frac{f'_{\max,conc,0.05 f'_{co}}}{f'_{\max,conc,0}}$	$\frac{f'_{\max,conc,0.1 f'_{co}}}{f'_{\max,conc,0}}$
	$f'_{\max,conc,0}$ (MPa)	$f'_{\max,conc,0.05 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{\max,conc,0.1 f'_{co}}$ (MPa)		
SR18-3.2	22.27	24.59	26.08	1.10	1.17
SR25-3.2	27.76	29.31	30.51	1.06	1.10
SR32-3.2	31.89	33.24	34.20	1.04	1.07
SR18-4.5	27.65	31.57	33.86	1.14	1.22
SR25-4.5	32.41	35.01	37.19	1.08	1.15
SR32-4.5	35.72	38.14	40.18	1.07	1.12
SR18-6.0	34.14	40.54	43.35	1.19	1.27
SR25-6.0	37.36	43.10	46.08	1.15	1.23
SR32-6.0	40.92	44.87	47.58	1.10	1.16



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stengthening ratio $f'_{max,conc} / f'_{max,conc, \text{ without preconfinement}}$ และ Confinement ratio f'_1 / f'_{co}

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

จาก Column ที่ 4 ในตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} โดยเมื่อพิจารณากำลึงอัดประลัยที่เท่ากัน พบว่าตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ความหนา 3.2 มิลลิเมตร จะมีค่าอัตราส่วนของกำลึงที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 2.58-3.37 เท่า ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตรมีค่าอยู่ในช่วง 3.03-4.30 และ 3.41-4.94 เท่า ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความหนาและกำลึงอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากัน พบว่าอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดที่สูงขึ้น เนื่องจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน แก่ตัวอย่างทดสอบทำให้ปลอกเหล็กชิดกับแกนคอนกรีตมากกว่า ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ดังนั้นจึงเกิดการโอบรัดระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเริ่มรับแรงกระทำ และเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำจึงสามารถรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เท่ากัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} จากความหนา 3.2 มิลลิเมตร ไปความหนา 4.5 มิลลิเมตร มีค่าการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45-95% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตร ไปยัง 6.0 มิลลิเมตร มีการเพิ่มขึ้นค่าในช่วง 33-82%

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนและตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} จากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 13-47% ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ f'_{max} / f'_{co} จากตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ ไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.08 f'_{co}$ มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6-13%

โดยสรุปพบว่าปลอกเหล็กที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และตัวอย่างทดสอบจะมีความสามารถรับแรงกระทำลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลึงอัดประลัยที่สูงขึ้น นอกจากนั้นการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนจากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังมีการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างเพิ่มขึ้นเป็น $0.05 f'_{co}$ นั้นทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้นจาก $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ ซึ่งการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ นั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะ

ช่วยทำให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นยังช่วยทำให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ($f'_{\max} / f'_{\max,0f'_{co}}$) และอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดก่อนต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยของคอนกรีตและความหนาที่เท่ากันพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ มีแนวโน้มสูงกว่าอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.08 f'_{co}$ และอัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

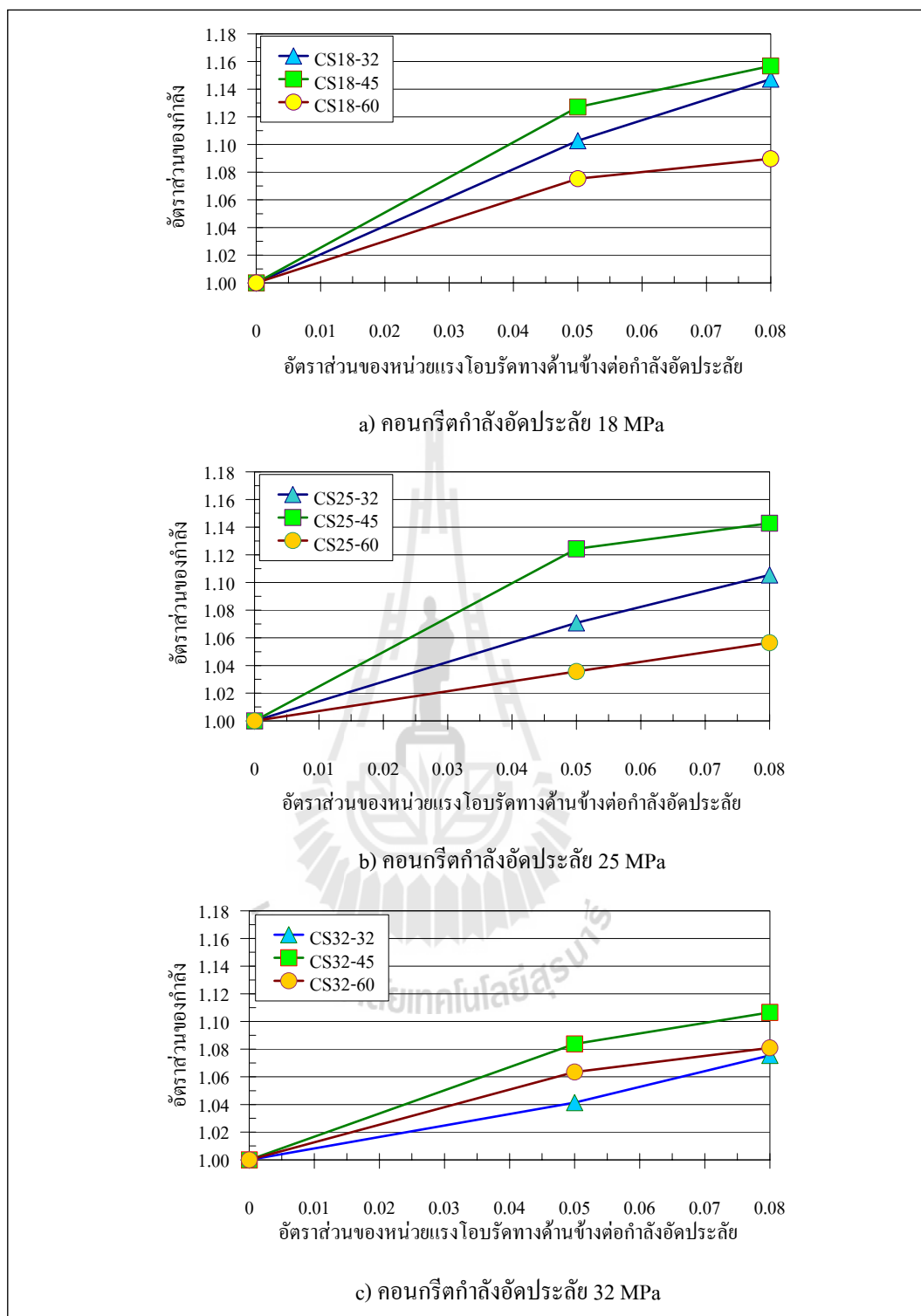
เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่เท่ากันพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตร มีแนวโน้มของอัตราส่วนกำลังดังกล่าวดีกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 และ 6.0 มิลลิเมตรและอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

จากรูปที่ 4.27 พบว่าอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ในตัวอย่างทดสอบ CS18-32-0.08 ดังแสดงในรูป 4.27a และ CS32-32-0.08 ดังแสดงในรูป 4.27c ซึ่งตัวอย่างทั้งสองมีพฤติกรรมไม่สอดคล้องกับตัวอย่างทดสอบอื่น ๆ คือ ในตัวอย่างทดสอบอื่น ๆ จะมีเส้นกราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.08 f'_{co}$ แต่ในตัวอย่างทดสอบทั้งสอง กลับมีแนวโน้มของเส้นกราฟสูงขึ้นซึ่งแตกต่างแนวโน้มส่วนใหญ่ของตัวอย่างทดสอบ เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น (1) ขั้นตอนในการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต (2) ขั้นตอนในการเชื่อมตัวอย่างทดสอบหลังจากมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (3) การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องมือให้แรงกดอัดแก่ตัวอย่างทดสอบ เป็นต้น

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบกำลังระหว่างตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลมที่มีการให้หน่วยแรง
โอบรัดก่อนและตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ตัวอย่างทดสอบ	f'_{\max}			$\frac{f'_{\max,0.05 f'_{co}}}{f'_{\max,0 f'_{co}}}$	$\frac{f'_{\max,0.08 f'_{co}}}{f'_{\max,0 f'_{co}}}$
	$f'_{\max,0 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{\max,0.05 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{\max,0.08 f'_{co}}$ (MPa)		
CS18-32	58.4	64.4	67.0	1.10	1.15
CS25-32	69.2	74.1	76.5	1.07	1.11
CS32-32	82.2	85.6	88.4	1.04	1.08
CS18-45	74.0	83.4	85.6	1.13	1.16
CS25-45	86.1	96.8	98.4	1.12	1.14
CS32-45	96.7	104.8	107.0	1.08	1.11
CS18-60	90.3	97.1	98.4	1.08	1.09
CS25-60	100.9	104.5	106.6	1.04	1.06
CS32-60	108.7	115.6	117.5	1.06	1.08





รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนและอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดก่อนต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

4.2.5 ผลของหน่วยแรงโอบรัดก่อนต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาถึงผลของการเพิ่มหน่วยแรงโอบรัดก่อนให้แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตจากสมการในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง (Richart et al., 1928) ดังแสดงในสมการ 2.3 ของนิยามค่าต่าง ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับการวิจัยครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

นิยามให้ค่า f'_{max} คือ กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed concrete specimen ทั้ง 2 หน้าตัด คือ หน้าตัดกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเมื่อพิจารณาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตนิยามให้ $f'_{max,conc}$ คือ หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นของคอนกรีต สามารถคำนวณได้จากการนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กหักออกจากค่า f'_{max} ดังนั้นค่า $f'_{max,conc}$ จะมีค่าเทียบเท่ากับค่า f'_{cc} ในสมการ 2.3 ในหัวข้อที่ 2.3 ของบทที่ 2

นิยามให้ ค่า $f'_{max,conc}$ ที่ได้จากการทดสอบนั้น เป็นผลรวมของ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{co}) และพจน์ของ $k_1 f_1$ ซึ่งค่าของ $k_1 f_1$ เป็นผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement เมื่อพิจารณาผลของ Passive confinement จะขึ้นอยู่กับความแกร่งของปลอกเหล็กที่นำมาโอบรัดตัวอย่างทดสอบ และผลของ Active confinement เกิดจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ดังนั้นจากนิยามข้างต้นได้แสดงไว้ในสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$f'_{max,conc} = f'_{co} + k_1 f_1 \quad (4.3)$$

$$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ac} \quad (4.4)$$

นิยามให้ ค่า $f'_{max,pass}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement โดยที่ค่าของ $f'_{max,pass}$ คือ หน่วยแรงของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (หน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)

นิยามให้ ค่า $f'_{max,ac}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement สามารถหาค่าดังกล่าวได้จาก ค่าหน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ สำหรับหน้าตัดกลม และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.10 f'_{co}$ สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (หน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4) หักออกด้วย กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{co}) และค่าหน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (หน่วยแรง

กคยคของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2) ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$f'_{\max,ac} = f'_{\max,conc} - f'_{co} - f'_{\max,pass} \quad (4.5)$$

โดยที่ $f'_{\max,conc}$ คือ หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นของคอนกรีต
 $f'_{\max,pass}$ คือ หน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในตารางที่ 4.13 แสดงถึงผลของการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรง f'_{act} ที่เพิ่มขึ้น จาก f'_{pass} มีค่าสูงขึ้นประมาณ 11.24 - 36.86%

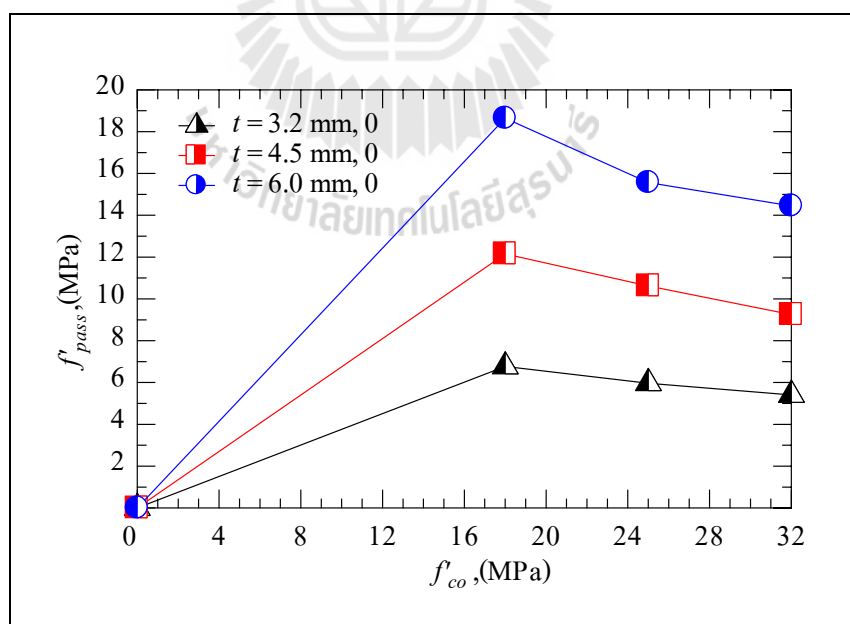
เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรง Passive confinement ที่ f'_{co} เท่ากันค่าหน่วยแรง ดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น พบมากสุดในความหนา 6.0 mm (เช่น จาก 6.77 เป็น 18.64 MPa ใน f'_{pass} ที่ $f'_{co} = 18$ MPa เมื่อปลอกเหล็กหนาเพิ่มขึ้นจาก 3.2 mm เป็น 6.0 mm) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และความหนาเท่ากัน พบว่าค่าหน่วยแรงในตัวอย่างทดสอบ คอนกรีตที่ f'_{co} น้อย (18 MPa) ค่า f'_{pass} มากกว่าคอนกรีตที่ f'_{co} ปานกลางและสูง (25 และ 32 MPa) (เช่น จาก 18.64 MPa เป็น 14.45 MPa ใน f'_{pass} ที่ความหนา 6.0 mm เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} จาก 18 MPa เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

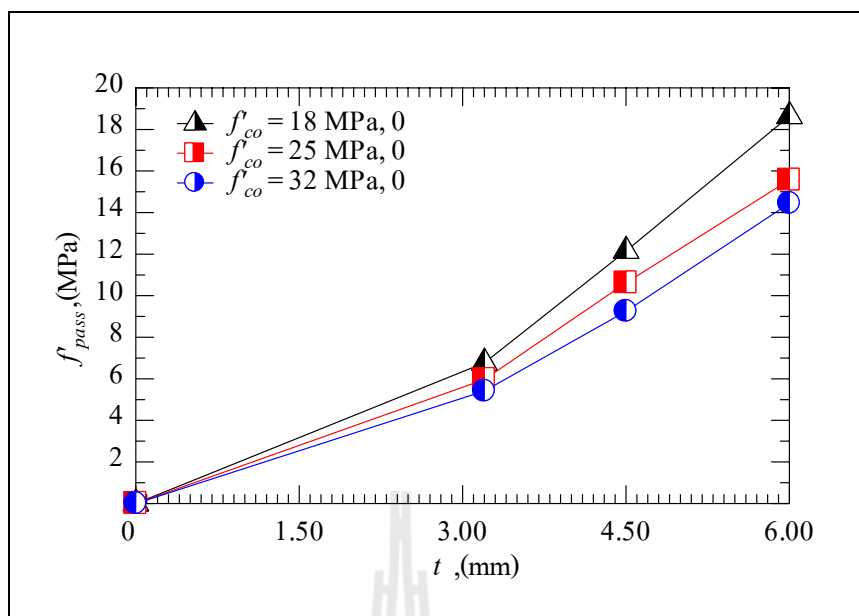
กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการคำนวณตามแบบจำลอง $f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$						
		f_1 (MPa)	k_s	f'_1 (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	f'_{pass} (MPa)	f'_{act} (MPa)
1	CR18-0-0	-	-	-	15.50	-	-	-
	CR25-0-0	-	-	-	21.79	-	-	-
	CR32-0-0	-	-	-	26.47	-	-	-
2	SR18-3.2-0	13.88	0.41	5.69	22.27	15.50	6.77	-
	SR25-3.2-0	13.88	0.41	5.69	27.76	21.79	5.97	-
	SR32-3.2-0	13.88	0.41	5.69	31.89	26.47	5.41	-
	SR18-4.5-0	19.57	0.44	8.61	27.65	15.50	12.15	-
	SR25-4.5-0	19.57	0.44	8.61	32.41	21.79	10.62	-
	SR32-4.5-0	19.57	0.44	8.61	35.72	26.47	9.25	-
	SR18-6.0-0	26.21	0.47	12.32	34.14	15.50	18.64	-
	SR25-6.0-0	26.21	0.47	12.32	37.36	21.79	15.57	-
	SR32-6.0-0	26.21	0.47	12.32	40.92	26.47	14.45	-
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	13.88	0.41	5.69	24.59	15.50	6.77	2.32
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	13.88	0.41	5.69	29.31	21.79	5.97	1.55
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	13.88	0.41	5.69	33.24	26.47	5.41	1.35
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	31.57	15.50	12.15	3.92
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	35.01	21.79	10.62	2.60
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	38.14	26.47	9.25	2.41
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	40.54	15.50	18.64	6.40
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	43.10	21.79	15.57	5.74
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	44.87	26.47	14.45	3.96

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการคำนวณตามแบบจำลอง $f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$						
		f_1 (MPa)	k_s	f'_1 (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	f'_{pass} (MPa)	f'_{act} (MPa)
4	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	13.88	0.41	5.69	26.08	15.50	6.77	3.82
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	13.88	0.41	5.69	30.51	21.79	5.97	2.75
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	13.88	0.41	5.69	34.20	26.47	5.41	2.31
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	33.86	15.50	12.15	6.21
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	37.19	21.79	10.62	4.78
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	40.18	26.47	9.25	4.45
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	43.35	15.50	18.64	9.22
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	46.08	21.79	15.57	8.72
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	47.58	26.47	14.45	6.66



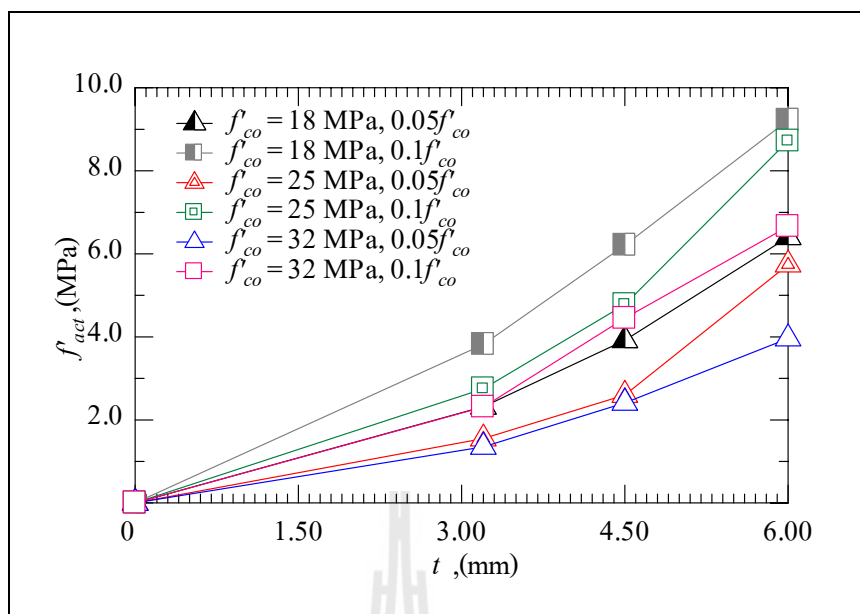
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



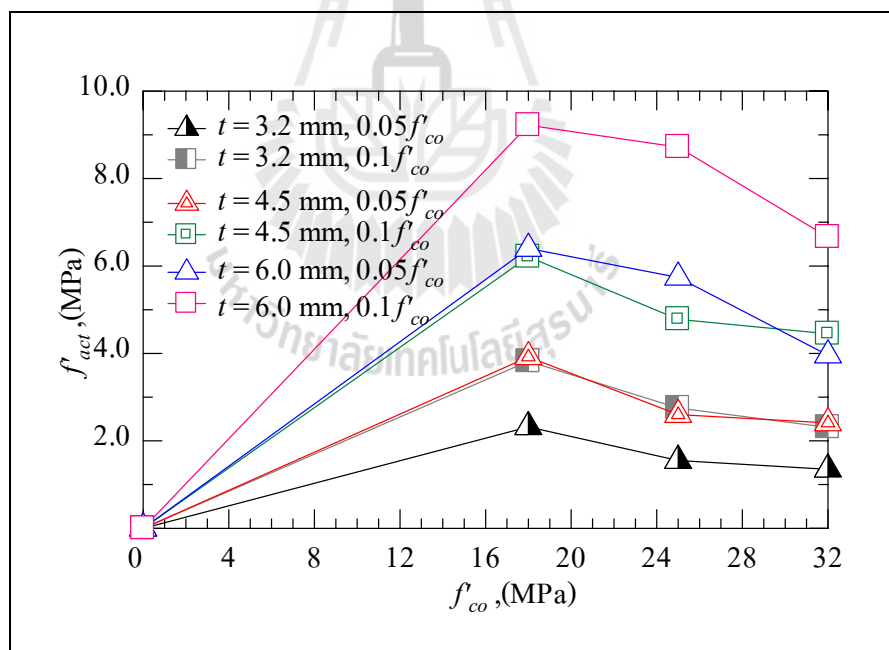
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เมื่อพิจารณาหน่วยแรงจากผล Active confinement ดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าค่าหน่วยแรงมีค่าสูงขึ้นตามความหนาเปลือกเหล็กที่หนาขึ้น กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายซึ่งความหนาเปลือกเหล็กที่ทำให้ f'_{act} มีค่าสูงสุดคือความหนา 6.0 mm (เช่น จาก 3.82 เป็น 9.22 MPa ใน f'_{act} ที่ $f'_{co} = 18$ MPa และค่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$ เมื่อเปลือกเหล็กมีความหนาจาก 3.2 เป็น 6.0 mm) และที่ความหนาเท่ากันพบว่าค่า f'_{act} จะมีแนวโน้มสูงในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่มี f'_{co} น้อย (18 MPa) และจะมีค่าลดลงใน f'_{co} ปานกลางและสูง (25 และ 32 MPa) (เช่น จาก 9.22 เป็น 6.66 MPa ใน f'_{act} ที่ความหนา 6.0 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$ เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} จาก 18 เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.30

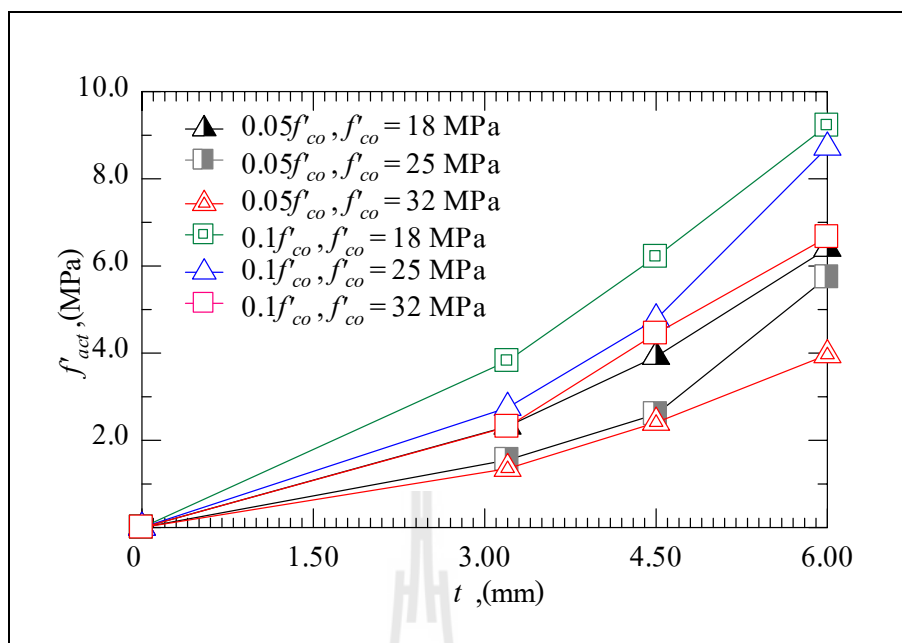
การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ค่าการอัดแรงต่างกัน พบว่าลักษณะกราฟในรูปที่ 4.31 มีรูปร่างแบบโค้งหงายเช่นเดียวกับรูปที่ 4.26 โดยหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement นั้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาที่มากขึ้น และมีค่ามากขึ้นใน f'_{co} ที่ต่ำ (18 MPa) และค่าลดลงเมื่อกำลังปานกลาง (25 MPa) และสูง (32 MPa) ค่า f'_{act} ของตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ ไปยัง $0.1 f'_{co}$ พบว่าค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 43.95 - 84.70% และเมื่อพิจารณาถึงค่า f'_{act} ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เท่ากันพบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของค่า f'_{act} จากความหนา 3.2 ไปยัง 4.5 mm มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 62.71 - 92.67% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่เพิ่มขึ้นของเปลือกเหล็กหนา 4.5 ไปยัง 6.0 mm มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 48.48 - 120.64%



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

โดยสรุปแล้ว พบว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบ ที่ค่าการอัดแรงต่างกัน หน่วยแรงจากผล Passive confinement และ Active confinement มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาที่มาก (6 mm) และมีมากใน f'_{co} ที่ต่ำ (18 MPa) ซึ่งพบมากที่สุดที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$

นอกเหนือจากนั้นยังได้พิจารณาด้านราคาในการตัดสินใจเพื่อเลือกความหนาและการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาในลำดับต่อไปในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งจำหน่ายในหัวข้อถัดไป จากตารางที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างราคาก่อสร้างต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน สำหรับการดำเนินงานก่อสร้างตัวอย่างทดสอบคอนกรีต 1 ตัวอย่าง ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วนกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนภายใต้การให้แรงกดอัดในแนวแกนที่เท่ากัน โดยคำนึงราคาวัสดุใน ส่วนกลาง สำหรับการถอดแบบและคำนวณราคากลางจากกลุ่มดัชนีในการก่อสร้างสำนักงานดัชนีเศรษฐกิจการค้า ของกรมการค้าภายในซึ่งเป็นราคาซื้อขายด้วยเงินสด. โรงงานหรือร้านค้าโดยไม่รวมค่าขนส่งและภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT.) ดังต่อไปนี้

ค่าวัสดุ

- ปลอกเหล็กหนา 3.2 mm ราคา 276 บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
- ปลอกเหล็กหนา 4.5 mm ราคา 388 บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
- ปลอกเหล็กหนา 6.0 mm ราคา 516 บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
- คอนกรีต $f'_{co}=18$ MPa ราคา 2470 บาท/ลบ.ม
เท่ากับ 18.53 บาท/ตัวอย่าง
- คอนกรีต $f'_{co}=25$ MPa ราคา 2550 บาท/ลบ.ม
เท่ากับ 19.13 บาท/ตัวอย่าง
- คอนกรีต $f'_{co}=32$ MPa ราคา 2740 บาท/ลบ.ม
เท่ากับ 20.55 บาท/ตัวอย่าง

ค่าแรงงาน (เชื่อมปลอกเหล็ก+อัดแรง)

ราคา 250 บาทต่อ 1 ตัวอย่าง

ค่าเครื่องมือ

- แบบปลอกเหล็ก ราคา 5000 บาท
- ประแจปอนด์ ราคา 8000 บาท
- บ็อกซ์ประแจปอนด์ ราคา 510 บาท

จากตารางที่ 4.14 พบว่าอัตราส่วนราคาต่อกำลังของตัวอย่างทดสอบในตัวอย่างกลุ่มที่ 1 มีค่า 0.78 - 1.20 กลุ่มที่ 2 มีค่า 8.69 - 16.76 และกลุ่มที่ 3 มีค่า 13.48 - 23.60 และในกลุ่มที่ 4 มีค่า 12.61 - 22.94 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนราคาต่อกำลังที่เพิ่มขึ้นความหนาของปลอกเหล็กเท่ากันพบว่าอัตราส่วนราคาต่อกำลังมีแนวโน้มเพิ่ม เมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วย f'_{co} ที่น้อยและมีแนวโน้มลดลงเมื่อ f'_{co} สูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อค่า t สูงขึ้น พบมากที่สุดที่ความหนา 6.0 mm $f'_{co}=18$ MPa และค่าหน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.05 f'_{co}$ ยังพบว่าอัตราส่วนราคาต่อกำลังที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนเพิ่มขึ้น (จาก $0.05 f'_{co}$ ไป $0.1 f'_{co}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น แสดงว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ที่มากขึ้นทำให้กำลังของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะถูกลง

โดยสรุปแล้ว ความหนาที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นและลดลงเมื่อคอนกรีตที่ใช้มีกำลังสูง อีกทั้งผลการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน และสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงของพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิม โดยเมื่อพิจารณาค่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมในการศึกษานี้พบว่าความหนา 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.1 f'_{co}$ เป็นตัวแปรที่เหมาะสมในการศึกษา

ท่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกล้อมด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ค่าดังกล่าวนี้สามารถที่จะเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในช่วงของเส้นตรงได้สูงขึ้นประมาณ 60 - 80% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนั้นพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.1 f_{co}'$ เป็นแบบ Elastic - perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งานอีกทั้ง พบว่าเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่มากขึ้น (กำลังของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้น) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะมีแนวโน้มน้อยลงและเมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ความหนา 6.0 mm พบว่าเกิดการโป่งออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 3.2 และ 4.5 mm เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 6.0 mm มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านทั้งสองมาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของเสาเชิงประกอบคือ AISC/LRFD และ ว.ส.ท.



ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างราคาก่อสร้างต่อกำลังที่สภาวะใช้งานของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตัวอย่าง	ราคาต่อหน่วย (Baht)			กำลังอัดที่สภาวะใช้งาน, $f'_{max,conc}$ (MPa)				ราคา/ กำลัง			
	คอนกรีตล้วน	คอนกรีตล้วน +หุ้มเหล็ก	คอนกรีตล้วน +หุ้มเหล็ก +อัดแรง	f'_{co}	$f'_{max,conc,0}$	$f'_{max,conc,0.05 f'_{co}}$	$f'_{max,conc,0.1 f'_{co}}$	Group 1 (Ref.)	Group 2 Non- preconfine	Group 3 Preconfine $0.05 f'_{co}$	Group 4 Preconfine $0.1 f'_{co}$
SR18-3.2	18.53	294.53	544.53	15.50	22.27	24.59	26.08	1.20	13.23	22.14	20.88
SR18-4.5	18.53	406.53	656.53	15.50	27.76	29.31	30.51	1.20	14.64	22.40	21.52
SR18-6.0	18.53	534.53	784.53	15.50	31.89	33.24	34.20	1.20	16.76	23.60	22.94
SR25-3.2	19.13	295.13	545.13	21.79	27.65	31.57	33.86	0.88	10.67	17.27	16.10
SR25-4.5	19.13	407.13	657.13	21.79	32.41	35.01	37.19	0.88	12.56	18.77	17.67
SR25-6.0	19.13	535.13	785.13	21.79	35.72	38.14	40.18	0.88	14.98	20.59	19.54
SR32-3.2	20.55	296.55	546.55	26.47	34.14	40.54	43.35	0.78	8.69	13.48	12.61
SR32-4.5	20.55	408.55	658.55	26.47	37.36	43.10	46.08	0.78	10.94	15.28	14.29
SR32-6.0	20.55	536.55	786.55	26.47	40.92	44.87	47.58	0.78	13.11	17.53	16.53

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

จากตารางที่ 4.15 พบว่าตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 เป็นตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กแล้วเชื่อมตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นเมื่อตัวอย่างรองรับแรงกดอัดในแนวแกน แกนคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวและดันปลอกเหล็กทำให้เกิดหน่วยแรงโอบรัดแบบ Passive confinement

พิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 (ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตดังกล่าวจะถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะรองรับแรงกดอัดในแนวแกน แกนคอนกรีตจะถูกโอบรัดโดยหน่วยแรงโอบรัดแบบ Active confinement เป็นผลเนื่องจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน หลังจากตัวอย่างทดสอบรองรับแรงกระทำแล้ว แกนคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างไปดันปลอกเหล็กซึ่งทำให้แกนคอนกรีตจะเกิดหน่วยแรงโอบรัด Passive confinement ดังนั้นสำหรับในตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4 จะเกิดหน่วยแรงโอบรัดทั้ง 2 แบบ คือ เกิดหน่วยแรงแบบ Active confinement เป็นลำดับแรกเนื่องจากมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นจะเกิดหน่วยแรงโอบรัดแบบ Passive confinement หลังจากตัวทดสอบรับแรงกระทำในแนวแกน



ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ								
		P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ϵ_{steel} (microstrain)	P_{steel} (kN)	P'_{conc} (kN)	$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ac}$			
							$f'_{max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	$f'_{max,pass}$ (MPa)	$f'_{max,ac}$ (MPa)
1	C18-0-0	306.3	19.9	-	-	-	-	-	-	-
	C25-0-0	411.0	26.7	-	-	-	-	-	-	-
	C32-0-0	491.1	31.9	-	-	-	-	-	-	-
2	CS18-32-0	899.0	58.4	231.6	71.9	827.1	53.7	19.9	33.8	0.0
	CS25-32-0	1065.2	69.2	171.1	53.1	1012.1	65.7	26.7	39.0	0.0
	CS32-32-0	1265.4	82.2	603.9	187.5	1077.9	70.0	31.9	38.1	0.0
	CS18-45-0	1139.1	74.0	103	46.1	1093.0	71.0	19.9	51.1	0.0
	CS25-45-0	1325.4	86.1	127.6	57.1	1268.3	82.4	26.7	55.7	0.0
	CS32-45-0	1488.6	96.7	375.6	168.2	1320.4	85.8	31.9	53.9	0.0
	CS18-60-0	1390.1	90.3	120.4	69.9	1320.1	85.8	19.9	65.9	0.0
	CS25-60-0	1553.2	100.9	315	182.9	1370.3	89.0	26.7	62.3	0.0
CS32-60-0	1673.3	108.7	149.3	86.7	1586.6	103.1	31.9	71.2	0.0	

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ								
		P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ac}$			
							$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)
3	CS18-32-0.05	991.4	64.4	81	25.1	966.2	62.8	19.9	33.8	9.1
	CS25-32-0.05	1140.7	74.1	143.9	44.7	1096.0	71.2	26.7	39.0	5.5
	CS32-32-0.05	1317.7	85.6	530.6	164.7	1153.0	74.9	31.9	38.1	4.9
	CS18-45-0.05	1283.8	83.4	94.5	42.3	1241.5	80.7	19.9	51.1	9.7
	CS25-45-0.05	1490.1	96.8	163.2	73.1	1417.0	92.1	26.7	55.7	9.7
	CS32-45-0.05	1613.3	104.8	390.3	174.8	1438.5	93.4	31.9	53.9	7.6
	CS18-60-0.05	1494.7	97.1	101.5	58.9	1435.8	93.3	19.9	65.9	7.5
	CS25-60-0.05	1608.7	104.5	192.5	111.8	1496.9	97.2	26.7	62.3	8.2
	CS32-60-0.05	1779.5	115.6	134.2	77.9	1701.6	110.5	31.9	71.2	7.4

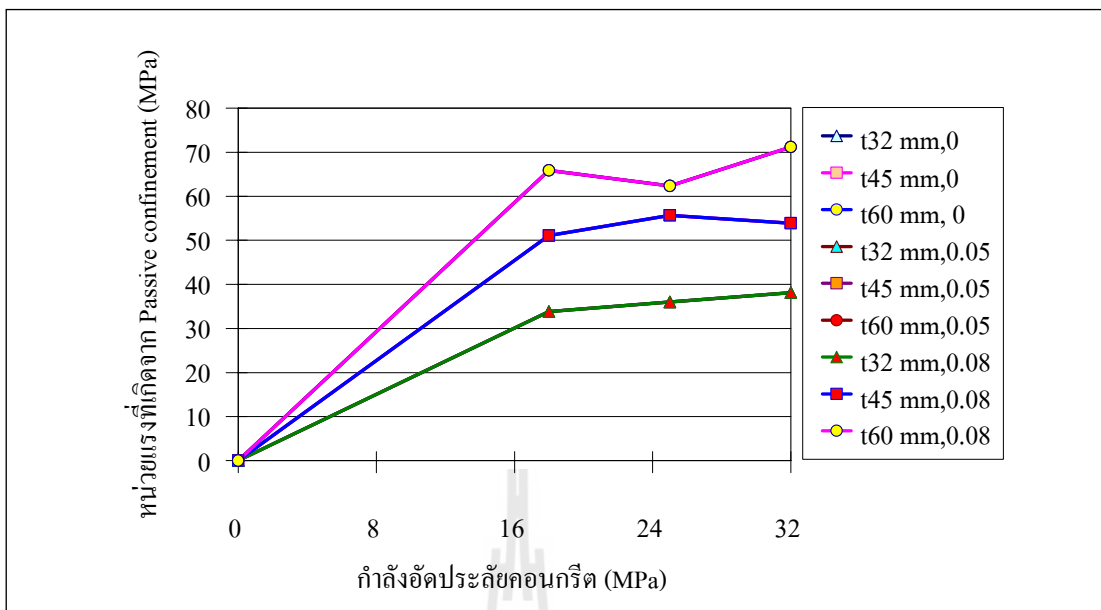
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ								
		P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	P'_{max} (kN)	$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ac}$			
							$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)
4	CS18-32-0.08	1031.4	67.0	117	36.3	995.1	64.6	19.9	33.8	10.9
	CS25-32-0.08	1177.6	76.5	175	54.3	1123.3	73.0	26.7	39.0	7.3
	CS32-32-0.08	1360.8	88.4	576.6	179.0	1181.8	76.8	31.9	38.1	6.8
	CS18-45-0.08	1317.7	85.6	97.8	43.8	1273.9	82.8	19.9	51.1	11.8
	CS25-45-0.08	1514.8	98.4	145.4	65.1	1449.6	94.2	26.7	55.7	11.8
	CS32-45-0.08	1647.1	107.0	412	184.5	1462.6	95.0	31.9	53.9	9.2
	CS18-60-0.08	1514.8	98.4	113.7	66.0	1448.7	94.1	19.9	65.9	8.3
	CS25-60-0.08	1641.0	106.6	176.2	102.3	1538.7	100.0	26.7	62.3	11.0
CS32-60-0.08	1808.8	117.5	155.6	90.4	1718.4	111.6	31.9	71.2	8.5	

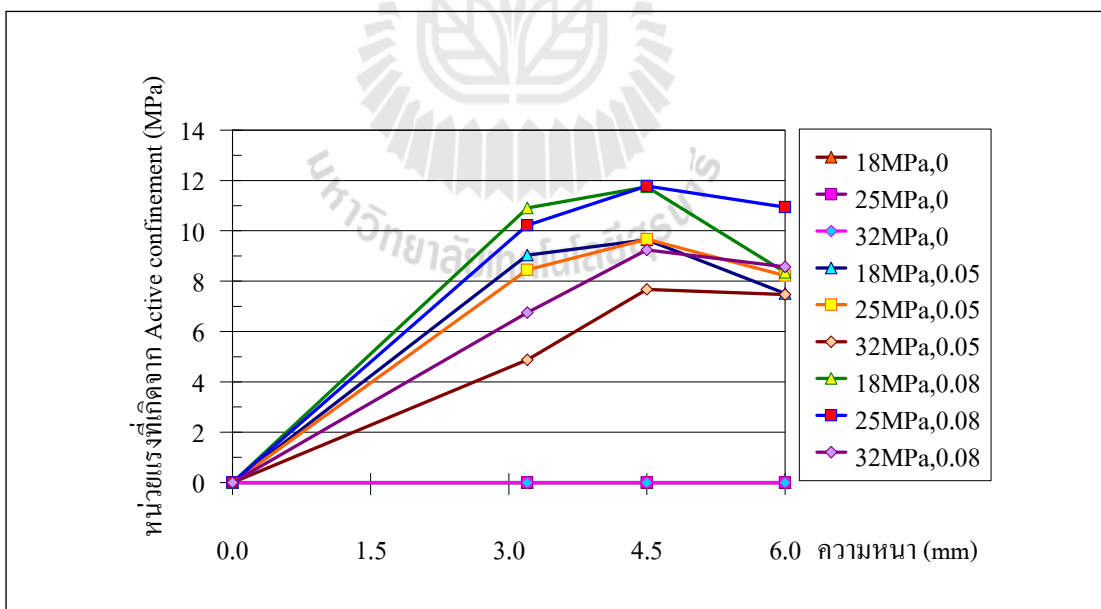
จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบกับค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดจากผล Passive confinement และเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากันพบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความหนาเท่ากันพบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement นี้จะขึ้นอยู่กับกำลังของปลอกเหล็กที่นำมาโอบรัดตัวอย่างทดสอบ

จากตารางที่ 4.15 เมื่อให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างหรือ Active confinement แก่ตัวอย่างทดสอบ ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรองรับหน่วยแรงกระทำในแนวแกนได้สูงเพิ่มขึ้น และสามารถแยกหน่วยแรงดังกล่าวเป็นหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement ($f'_{max,pass}$) และหน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement ($f'_{max,ac}$) และเมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรง $f'_{max,ac}$ ที่เพิ่มขึ้นจาก $f'_{max,pass}$ มีค่าสูงเพิ่มขึ้นประมาณ 10.6-32.4% และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ โดยความหนาปลอกเหล็กที่ทำให้ $f'_{max,ac}$ มีค่าสูงสุดคือความหนา 4.5 มิลลิเมตร และเมื่อความหนาปลอกเหล็ก 6.0 มิลลิเมตร ค่า $f'_{max,ac}$ จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาที่ความหนาปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากันพบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังน้อยและปานกลาง (18 MPa และ 25 MPa) ค่า $f'_{max,ac}$ มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตกำลังสูง (32 MPa)

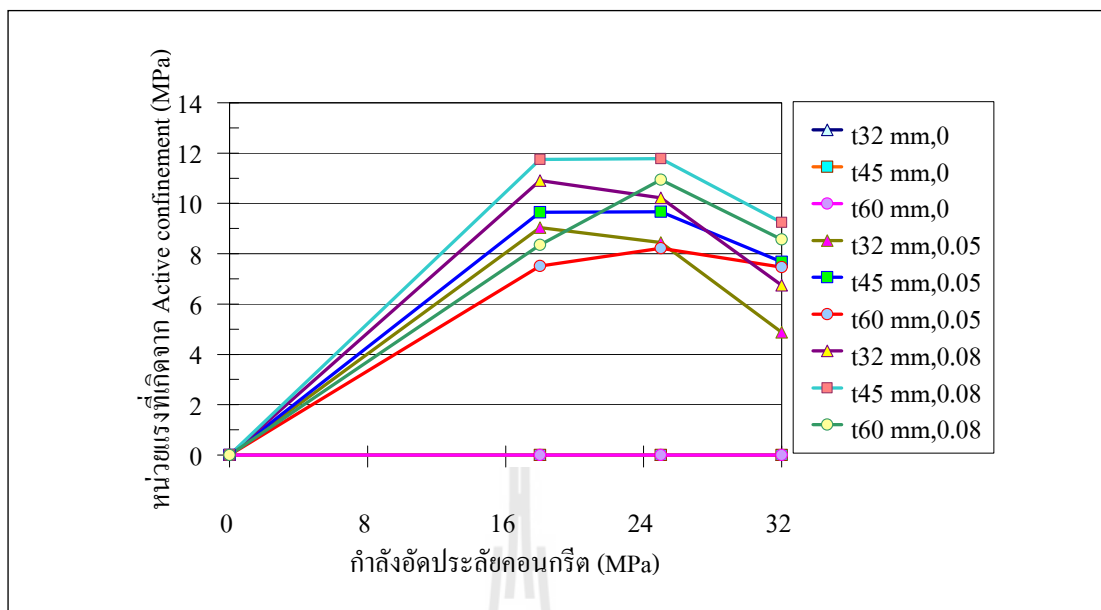
จากรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement โดยที่ลักษณะกราฟมีรูปร่างแบบโค้งคว่ำเช่นเดียวกับรูปที่ 4.33 พบว่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจากกำลังต่ำ (18 MPa) ไปยังกำลังปานกลาง (25 MPa) และจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าสูง (32 MPa)



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม



รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรง
ที่เกิดจากผลของ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

ความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ คือ ค่าความหนา 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวนี้ สามารถเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรงได้เพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนั้นตัวอย่างทดสอบดังกล่าว ยังมีพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นแบบ Elastic-perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น ลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน เมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบนี้ พบว่าเกิดการโป่งออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตรนี้มีความแกร่งเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านมาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดทั้ง 2 มาตรฐานของการออกแบบเสาเชิงประกอบคือ AISC/LRFD และ ว.ส.ท. 1008-38

4.3 ผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัด

ด้วยปลอกเหล็กและให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

จากการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษาต่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นไปดังต่อไปนี้ คือ (1) สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม คือ ปลอกเหล็กความหนา 6.0 มิลลิเมตรและการให้หน่วยแรงโอบรัดที่ขนาด $0.1 f'_{co}$ (2) สำหรับหน้าตัดกลม คือ ปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรและการให้หน่วยแรงโอบรัดที่ขนาด $0.05 f'_{co}$ ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปศึกษาในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 150 มิลลิเมตร X 150 มิลลิเมตร ความสูง 750 มิลลิเมตร ในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 750 มิลลิเมตร ในหน้าตัดกลม โดยได้ศึกษาถึงพฤติกรรม การรับแรงกดอัด ลักษณะการวิบัติ พร้อมทั้งหาสมการการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างทั้ง หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดกลม

4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ในการศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC Column ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (2) หน้าตัดกลม

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial shortening) ของ Tubed RC column โดยการจัดกลุ่มตามค่า f'_{co} ของคอนกรีตและจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวที่ 20 mm หรือเทียบเท่าค่าความเครียด (Strain) ในคอนกรีตที่ 0.0267 mm/mm ซึ่งเป็นค่าความเครียด (Strain) ที่สูงกว่า Ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า โดยกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวที่แสดงผลการทดสอบจนถึงจุดวิบัตินำเสนอไว้ในภาคผนวก ก เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมารรับแรงของ Tubed RC column โดยในการศึกษานี้ได้นิยามให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดเกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าการหดตัว 1.5 mm หรือเทียบได้กับค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของ Tubed RC column เป็น “ค่ากำลังรับแรงสูงสุดใช้งาน” หรือ P'_{max} ของเสา

จากกราฟในภาคผนวก ก จะเห็นได้ว่าในภาพรวม Tubed RC column มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกนั้นจะมีความชันที่สูงกว่าในช่วงที่สอง โดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดของเสาซึ่งจะเกิดขึ้นที่จุดที่เสาเกิดการวิบัติและเสามีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมากกว่า 100 mm (หรือมีความเครียดที่จุดวิบัติมากกว่า 0.133 mm/mm ซึ่งสูงกว่าในกรณีของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กและตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน) ดังนั้น Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกน (Axial ductility) ที่สูงมาก

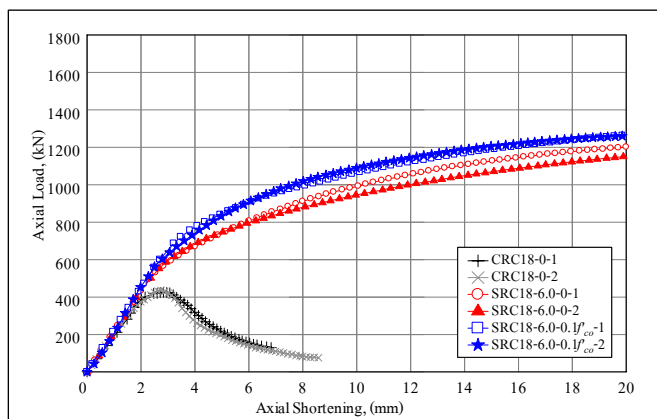
จากรูปในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงและ Tubed RC column มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่เสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมีค่าแรงกดอัดสูงสุด (เหล็กเสริมมีความเครียดถึงจุดคราก) อยู่ช่วงประมาณ 60 - 80% ของแรงกดอัดสูงสุดช่วงที่พิจารณา Tubed RC column (ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเล็กน้อยเนื่องจากมีเหล็กเสริมช่วยรับแรงกดอัด) จากนั้นในช่วงที่สอง เมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกอย่างต่อเนื่องนั้น เหล็กเสริมจะเกิดการครากและในแกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นเนื่องมาจาก Poisson's effect ดังนั้นความชัน (Slope) ของเส้นความสัมพันธ์เริ่มลดลงและพฤติกรรมค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรงมากขึ้น ในขณะเดียวกันนั้นเมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นนั้นและก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำต่อผนังของปลอกเหล็กมากขึ้น พฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ (เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.35 และในภาคผนวก ก. ประกอบ)

แบบที่ 1 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแกร่งประมาณ ศูนย์หรือพฤติกรรมแบบ Elastic - perfectly plastic ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบเสา SRC32 - 6.0 เป็นเสาทำด้วยคอนกรีตกำลังสูง โดยกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P'_{max} ทำให้เหล็กเสริมและคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำเกิดการครากและเกิดแตกร้าวโดยแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะทำการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้อย่างเพียงพอ จากนั้นเมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังปลอกเหล็กจะเกิดการโค้งเคาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตดังกล่าว โดยสามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นปลอกเหล็กจะเกิดพฤติกรรม Strain hardening ทำให้ปลอกเหล็กกลับมามีความสามารถในการจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่งซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งเป็นผลทำให้เสามีค่าแรงสูงสุดเกิดขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา โดยแรงกดอัด

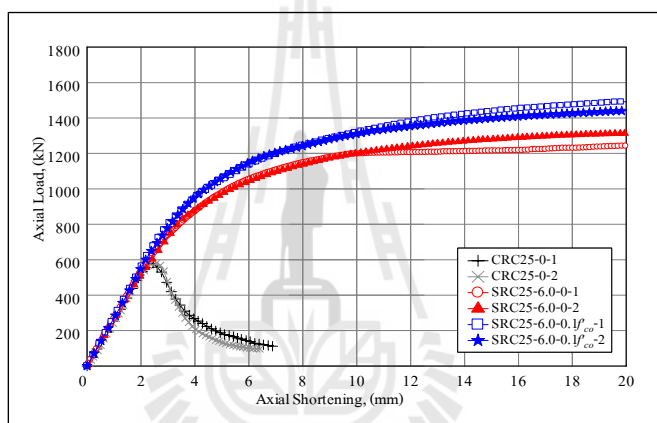
เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากโก่งเดาะเฉพาะที่ผนังของปลอกเหล็กถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนของเสาที่ตั้งแสดงในภาคผนวก ก.

แบบที่ 2 เสารองรับแรงกระทำได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ Strain hardening ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบเสา SRC18 - 6.0 และ SRC25 - 6.0 เป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำและปานกลางในกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดทำให้เหล็กเสริมและแกนคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำจึงเกิดการแตกร้าวเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้วผนังของปลอกเหล็กจะสามารถต้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างได้เป็นอย่างดีแล้วและปลอกเหล็กทำหน้าที่จำกัด (Contain) แกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกร้าวให้รับแรงกดอัดเพิ่มได้ต่อเนื่องแรงกดอัดในแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ผนังของปลอกเหล็กมีการโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กในบริเวณกึ่งกลางความสูงของเสา โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีตและผิวด้านในของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางของความสูงของเสานั้น ซึ่งค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางความสูงของเสาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นหลังจากที่แรงกระทำมีค่ามากกว่า P'_{max}

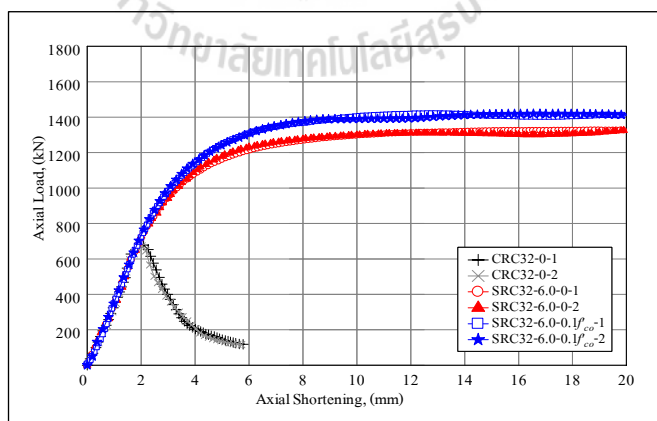
ขอให้สังเกตด้วยว่าการที่ Tubed RC column มีเหล็กเสริมในแนวแกนของเสาทำให้เสามีกำลังและความแกร่งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต อย่างไรก็ตามพบว่าพฤติกรรมในช่วงที่สองของ Tubed RC column มีพฤติกรรมคล้ายกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตในเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงและมีพฤติกรรมที่ต่างไปในเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำและปานกลางอาจเนื่องจากเหตุผลข้างต้นที่กล่าวไปแล้ว



a). คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



b). คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

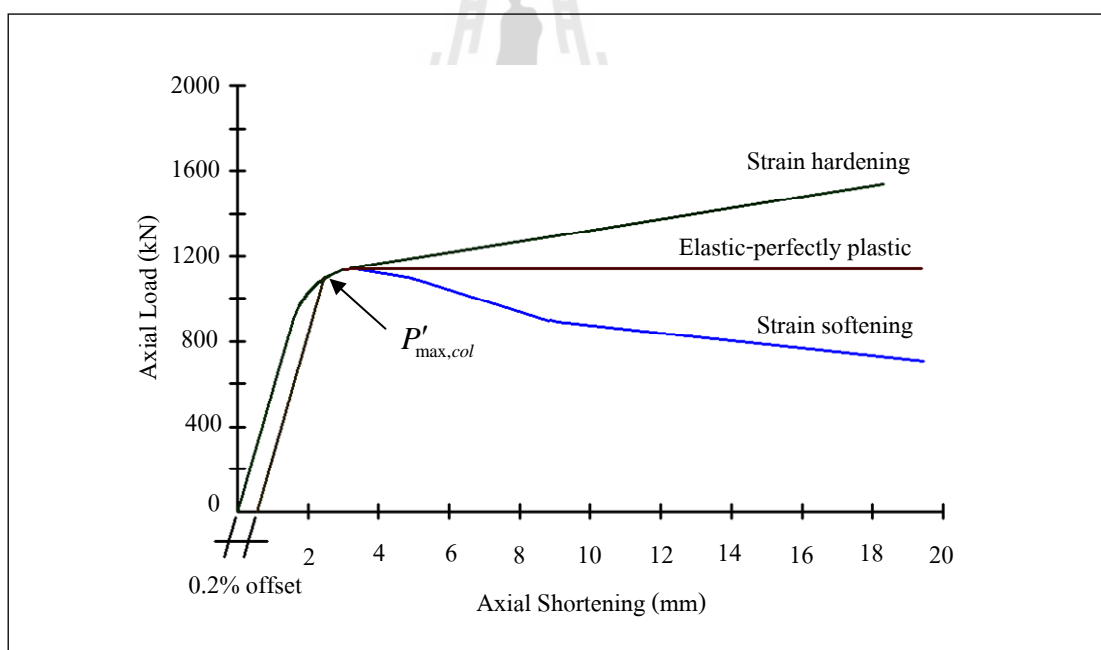


c). คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

(2) หน้าตัดกลม

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมที่มีการโอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตร และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ นั้นช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดให้สูงขึ้น และมีพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นที่เหมาะสมและปลอดภัยในการนำไปใช้งาน พร้อมทั้งสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ โดยความหนาปลอกเหล็ก และหน่วยแรงโอบรัดก่อน ดังกล่าวมีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเสา Tubed RC column และในหัวข้อที่ 4.3 ได้นำเสนอพฤติกรรมการรองรับแรงกระทำในแนวแกน และลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 750 มิลลิเมตร ใช้ความหนาปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.05 f'_{co}$ โดยมีตัวแปรที่แตกต่างกันคือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตจำนวน 3 ค่า คือ กำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ 18 25 และ 32 MPa



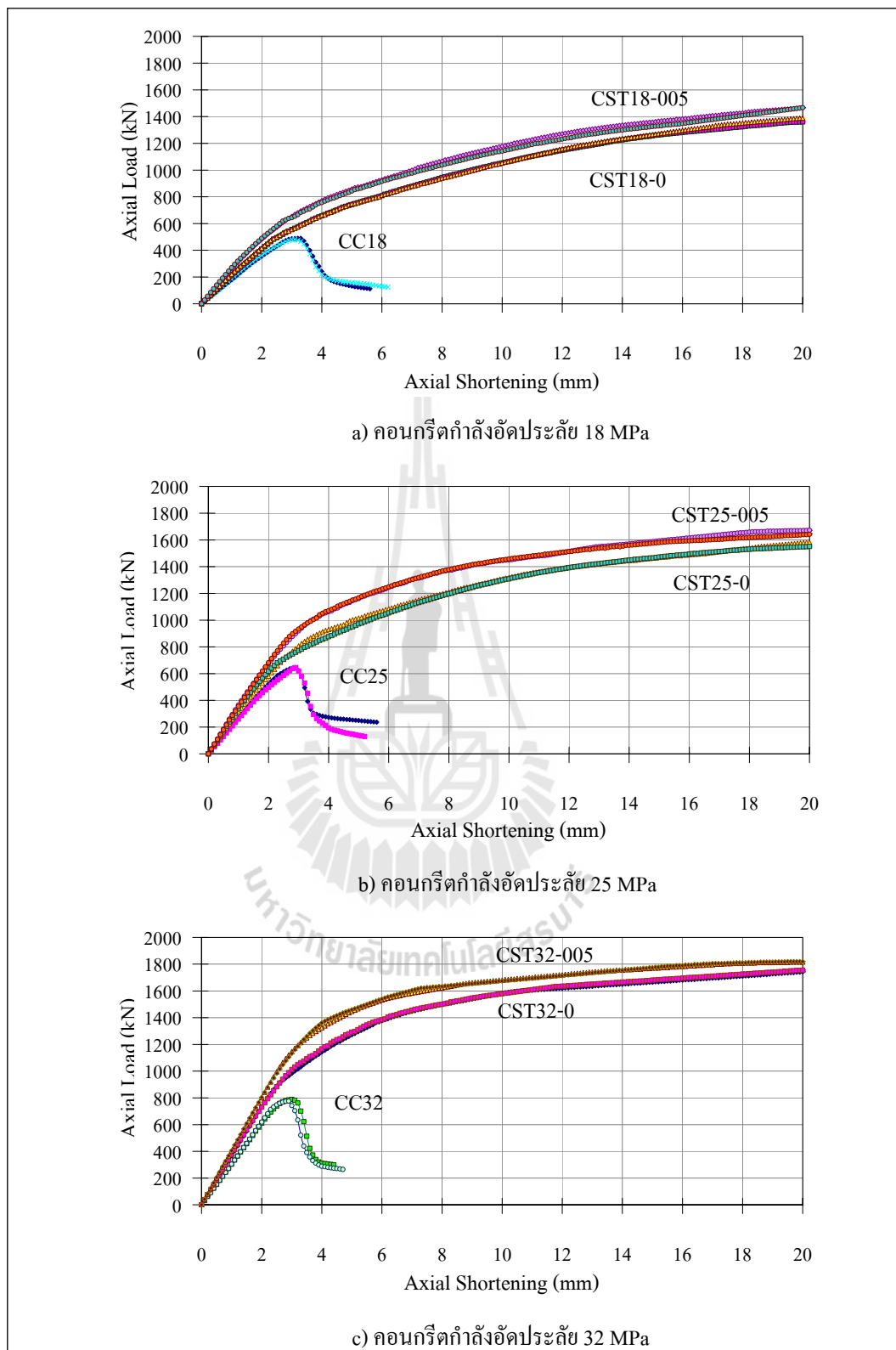
รูปที่ 4.38 แผนภาพแสดงการหาค่าแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column

นิยามให้ค่า $P'_{max,col}$ เป็นแรงกดอัดสูงสุด เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร (หรือเกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ระยะการหดตัว 1.5 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และจากรูปที่ 4.37 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial shortening) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ในการศึกษาได้แสดงผลการทดสอบที่ระยะค่าการหดตัว 20 มิลลิเมตร (ประมาณค่าความเครียด 0.0267 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร) ซึ่งมีความมากกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า และจำกัดการทดสอบไว้ที่ระยะการหดตัวที่ 30 มิลลิเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ

พฤติกรรมของ Tubed RC Column สามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้ 2 ช่วง คือพฤติกรรมเส้นตรง และพฤติกรรมไร้เชิงเส้น เมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำเส้นกราฟจะมีความชันสูงขึ้น ซึ่งพฤติกรรมความเป็นเส้นตรงมีค่าประมาณ 60-70% ของแรงกดอัดใช้งาน ($P'_{max,col}$) โดยกราฟของ Tubed RC column ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ มีความชันสูงกว่ากราฟของ Tubed RC column ที่ไม่ได้มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน เป็นผลเนื่องจากเมื่อ Tubed RC column ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ทำให้ปลอกเหล็กชิดกับแกนคอนกรีต จึงเกิดการต้านทานระหว่างผนังปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ก่อนที่เสาดังกล่าวจะเริ่มรับแรงกด ดังนั้นความชันของกราฟดังกล่าวจึงมีความชันมากกว่ากราฟของเสาทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด หลังจากนั้นเมื่อ Tubed RC Column รับแรงกดอัดอย่างต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเหล็กเสริมคอนกรีตเกิดการร้าว และแกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าวมากขึ้นจนเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างสูงขึ้น ส่งผลให้เส้นกราฟจะมีค่าความชันลดลงเรื่อย ๆ จนมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงที่ 2 คือพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นสำหรับเสา Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้ 2 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 พฤติกรรมแบบ Strain hardening เกิดขึ้นจากการที่ Tubed RC column สามารถรับแรงกระทำในแนวแกนได้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแกร่งมากเพียงพอ สามารถจำกัดการขยายตัวของแกนคอนกรีตหลังจากรับกระทำได้เป็นอย่างดี โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ CST25-0 CST25-005 CST32-0 และ CST32-0.05

แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ Elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุดจากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่งโดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์ เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแกร่ง ด้านทานขยายตัวออกทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ CST18-0 และ CST18-0.05



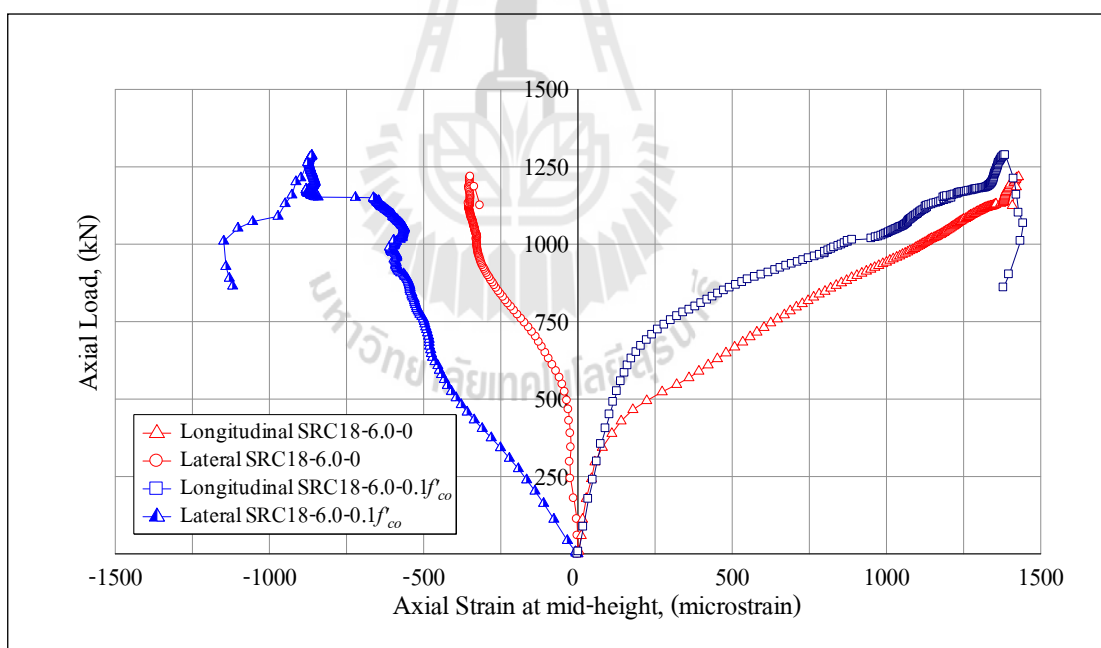
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของ Tubed RC column
หน้าตัดกลม

4.3.2 การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

สำหรับการถ่ายแรงของ Tubed RC Column สามารถแบ่งการศึกษาออกได้ 2 ส่วน
คือในส่วนแรกจะศึกษาในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และในส่วนที่สอง จะศึกษาในเสาหน้าตัดกลม

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 4.38 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและค่าความเครียดในแนวแกน (ค่าเป็นลบ) และในแนวขวาง (ค่าเป็นลบ) ที่วัดได้จาก Strain gage จุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กของเสา Tubed RC column ในตัวอย่าง SRC18 - 6.0 จากรูปเห็นได้ว่า Tubed RC column มีลักษณะพฤติกรรมถ่ายแรงในเสาเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายเสาบางส่วนถูกถ่ายมายังปลอกเหล็ก โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.40 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา SRC18 - 6.0

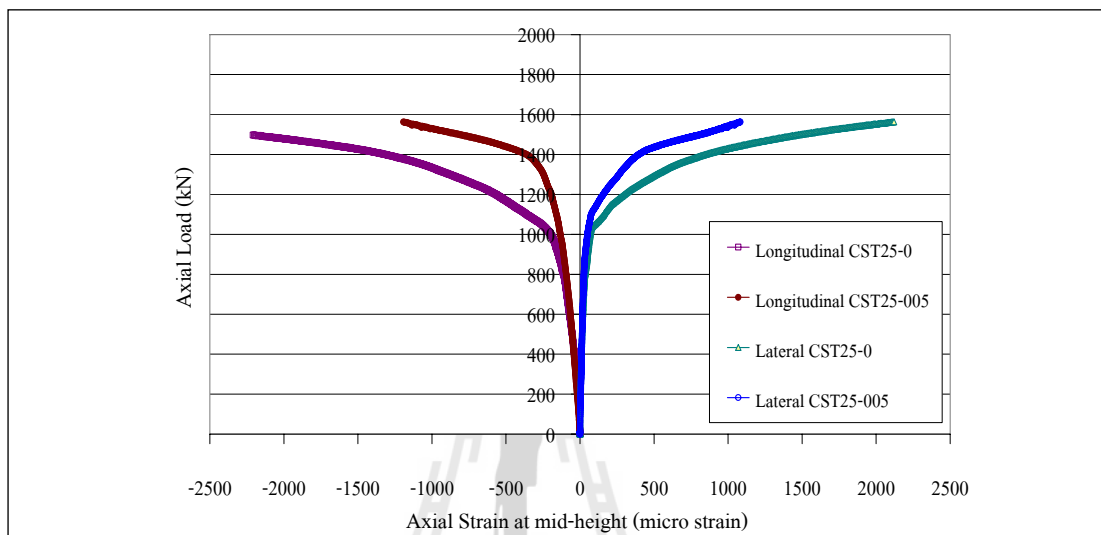
ในลักษณะเช่นเดียวกับในตัวอย่างทดสอบคอนกรีต การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก Interaction ระหว่างแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็กนั้น โดยอาศัย Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและผิวของแกนคอนกรีต ในช่วงแรกความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงจนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 50 - 60% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P'_{max} แสดงว่าการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กไปยังปลอกเหล็กมีค่าที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ในช่วงที่สองความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ ซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าปลอกเหล็กช่วยรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้นกว่าที่แกนคอนกรีตเสริมเหล็กรับ อย่างไรก็ตามการถ่ายแรงในเสา Tubed RC column ซึ่งเกิดขึ้นได้มากกว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตดังกล่าวจะเห็นจากที่ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กในหลายกรณีมีค่าถึงค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็ก (มีค่ามากกว่า 0.002 mm/mm) โดยสาเหตุหลักมาจาก Tubed RC column มีแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงกว่าแกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังนั้นหลังจากที่คอนกรีตที่ปลายเสานั้นเกิดการแตกร้าว (Crushing) ของคอนกรีตและเหล็กเสริมเกิดการครากเฉพาะที่ที่บริเวณปลายเสาและปลอกเหล็กเกิดการโก่งตัวเฉพาะที่แล้วนั้นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อ Tubed RC column จะเกิดการกระจายลงสู่บริเวณกึ่งกลางเสามากขึ้นเป็นผลให้ปลอกเหล็กของ Tubed RC column รับแรงกดอัดสูงขึ้นและมีค่าความเครียดสูงดังกล่าว

(2) หน้าตัดกลม

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและระยะการหดตัวในแนวแกน และระยะการหดตัวในแนวขวาง ที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ดังแสดงในรูป 4.39 พบว่ากราฟสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือในช่วงแรกเส้นกราฟมีความชันสูง และมีความเป็นเส้นตรงประมาณ 60-70% ของแรงกดอัดใช้งาน ($P'_{max, col}$) เมื่อ Tubed RC column เริ่มต้นรับแรงกระทำจะเกิดการถ่ายแรงบางส่วนจากแกนคอนกรีตมายังปลอกเหล็กโดยเกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแกนคอนกรีตและผนังของปลอกเหล็กและการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กนั้นมีค่าค่อนข้างสมบูรณ์

หลังจากนั้นเมื่อเสาดังกล่าวรับแรงกระทำสูงเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นกราฟมีความชันลดลงจนมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้อิงเส้น เมื่อเสาทดสอบมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงนี้ จะเกิดการถ่ายแรงกระทำจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กสูงมากขึ้น เนื่องจากแกนคอนกรีตเกิดจากการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มสูงมากขึ้น เมื่อเสาทดสอบรับแรงกระทำสูงขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง ปลอกเหล็กจะเกิดการต้านทานการขยายตัวของแกนเสาคอนกรีต ทำให้ปลอกเหล็กมีส่วนช่วยรองรับแรงกระทำร่วมกับแกนเสาคอนกรีต และจากการคำนวณ ในตารางที่ 4.16 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัด

ในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $P'_{max,col}$ มีค่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาทดสอบ อยู่ในช่วง 4.4-10% ซึ่งมีความสอดคล้องสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Johansson (2000) และมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ในหัวข้อที่ 4.2.2 อีกด้วย



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ CST25-0 และ CST25-005

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรง P'_{max} ของ Tubed RC column หน้าตัดกลม

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{max,col}$ (kN)	$f'_{max,col}$ (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
1	CC18	485.2	31.5	-	-	-	-
	CC25	643.3	41.8	-	-	-	-
	CC32	752.6	45.6	-	-	-	-
2	CST18-0	773	50.2	75.8	15.5	33.9	4.4
	CST25-0	925.8	60.1	157.2	32.2	70.4	7.6
	CST32-0	1072.1	69.6	127.1	26.1	56.9	5.3
3	CST18-0.05	837.9	54.4	177	36.3	79.3	9.5
	CST25-0.05	1006.4	65.4	133.4	27.3	59.7	5.9
	CST32-0.05	1139.2	74.0	254.4	52.2	113.9	10.0

4.3.3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

สำหรับการวิบัติของ Tubed RC Column สามารถแบ่งการศึกษาออกได้ 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกจะศึกษาในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และในส่วนที่สอง จะศึกษาในเสาหน้าตัดกลม

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง จากผลการทดสอบ พบว่าการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมีลักษณะการวิบัติที่ค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง แต่ยังคงเป็นลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อได้ทำการเทียบกับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและ Tubed RC column โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงถึงจุดรับแรงกดอัดสูงสุดที่ค่าการหดตัวในช่วง 2.2 ถึง 3.0 mm การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเกิดจากการครากเหล็กเสริมหลักในแนวแกนและการแตกร้าว (Crushing) ของคอนกรีต ซึ่งเมื่อคอนกรีตกะเทาะออกแล้วเหล็กปลอกจะไม่มีคอนกรีตยึดรั้งได้เพียงพอทำให้เกิดการแอ่นออกของเหล็กปลอก ส่งผลให้เกิดการ โกงเดาะ (Buckling) ของเหล็กเสริมหลัก เนื่องจากการสูญเสียการยึดรั้งตรงตำแหน่งเหล็กปลอกที่แอ่นออกดังแสดงในรูปที่ 4.40 จากนั้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสูญเสียกำลังและเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.42 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การวิบัติของ Tubed RC column ทุกต้นมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive failure) เช่นเดียวกับในกรณีของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยเสาทั้งหมดเกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 100 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยที่ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้น โดยเริ่มจากการครากของเหล็กตามด้วยการแตกร้าว (Crushing) ของคอนกรีต เช่นเดียวกับในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 โดยยังคงสามารถรับแรงกดอัดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นและค่าการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก แสดงว่า Tubed RC column มีความเหนียวในแนวแกนที่สูง



รูปที่ 4.43 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC columns หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

โดยสรุปแล้วจากผลการทดสอบ พบว่าเสา Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษา จะเกิดการวิบัติเฉพาะที่ อันเนื่องมาจากปลอกเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอในการป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่ ดังนั้นวิธีการที่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column ที่อัตราส่วน B/t ตามที่ศึกษาคือการป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติเฉพาะที่ดังกล่าว โดยเสริมความหนาของปลอกเหล็กในบริเวณดังกล่าวให้มีค่าความแกร่งต่อการตัดที่เพียงพอและทำให้การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าสู่ปลอกเหล็กได้มากขึ้นอีกด้วย

(2) หน้าตัดกลม

ลักษณะของการวิบัติของ Tubed RC column สามารถแบ่งออกเป็นการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง และ Tubed RC column เมื่อพิจารณาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง พบว่าการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง มีลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป สำหรับการวิบัติของเสาดังกล่าวเกิดจากการครากของเหล็กเสริมในแนวแกนและเกิดการบดแตกของคอนกรีต (Crushing) หลังจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงรับแรงกระทำในแนวแกนสูงสุด จะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างที่สูงมากขึ้นทำให้คอนกรีตกระเทาะออกจากเหล็กเสริมในแนวแกนและเหล็กปลอก เนื่องจากแรงยึดรั้งระหว่างเหล็กปลอกและคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอ ยังส่งผลทำให้เหล็กเสริมในแนวแกนเกิดการ โกงเดาะขึ้น (Buckling) และหลังจากนั้นจะเกิดการแอ่นออกของเหล็กเสริมในแนวแกน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการวิบัติระหว่างเสาคอนกรีตอ้างอิงกับ Tube RC Column พบว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงจะเกิดการวิบัติที่รวดเร็วกว่า โดยเสาดังกล่าวจะรับแรงกระทำในแนวแกนสูงสุดที่ค่าการหดรัดตัวประมาณ 2.8-3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ซึ่งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของเสาทดสอบอ้างอิงดังกล่าวเป็นพฤติกรรมแบบ Degrading ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.3

ในการทดสอบ Tubed RC column จำกัดการทดสอบที่ระยะการหดรัดตัว 30 มิลลิเมตรหรือแรงกระทำในแนวแกนไม่เกิน 1800 kN เท่านั้นเนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือทดสอบดังนั้น Tubed RC column ยังไม่เกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ และการโก่งตัวทางด้านข้างมีค่าน้อยมากและการ โกงตัวออกทางด้านข้างปรากฏไม่ชัดเจนนัก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การวิบัติของ Tubed RC column เกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป และมีความเหนียวสูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเป็นอย่างมาก และเมื่อพิจารณาระยะการหดรัดตัวดังกล่าว Tubed RC column มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไร้เชิงเส้นที่ดี คือมีพฤติกรรมแบบ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic ซึ่งพฤติกรรมทั้ง 2 แบบนี้ มีความปลอดภัยในการก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.44 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง



รูปที่ 4.45 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของ Tubed RC column

4.3.4 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column

หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC Column ได้นำเสนอออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (2) เสาหน้าตัดกลม

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากการทดสอบ ตารางที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นของ Tubed RC column จากคอลัมน์ที่ 4 ของตารางพบว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตมีค่า f'_{co} เท่ากันแล้ว Tubed RC column เสากลุ่มที่ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) มีอัตราส่วน P'_{max} ต่อแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง (P_c) อยู่ในช่วง 1.59 - 1.72 ซึ่งต่ำกว่า เสากลุ่มที่ 3 (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$) มีค่าอยู่ในช่วง 1.71 - 2.06 นอกจากนี้แล้วยังพบว่าอัตราส่วน P'_{max} / P_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีค่า f'_{co} สูงขึ้น

พิจารณาอัตราส่วน $\epsilon_{max} / \epsilon_{u,RC}$ คอลัมน์ที่ 6 พบว่ามีค่าสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงอยู่ในช่วง 1.80 - 2.04 เท่า โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column มีพฤติกรรมแบบ Strain hardening มีค่าสูงในช่วง 1.80 - 2.04 เท่าและแบบ Elastic - perfectly plastic มีค่า $\epsilon_{max} / \epsilon_{u,RC}$ ที่สูงในช่วง 1.92 - 2.04 เท่า ดังนั้นในการใช้งานจริงพฤติกรรม Tubed RC column ทั้ง 2 แบบเป็นพฤติกรรมที่ควรออกแบบให้เกิดขึ้น โดยพฤติกรรมแบบ Elastic - perfectly plastic จะเป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมที่สุดเช่นเดียวกับในกรณีตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยปลอกเหล็กควรมีความหนาที่เพียงพอตลอดจนมีรอยเชื่อมต่อของผนังที่สมบูรณ์ที่จะช่วยทำให้ปลอกเหล็กรองรับความดันเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดวิบัติ

โดยสรุปแล้ว เมื่อปลอกเหล็กที่ใช้มีความหนาเท่ากันแล้วอัตราส่วนกำลังของ Tubed RC column ลดลง เมื่อเสามี f'_{co} สูงขึ้น อีกทั้งการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนมีผลให้กำลังของ Tubed RC column สูงขึ้นและทำให้ความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงสูงขึ้นจากเดิมซึ่งพฤติกรรมของเสาทั้งแบบ Strain hardening และ Elastic - perfectly plastic เป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 4.17 กำลังแรงกดอัดสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

กลุ่ม ที่	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ				
		P'_{max} (kN)	P'_{max} / P_c	ϵ_{max} (% strain)	$\epsilon_{max} / \epsilon_{u,RC}$	พฤติกรรมการรับแรง
1	CRC18-0-0	431.00	-	0.372	-	-
	CRC25-0-0	581.00	-	0.340	-	-
	CRC32-0-0	678.00	-	0.272	-	-
2	SRC18-6.0-0	743.02	1.72	0.670	1.80	Strain hardening
	SRC25-6.0-0	953.17	1.64	0.634	1.86	Strain hardening
	SRC32-6.0-0	1075.50	1.59	0.522	1.92	Elastic - perfectly plastic
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	887.50	2.06	0.758	2.04	Strain hardening
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	1059.00	1.82	0.671	1.97	Strain hardening
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	1158.50	1.71	0.555	2.04	Elastic - perfectly plastic



(2) หน้าตัดกลม

จากตารางที่ 4.18 เสาทดสอบกลุ่มที่ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) และเสาทดสอบกลุ่มที่ 3 (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$) มีอัตราส่วน $P'_{max,col} / P'_{max,ref}$ อยู่ในแนวช่วง 1.41-1.59 และ 1.70-1.73 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยคอนกรีตที่เท่ากัน พบว่าอัตราส่วน $P'_{max,col} / P'_{max,ref}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่แกนเสาคอนกรีต ทำให้แกนคอนกรีตและปลอกเหล็กชิดกัน จึงเกิดการแรงโอบรัดระหว่าง แกนคอนกรีตและปลอกเหล็ก ก่อนที่ Tubed RC column จะเริ่มต้นรับแรงกระทำ จึงทำให้ Tubed RC column มีความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนได้สูงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอัตราส่วน $\epsilon'_{max,col} / \epsilon'_{con,ref}$ ของเสาทดสอบในกลุ่มที่ 2 และ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 1.31-1.56 และ 1.41-1.58 ตามลำดับดังนั้น Tubed RC column มีความเหนียวสูงมากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมากแต่อัตราส่วน $\epsilon'_{max,col} / \epsilon'_{con,ref}$ ของเสาทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 มีค่าไม่แตกต่างกันเนื่องจากความเหนียวของ Tubed RC column ขึ้นอยู่กับความหนาของปลอกเหล็กที่ใช้ในการโอบรัด

ตารางที่ 4.18 สรุปผลการทดสอบ Tubed RC column หน้าตัดกลม ที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ				พฤติกรรมการรับแรง
		$P'_{max,col}$ (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P'_{max,ref}}$	$\epsilon'_{max,col}$ (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max,col}}{\epsilon'_{con,ref}}$	
1	CC18	485.2	-	0.41	-	-
	CC25	643.3	-	0.38	-	-
	CC32	752.6	-	0.39	-	-
2	CST18-0	773.0	1.59	0.64	1.56	Elastic perfectly plastic
	CST25-0	925.8	1.44	0.56	1.47	Strain hardening
	CST32-0	1072.1	1.42	0.51	1.31	Strain hardening
3	CST18-0.05	837.9	1.73	0.65	1.58	Elastic perfectly plastic
	CST25-0.05	1006.4	1.56	0.58	1.53	Strain hardening
	CST32-0.05	1139.2	1.51	0.55	1.41	Strain hardening

4.3.5 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ตามมาตรฐาน AISC/LRFD

ทำการเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC Column กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของมาตรฐาน AISC/LRFD โดยแบ่งการเปรียบเทียบกำลังออกเป็น 2 ส่วน คือ การเปรียบเทียบกำลังของ (1) เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (2) เสาหน้าตัดกลม

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P'_{max} ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD (สมการที่ 2.15) โดยในการคำนวณได้พิจารณาเฉพาะพื้นที่ของปลอกเหล็กเท่านั้นโดยไม่พิจารณาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีต จากตารางพบว่าอัตราส่วน P'_{max} / P_{AISC} ของ Tubed RC column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 1.04 - 1.52 ซึ่งมากกว่า 1.0 ทำให้การทำนายกำลังของ Tubed RC column จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (Underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งาน แต่อาจไม่ประหยัดมากนัก

ตารางที่ 4.19 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน AISC/LRFD ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	P'_{max} (kN)	P_{AISC} (kN)	P'_{max} / P_{AISC}
1	CRC18-0-0	431.0	-	-
	CRC25-0-0	581.0	-	-
	CRC32-0-0	678.0	-	-
2	SRC18-6.0-0	743.0	713.7	1.04
	SRC25-6.0-0	953.2	740.3	1.29
	SRC32-6.0-0	1075.5	764.7	1.41
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	887.5	713.7	1.24
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	1059.0	740.3	1.43
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	1158.5	764.7	1.52

(2) หน้าตัดกลม

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรวาล ช่างวุฒิ, (2550) ได้นำเสนอสมการ การ ออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ AISC/LRFD ทำนายกำลังรับแรงกอดในแนวแกน ของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่มีขนาดความหนา ปลอกเหล็กที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงกอดในแนวแกนที่ได้จากการทดสอบ กับการทำนายโดยใช้สมการออกแบบของ AISC/LRFD ($P'_{max,col} / P_{AISC/LRFD}$) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1.0 คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.88 และ 0.60-0.94 ซึ่งกำลังรับแรงกอดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ เสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD มีค่ามากกว่า กำลังรับแรงกอดของ Tubed RC column เป็นอย่าง มาก เนื่องจากขนาดความหนาของปลอกเหล็กที่ใช้ในการทดสอบมีความหนา 3.2 และ 4.5 มิลลิเมตร ซึ่งไม่ผ่านตามข้อกำหนดของอัตราส่วน $\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}}$ ของมาตรฐานการออกแบบเสาเชิง ประกอบของ AISC/LRFD

จากผลการศึกษาในครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.20 ได้นำเสนอผลการ เปรียบเทียบกำลังรับแรงกอดในแนวแกนที่ได้จากการทดสอบ ($P'_{max,col}$) กับการทำนายโดยใช้ สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD ($P_{AISC/LRFD}$) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูก โอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตรและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ พบว่า อัตราส่วน $P'_{max,col} / P_{AISC/LRFD}$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.92-1.15 ซึ่งการทำนายกำลังรับแรงกอดใน แนวแกนของ Tubed RC column ตามสมการออกแบบของ AISC/LRFD มีค่าใกล้เคียงกับ 1.0 ดังนั้นการนำสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD มาทำนายกำลังรับแรงกอดในเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนนี้ จึงมีความ ถูกต้องเพียงพอ เนื่องจากหน่วยแรงดึงที่จุดคราก (f_y) และความแกร่งของปลอกเหล็ก (E_s) ที่ใช้ใน การทดสอบครั้งนี้ มีกำลังสูงเพียงพอ เมื่อนำไปหาค่าความหนาน้อยสุดของเสาเชิงประกอบ ($\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}}$) จึงผ่านตามข้อกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบของ AISC/LRFD

ตารางที่ 4.20 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับการทำนายกำลัง
โดยใช้สมการออกแบบของ AISC/LRFD ของเสาหน้าตัดกลม

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{\max, col}$ (kN)	$P_{AISC/LRFD}$ (kN)	$\frac{P'_{\max, col}}{P_{AISC/LRFD}}$
1	CC18	485.2	-	-
	CC25	643.3	-	-
	CC32	752.6	-	-
2	CST18-0	773.0	838.1	0.92
	CST25-0	925.8	891.7	1.04
	CST32-0	1072.1	987.1	1.09
3	CST18-0.05	837.9	838.1	1.00
	CST25-0.05	1006.4	891.7	1.13
	CST32-0.05	1139.2	987.1	1.15

4.3.6 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ตามมาตรฐาน ACI Committee 318

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรกานต์ ชำรงวุฒิ (2550) ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกล้อมด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมโดยใช้สมการออกแบบเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตของ ACI Committee 318 (ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. 1008-38) ดังแสดงไว้ในสมการ 2.2 ในบทที่ 2 โดยสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column (P_{\max}^I) ได้แยกออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ (1) ได้รวมพจน์ของกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก ($A_s^{tube} f_y^{tube}$) เข้าไว้ในสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัด ซึ่งพจน์ของกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กนี้ เป็นหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนที่เกิดผลของการโอบรัดของปลอกเหล็กแก่แกนคอนกรีต ดังแสดงในสมการ 4.6

$$P_{EIT}^I = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (4.6)$$

โดยที่ f'_{co} คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต
 A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาเชิงประกอบ
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก

f_y^s คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม

A_s^{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็ก

f_y^{tube} คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก

และกรณี (2) ไม่มีการรวมพจน์ของ กำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก ($A_s^{tube} f_y^{tube}$) เข้าไว้ในสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัด ซึ่งสมการดังกล่าว คือ สมการในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในสมการที่ 4.7

$$P_{EIT}^2 = 0.85 f_{co}' (A_g - A_s) + A_s f_y^s \quad (4.7)$$

จากแนวคิดข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC Column ทั้ง (1) เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (2) เสาหน้าตัดกลม ดังแสดงต่อไปนี้

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด P'_{max} ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 (ซึ่งสมการของ ว.ส.ท. 1008 - 38 ใช้สมการเดียวกันกับสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของ ACI Committee 318) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 โดยนิยามให้ P'_{ACI} เป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดที่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 และ P'_{ACI} เป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดที่ไม่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2

จากตารางพบว่าค่า P'_{max} / P'_{ACI} ของ Tubed RC column ทั้งหมดนั้นมีค่าในช่วง 0.46 - 0.62 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก ดังนั้นการรวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 แล้วจะทำให้สมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ ACI Committee 318 ทำให้ทำนายกำลังของ Tubed RC column มีค่าค่อนข้างสูงกว่าที่ควรจะเป็น (Overestimate) ซึ่งไม่ปลอดภัยมากนักในการใช้งานเป็นอย่างมาก แต่เมื่อพิจารณาค่า P'_{max} / P_{EIT}^2 ของ Tubed RC column พบว่ามีค่าในช่วง 1.65 - 2.17 จะเห็นได้ว่าการไม่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จะทำให้สมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ในการทำนายกำลังของ Tubed RC column มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (Underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งานแต่อาจไม่ประหยัดนัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 - 38 ตามข้อกำหนดที่ 4314 ที่ให้ทำการคำนวณหากำลังของเสาซึ่งประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปนั้นและให้กำลังในการรับแรง

ตามแนวแกนใด ๆ กำหนดให้รับ โดยคอนกรีตของเสาต้องถ่ายผ่านเข้าไป ในคอนกรีตโดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแบกทาน โดยตรงลงบนคอนกรีตของเสานั้น (ซึ่งเมื่อพิจารณา รูปแบบของเสาในการวิจัยนี้ กำลังของเสากำหนดให้ใช้คือ กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง) แล้วพบว่าข้อกำหนดอาจก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อการออกแบบเสาเชิงประกอบเป็นอย่างมาก ในด้านหนึ่งและอาจจะมีความปลอดภัยสูงอีกด้านหนึ่ง แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งานนัก ดังนั้นข้อกำหนดดังกล่าวควรพิจารณาปรับแก้ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบได้ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในช่วงท้ายของหัวข้อนี้

ตารางที่ 4.21 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ACI 318 ของเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	P'_{max} (kN)	P'_{ACI} (kN)	P'_{max} / P'_{ACI}	P^2_{ACI} (kN)	P'_{max} / P^2_{ACI}
1	CRC18-0-0	431.0	408.9	1.05	408.9	1.05
	CRC25-0-0	581.0	538.4	1.08	538.4	1.08
	CRC32-0-0	678.0	652.9	1.04	652.9	1.04
2	SRC18-6.0-0	743.0	1627.5	0.46	408.9	1.82
	SRC25-6.0-0	953.2	1757.0	0.54	538.4	1.77
	SRC32-6.0-0	1075.5	1871.5	0.57	652.9	1.65
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	887.5	1627.5	0.55	408.9	2.17
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	1059.0	1757.0	0.60	538.4	1.97
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	1158.5	1871.5	0.62	652.9	1.77

(2) หน้าตัดกลม

เมื่อพิจารณาการทำนายกำลังโดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee 318 ตามสมการที่ 4.6 (รวมพจน์กำลังของปลอกเหล็กเข้าไปในสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัด) โดยอัตราส่วนของ P'_{max} / P'_{ACI} มีค่าอยู่ในช่วง 0.67-0.85 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก หมายความว่ากำลังรับแรงกดอัดที่ทำนายจากสมการออกแบบมาตรฐาน ACI Committee 318 นี้ มีค่าสูงมากกว่ากำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column (กำลังรับแรงกดอัดที่ทำนายจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 Over estimate กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column) แสดงให้เห็นว่าสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ดังสมการ 4.6 ไม่มีความเหมาะสม และไม่ปลอดภัยในการนำไปใช้ประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง

จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วน P'_{max} / P_{ET}^2 มีค่าอยู่ในช่วง 1.66-1.83 ซึ่งการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC Column โดยไม่ได้รวมพจน์ของผลกำลังของปลอกเหล็กนั้นทำให้ค่าที่ทำนายจากสมการ 4.7 มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column (กำลังรับแรงกดอัดที่ทำนายจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 Under estimate กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column) ดังนั้นการใช้สมการออกแบบดังแสดงในสมการ 4.7 ถึงแม้ว่ามีความปลอดภัยสูง แต่ไม่มีความประหยัด จึงไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับ Tubed RC column

ตารางที่ 4.22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ACI 318 ของเสาหน้าตัดกลม

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	P'_{max} (kN)	P_{ACI}^1 (kN)	P'_{max} / P_{ACI}^1	P_{ACI}^2 (kN)	P'_{max} / P_{ACI}^2
1	CC18	485.2	457.9	1.06	457.9	1.06
	CC25	643.3	557.4	1.15	557.4	1.15
	CC32	702.6	633.5	1.11	633.5	1.11
2	CST18-0	773.0	1160.3	0.67	457.9	1.69
	CST25-0	925.8	1259.8	0.73	557.4	1.66
	CST32-0	1072.1	1335.9	0.80	633.5	1.69
3	CST18-0.05	837.9	1160.3	0.72	457.9	1.83
	CST25-0.05	1006.4	1259.8	0.80	557.4	1.81
	CST32-0.05	1139.2	1335.9	0.85	633.5	1.80

Seangatith and Thumrongvuth (2009) ได้ศึกษาเพิ่มเติม และดัดแปลงสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column โดยมีการอ้างอิงจากผลการศึกษาของสิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักยดา ชำรงวุฒิ (2550) พบว่าพจน์ของกำลังของปลอกเหล็กที่เพิ่มเข้าไปในสมการ มีผลทำให้การทำนายกำลังโดยใช้สมการดังกล่าวมีค่าสูงกว่า กำลังรับแรงกดอัดจริงของ Tubed RC column ดังนั้นจึงได้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการนำไปลดกำลังของปลอกเหล็กดังแสดงในสมการ 4.8

$$N_{ACI}^{proposed} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + k A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (4.8)$$

จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่นำมาลดกำลังในพจน์ของกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (k) มีค่าเท่ากับ 0.3 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column ได้ถูกต้องเพียงพอ ดังนั้น Seangatith and Thumrongvuth จึงได้นำเสนอสมการออกแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากสมการของ ACI Committee 318 เพื่อทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ดังแสดงในสมการ 4.9

$$N_{ACI}^{proposed} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30 A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (4.9)$$

และจากแนวความคิดของ Seangatith and Thumrongvuth (2009) ซึ่งได้นำเสนอสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ที่ดัดแปลงมาจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ดังนั้นสำหรับงานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการลดกำลังรับแรงกดอัดปลอกเหล็ก (k) ดังแสดงในสมการ 4.8 โดยได้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ใน Tubed RC Column ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาออกได้ 2 ส่วนดังนี้ (1) เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้า 6.0 มิลลิเมตรและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.1 f'_{co}$ และ (2) เสาหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้า 4.5 มิลลิเมตรและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$

(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด P'_{max} ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่แล้วและโดยได้พิจารณา รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P'_{ACI}) เข้ากับสมการที่ 2.2 ดังแสดงในสมการที่ 4.10

$$P'_{ACI} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (4.10)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} กับค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ซึ่งสมการดังกล่าวทำให้มีอัตราส่วนของกำลังรับแรงกดอัดกับค่าที่ทำนาย (P'_{max} / P'_{ACI}) ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่าอยู่ในช่วง 0.46 - 0.62 ค่าดังกล่าวต่ำกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก จะเห็นได้ว่าการรวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 นั้นทำให้สมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 นั้นสามารถทำนายกำลังของ Tubed RC column มีค่าค่อนข้างสูงกว่าผลการทดสอบที่ได้มาก (Overestimate) ซึ่งไม่ปลอดภัย

ในการใช้งาน ดังนั้นในการใช้งานสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 จึงควรพิจารณาปรับให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบได้

พิจารณาสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ACI Committee 318 ข้อมูลที่ทดสอบได้เพื่อนำไปใช้งานให้เหมาะสม เมื่อพิจารณาในสมการที่ 4.11 เป็นการรวมผลของการรับแรงกดอัดของคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเสริมคอนกรีตและปลอกเหล็กเข้าไว้ด้วยกันแล้วดังนั้นเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมจึงต้องพิจารณาค่ากำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P_{max}^{tube}) ข้อมูลตารางที่ 4.23 และแถวที่ 6 ในการหาค่ากำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P_{max}^{tube}) โดยแยกออกจากกำลังรับแรงกดอัด Tubed RC column (P'_{max}) จากนั้นเมื่อนำค่ากำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P_{max}^{tube}) ได้มาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงกดอัดที่จุดครากปลอกเหล็ก ($A_s^{tube} f_y^{tube}$) โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.30 - 0.39 ซึ่งพบว่าตัวคูณลดกำลังของปลอกเหล็กที่เหมาะสมนำมาพิจารณาค่าน้อยสุดคือ 0.30 ดังนั้นในการใช้งานสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 ควรพิจารณาปรับให้อยู่ในรูป ดังแสดงในสมการที่ 4.11

$$P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30 A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (4.11)$$

จากสมการในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column ที่นำเสนอแสดงในสมการที่ 4.12 เมื่อนำค่า P'_{max} ที่ได้จากการทดสอบนำมาลองคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่าแรง $P_{ACI}^{Modified}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าค่า $P'_{max} / P_{ACI}^{Modified}$ ที่ได้ในช่วง 1.02 - 1.24 โดยที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวทำนายกำลัง Tubed RC column มีค่าที่ต่ำกว่าผลการทดสอบที่ได้ (Underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งานและสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามการใช้สมการข้างต้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ต้องอยู่ในขอบเขตของการวิจัยนี้และใช้พิจารณาในการนำไปใช้งานเป็นหลัก

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส กับการทำนายกำลังโดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee318 และสมการออกแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee318

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{max,col}$ (kN)	P_{ACI}^1 (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P_{ACI}^1}$	$P'_{max,tube}$ (kN)	$\frac{P'_{max,tube}}{A_s f_y^{tube}}$	$P_{ACI}^{Modified}$ (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P_{ACI}^{Modified}}$
1	CRC18-0-0	431.0	408.9	1.05	-	-	-	-
	CRC25-0-0	581.0	538.4	1.08	-	-	-	-
	CRC32-0-0	678.0	652.9	1.04	-	-	-	-
2	SRC18-6.0-0	743.0	1627.5	0.46	312.0	0.30	725.7	1.02
	SRC25-6.0-0	953.2	1757.0	0.54	372.2	0.31	855.2	1.11
	SRC32-6.0-0	1075.5	1871.5	0.57	397.5	0.33	969.8	1.11
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	887.5	1627.5	0.55	456.5	0.37	725.7	1.22
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	1059.0	1757.0	0.60	478.0	0.39	855.2	1.24
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	1158.5	1871.5	0.62	480.5	0.39	969.8	1.19

(2) หน้าตัดกลม

จากผลของการศึกษาในตารางที่ 4.24 นำเสนอถึงผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC Column ($P'_{max,col}$) และได้ทำนายกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC Column ตามมาตรฐานออกแบบ ACI Committee 318 (P'_{ACI}) ได้รวมผลของกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้าไว้ด้วย ดังแสดงไว้ในสมการ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการทำนายกำลังรับแรงกดอัด พบว่าอัตราส่วน $P'_{max,col} / P'_{ACI}$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.72-0.80 ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1.0 สามารถสรุปได้ว่า การทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC Column จากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 ดังกล่าวมีค่าสูงมากกว่าผลของกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC Column ที่เกิดขึ้นจริง จึงไม่มีความปลอดภัยในการนำไปงาน และพจน์ของกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็กมีผลทำให้สมการออกแบบดังกล่าวมีค่ากำลังสูงเกินกว่ากำลังของ Tubed RC Column

ดังนั้นจากตารางที่ 4.24 สามารถหาค่ากำลังที่ปลอกเหล็กมีส่วนช่วยรับแรงกระทำในแนวแกนร่วมกับแกนเสาคอนกรีต ดังสมการ 4.10 และแสดงไว้ใน Column ที่ 6 ในตารางที่ 4.24

$$P'_{max,tube} = P'_{max,col} - P'_{max,col(ref)} \quad (4.12)$$

โดยที่	$P'_{max,tube}$	คือ กำลังแรงกดอัดของปลอกเหล็ก
	$P'_{max,col}$	คือ กำลังแรงกดอัดของ Tubed RC Column
	$P'_{max,col(ref)}$	คือ กำลังแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ในการลดกำลังของปลอกเหล็ก (k) สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็กที่มีส่วนช่วยแกนเสาคอนกรีตกับกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กที่จุกคราก ($P'_{max,tube} / A_s f_y^{tube}$) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 0.40–0.55 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความเหมาะสมนำไปใช้งาน มีค่าเท่ากับ 0.40 เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นที่ค่าน้อยที่สุด ดังนั้นสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC Column ซึ่งได้ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 ดังแสดงในสมการ 4.13

$$P'_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.40 A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (4.13)$$

หลังจากนั้นได้เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC Column ($P'_{\max, col}$) กับสมการออกแบบใหม่ที่ได้ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 ($P'_{\max, col} / P_{ACI}^{Modified}$) มีค่าอยู่ในช่วง 1.04-1.24 และอัตราส่วนดังกล่าวนี้มีค่าสูงมากกว่า 1.0 แสดงให้เห็นว่า สมการทำนายกำลังรับแรงกดอัดที่ได้ดัดแปลงใหม่ ดังสมการ 4.13 สามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงของ Tubed RC Column ดังนั้น สมการดังกล่าวจึงมีความปลอดภัย สามารถนำไปใช้งานได้ โดยในการนำไปใช้งานต้องอยู่ภายใต้กรอบของการศึกษาครั้งนี้ คือ เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ ซึ่งเสาดังกล่าวเป็นเสาสั้น และมีอัตราส่วนของ L/B มีค่าอยู่ในช่วง 5-9 นอกจากนี้ในการหาอัตราส่วนความหนาน้อยสุด (B/t) สามารถหาได้จากอัตราส่วน $\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}}$ ซึ่งได้อ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD



ตารางที่ 4.24 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column ของหน้าตัดกลม กับการทำนายกำลัง โดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee318 และสมการออกแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee318

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{max,col}$ (kN)	P_{ACI}^1 (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P_{ACI}^1}$	$P'_{max,tube}$ (kN)	$\frac{P'_{max,tube}}{A_s f_y^{tube}}$	$P_{ACI}^{Modified}$ (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P_{ACI}^{Modified}}$
1	CC18	485.2	457.9	1.06	-	-	-	-
	CC25	643.3	557.4	1.15	-	-	-	-
	CC32	752.6	633.5	1.11	-	-	-	-
2	CST18-0	773.0	1160.3	0.67	287.8	0.41	740.4	1.04
	CST25-0	925.8	1259.8	0.73	282.5	0.40	839.9	1.10
	CST32-0	1072.1	1335.9	0.80	319.5	0.45	916.0	1.17
3	CST18-0.05	837.9	1160.3	0.72	352.7	0.50	740.4	1.13
	CST25-0.05	1006.4	1259.8	0.80	363.1	0.52	839.9	1.20
	CST32-0.05	1139.2	1335.9	0.85	386.6	0.55	916.0	1.24

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้แบบปลอกเหล็ก เพื่อศึกษาผลการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่มีต่อกำลังและความเหนียวของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน ข้อมูลความหนาปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมที่ได้ในเบื้องต้นถูกนำไปใช้ในการศึกษาถึงผลของพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) อีกทั้งได้นำเสนอสมการที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงที่ใช้เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีต (Tubed Concrete specimens) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) โดยที่แรงกระทำเป็นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงโดยที่ไม่กระทำต่อปลอกเหล็ก ตัวแปรสำคัญในการศึกษา คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate compressive strength of concrete) ความหนาของปลอกเหล็ก (Thickness of steel jacket) และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบ (Preconfinement) จากผลการทดสอบสามารถสรุปเป็น 2 ส่วนคือ (1) ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก และ (2) เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ซึ่งจากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย

5.1.1 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed Concrete specimens)

ในหัวข้อนี้ได้สรุปผลการทดสอบในส่วนของพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกน ความเหนียว การวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก โดยที่จะนำเสนอผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ *ส่วนแรก* ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ *ส่วนที่สอง* ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

■ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

1) พฤติกรรมในการรับแรงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกนั้นมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงถึงจุดที่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงรับแรงกดอัดสูงสุด ประมาณ 50 - 80% ของกำลังอัดประลัยสูงสุด จากนั้นมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้นซึ่งมีความชันเฉลี่ยต่ำกว่าในช่วงแรกมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อน โดยในช่วงนี้พฤติกรรมดังกล่าวจะพบอยู่ 2 ลักษณะคือ Elastic - perfectly plastic และ Strain softening โดยพฤติกรรมแบบ Elastic - perfectly plastic เป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่า $\epsilon_u / \epsilon_{u,ref}$ สูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีพฤติกรรมแบบ Strain softening และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

2) การวิบัติเกิดที่ค่าการหดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป แสดงว่ามีความเหนียวในแนวแกนสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง อย่างไรก็ตามการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ Localized failure โดยการแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้จุดที่แรงกดอัดกระทำและโก่งเคาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็ก ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นโดยการขยายตัวออกทางด้านข้าง เกิดมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วง 100 - 150 mm ของตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติทำให้แกนคอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นช่วงของตัวอย่างทดสอบบริเวณดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอเพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ อย่างไรก็ตามตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตอ้างอิงมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ปลอกเหล็กที่หนาโดยผ่านข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 ข้อ 4314 และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ค่าสูงขึ้น

3) ปลอกเหล็กที่มีความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิดความดันโอบรัด (Confining pressure) ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง แต่อย่างไรก็ตามผลของการโอบรัดก่อนสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรง ในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนจึงมีผลทำให้กำลังรับแรงกดอัด ความเหนียวและพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงมีค่าสูงขึ้น จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าความหนาปลอกเหล็ก 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.1 f'_{co}$ เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาต่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column)

■ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

1) ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยพฤติกรรมในช่วงดังกล่าวมีค่าประมาณ 50 - 70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ สำหรับตัวแปรที่ผลต่อพฤติกรรม คือ ความหนาของปลอกเหล็ก กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น โดยมีความชันของเส้นกราฟลดลงอย่างต่อเนื่อง และพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นถูกจำแนกออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ (1) Strain hardening (2) Elastic - perfectly plastic และ (3) Strain softening โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักคั้งนี้ความหนาปลอกเหล็กและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก โดยเฉพาะที่มีความหนาที่ผ่านมาตรฐานของการออกแบบเสาเชิงประกอบของAISC/LRFD จะเกิดขึ้นที่ค่าการหัดตัวที่สูงมากและมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมาก

2) เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าหนึ่งแล้ว การเพิ่มขึ้นของความหนาของปลอกเหล็ก และการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงโอบรัดก่อน มีผลทำให้กำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง โดยความหนาของปลอกเหล็กมีอิทธิพลมากกว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยต่ำ และภายใต้ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้ ความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปประยุกต์ใช้งานกับ Tubed RC column ต่อไปคือ ปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$

5.1.2 สรุปผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อน

ด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column)

■ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จากความหนาปลอกเหล็ก 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.1 f'_{co}$ ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสม ได้นำค่าดังกล่าวมาศึกษาต่อใน Tubed RC Column โดยศึกษาในคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัยที่แตกต่างกัน 3 ค่า สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1) พฤติกรรมรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติ Tubed RC Column มีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อน (Tubed Concrete specimens) เป็นอย่างมากโดยมีแรงกดอัดสูงสุด P'_{max} ที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีต เนื่องจากมีเหล็กเสริมคอนกรีตช่วยรับแรงกระทำและสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมาก โดย

พฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed Concrete specimens คือช่วงแรกเชิงเส้นตรงถึงจุดที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงรับแรงกดอัดสูงสุดหรือประมาณ 60 - 80% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดในช่วงของการพิจารณา Tubed RC column และช่วงที่สองแบบไร้เชิงเส้นตรงช่วงนี้พฤติกรรมของ Tubed RC column ขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและความหนาปลอกเหล็ก แบ่งเป็น 2 แบบ (1) Elastic - perfectly plastic และ (2) Strain hardening โดยมีพฤติกรรมทั้งสองแบบเป็นพฤติกรรมของเสาที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากเสานี้มีค่า $\epsilon_u / \epsilon_{u,ref}$ สูงมากและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

2) ปลอกเหล็กสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนให้กับเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงได้ค่อนข้างที่จะสูง โดยแรงกดอัดสูงสุดแรก P'_{max} ที่กำหนดให้เป็น “แรงกดอัดสูงสุดใช้งาน” ของเสาที่เกิดขึ้นในช่วงที่แกนของคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวมากขึ้นและมักเกิดก่อนที่จุดที่ผนังของปลอกเหล็กเกิดการโค้งเคาะเฉพาะที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.59 - 2.06 เท่าของแรงกดอัดสูงสุดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง โดย Mechanism ที่ใช้ในการถ่ายแรงระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กเกิดจาก Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็ก นอกจากนั้นแล้ว Tubed RC column ยังมีค่าความเครียดที่แรง P'_{max} สูงกว่าค่าความเครียดที่จุดรับแรงกดอัดสูงสุดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงช่วง 1.80-2.04 เท่า

3) การวิบัติของ Tubed RC column มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป เช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed Concrete specimens โดยเสาทั้งหมดเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 50 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวที่สูงมาก การวิบัติของเสาเป็นแบบ Localized failure โดยในการโค้งเคาะเฉพาะที่เกิดขึ้นโดยการโป่งออกของผนังของปลอกเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของเสา ดังนั้นกำลังของ Tubed RC column ที่ทดสอบได้จึงมีค่าต่ำกว่าที่ทำนายโดยสมการของเสาเชิงประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม Tubed RC column มีกำลังความเหนียวและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สูงกว่าเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเป็นอย่างมาก อีกทั้งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นมีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

■ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

จากความหนาปลอกเหล็ก 4.5 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสม ได้นำค่าดังกล่าวมาศึกษาต่อใน Tubed RC Column โดยศึกษาในคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัยที่แตกต่างกัน 3 ค่า สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC Column สามารถแบ่งออกได้ 2 ช่วงคือ พฤติกรรมช่วงเส้นตรง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เมื่อพิจารณาถึงการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนพบว่ามีส่วนช่วยในการ

เพิ่มความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนด้วย โดยที่กำลังรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรงของ Tubed RC Column มีค่าประมาณ 60 - 70% ของแรงกดอัดสูงสุด ($P'_{max,col}$) หลังจากนั้น Tubed RC column จะค่อย ๆ รับแรงกระทำไปเรื่อย ๆ จนมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ Strain hardening และ Elastic - perfectly plastic เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน $\epsilon'_{max,col} / \epsilon'_{con,ref}$ ระหว่าง Tubed RC column และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง พบว่าอัตราส่วน $\epsilon'_{max,col} / \epsilon'_{con,ref}$ ของ Tubed RC column มีค่าสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง ดังนั้น Tubed RC column มีความเหนียวสูงและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากก่อนการวิบัติพร้อมทั้งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นมีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน

▪ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 และใช้เป็นข้อมูลในการเสนอสมการการออกแบบที่เหมาะสมของเสาดังกล่าว จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังที่ปรากฏในบทที่ 4 พบว่าอัตราส่วนของกำลังรับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบเมื่อเทียบกับค่าที่ทำนายโดยสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 (P'_{max} / P_{ACI}) มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการใช้งานสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI ที่ใช้ในการวิเคราะห์หา กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column ลักษณะที่ใช้ในการศึกษาดควรถูกปรับให้เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$P_{ACI}^{Modified} = 0.85f'_{co}(A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (5.1)$$

โดยที่ $P_{ACI}^{Modified}$ คือ กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed RC column

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก

A_s^{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก

f'_{co} คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469

f_y^s คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก

f_y^{tube} คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก

■ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

ในงานวิจัยครั้งนี้ มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อเสริมกำลังแก่เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยสมการออกแบบเสาเชิงประกอบนี้ได้อ้างอิงตามการออกแบบของ ACI Committee 318 สำหรับเสาคอนกรีตหน้าตัดกลม มีความเหมาะสมในการใช้งาน ในอาคารขนาดเล็กถึงอาคารขนาดปานกลาง ซึ่งอาคารขนาดเล็กดังกล่าวได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สำหรับสมการออกแบบเพื่อวิเคราะห์หากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบใหม่นี้ ดังนั้นจึงได้ดัดแปลงสมการออกแบบของ ACI Committee 318 อยู่ในรูปสมการ 5.2

$$P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.40 A_s^{tube} f_y^{tube} \quad (5.2)$$

โดยที่	f'_{co}	คือ	กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต
	A_g	คือ	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาเชิงประกอบ
	A_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
	f_y^s	คือ	กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม
	A_s^{tube}	คือ	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็ก
	f_y^{tube}	คือ	กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก

จากสมการข้างต้นสามารถทำนายกำลังรับแรงกดอัดได้ถูกต้องเพียงพอสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กที่ $0.05 f'_{co}$ สำหรับการนำสมการดังกล่าวไปใช้งานต้องอยู่ในขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าวเป็นเสาสั้น ควรจะมีอัตราส่วนของ L/B มีค่าอยู่ในช่วง 5 - 9 สำหรับ อัตราส่วน B/t ควรจะมีค่าอัตราส่วนเป็นดังนี้ $\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}}$ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบของ

AISC/LRFD

อย่างไรก็ตาม การใช้สมการข้างต้นนั้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ต้องอยู่ในขอบเขตของการวิจัยนี้และใช้วิจารณ์ญาณในการนำไปใช้งานเป็นหลัก

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

1) ควรศึกษา Tubed Concrete specimens และ Tubed RC column ให้มีความลึกซึ่งมากขึ้น โดยเพิ่มตัวแปรในส่วนของอัตราส่วน B/t อัตราส่วน L/B หน่วยแรงครากและ โมดูลัสยืดหยุ่น

ของปลอกเหล็กและผลของแรงไอบรัดก่อนในหลาย ๆ ค่าเพื่อให้ครอบคลุมในการใช้งานจริงอีกทั้งศึกษาในเชิงลึกของระบบการถ่ายแรง (Load transferring mechanism) ระหว่างผิวคอนกรีตและผนังของปลอกเหล็กที่เกิดขึ้น

2) ควบคู่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดแบบเอียงศูนย์ของ Tubed Concrete specimens และ Tubed RC column ที่อยู่ในรูปของ Beam - column

3) ควบคู่ศึกษาในส่วนของเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ตัวแปรเช่นเดียวกับเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

4) จากผลการทดสอบในงานวิจัยในครั้งนี้ ควบคู่ศึกษาและนำ Finite element analysis มาประยุกต์ในวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกไอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงไอบรัดก่อน

5) ควบคู่ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ค่าสัมประสิทธิ์ของการไอบรัดระหว่างแกนคอนกรีตและวัสดุอื่น ๆ ที่นำมาไอบรัดแกนคอนกรีต เพราะค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีผลต่อพฤติกรรมของ Tubed RC Column



รายการอ้างอิง

- ACI Committee 318 (2005). **Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary**. Farmington Hills: ACI Committee 318R-05.
- ACI Committee 440 Report (2002). **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. ACI Committee 440. Technical Committee Document 440.2R-02.
- American Institute of Steel Construction (1994). **Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD)**. 2nd Ed., Chicago.
- Architectural Institute of Japan (1997). **Recommendations for Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tubular Structures**, AIJ. Tokyo, Japan.
- Ansari, F., and Li, Q. (1998). High strength concrete subjected to triaxial compression. **ACI Material Journal**. Title no.95-M75: 747 - 755.
- ASTM C39-96 (1996). Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C469-94 (1994). Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E8-98 (1998). Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Attard, M.M., and Setung, S. (1996). Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. **ACI Material Journal**. Title no.93 - M49: 432 - 442.
- Giakoumelis, G., and Lam, D. (2003). Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. **Journal of Construction steel research**. 60(2003): 1049 - 1068.
- Huang, C.S., Yeh, Y.K., Liu, G.Y., Hu, H.T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., and Wu, M.H. (2002). Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. **Journal of Structural Engineering**. 128(9): 1122 - 1230.

- Johansson, M. (2000). Structural Behavior of Circular Steel-Concrete Composite Columns. **[Licentiate Thesis]**. Department of Structural Engineering. Chalmers University of Technology. Goteborg. Sweden.
- Johansson, M. and Gylltoft, K. (2001). Structural Behavior of Slender Circular Steel-Concrete Composite Columns under Various Means of Load Application. **Steel and Composite Structures**. 1(4):393-410.
- Lam, L., and Teng, J.G. (2002). Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete. **Journal of Structural Engineering**. 128(5): 612 - 623.
- Lam, L., and Teng, J.G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. **Journal of Reinforced Plastic and Composite**. 22(13): 1149 - 1186.
- Lin, H.J., and Chen, C. T. (2001). Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 20(18): 1577 - 1600.
- MacGregor, J.G. (1992). **Reinforced Concrete Mechanics and Design**. Second edition. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Mander, J.B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1998). Theoretical stress-strain model for confined concrete. **Journal of Structural Engineering**. 114(8): 1804 - 1826.
- Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928). **A study of failure of concrete under combined compressive stresses**. University of Illinois Engineering Experimental Station. Urbana. Illinois. USA.
- Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S., and Nishiyama, I. (2004). Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. **Journal of Structural Engineering**. 130(2): 180 - 188.
- Schneider, S.P. (1998). Axially loaded concrete-filled steel tubes. **Journal of Structural Engineering**. 124(10): 1125 - 1138
- Seangatith, S., and Thumrongvuth, J. (2009). Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. **Suranaree J. Sci. Technol**. 16(3): 205 - 220.
- Tomii, M.Y., Yoshimura, K., and Morishita, Y. (1977). Experimental studies on concrete filled steel tubular columns under concentric loading. **Proceeding of International**

Colloquium on Stability of Structural Under Static and Dynamic Loads (pp 718 - 741). National Science Foundation. Washington D.C.. USA.

Tomii, M.Y., Watanabe, K., and Xiao, Y. (1985). Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. **Proceeding of International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures** (pp 19 - 26). Harbin. China.

Thumrongvut, J. and Seangatith, S., Experimental Investigation on Concrete Columns Confined with Steel Jackets Subjected to Concentric Axial Compression, **The 6th National Symposium on Graduate Research**, Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok, October 13-14, 2006, paper no. J1_J0028. (in CD-Rom format)

Xiao, Y., He, W., and Choi, K.K. (2005). Confined concrete-filled tubular columns. **Journal of Structural Engineering**. 131(3): 488 - 497.

จักษดา ชำรงวุฒิและสิทธิชัย แสงอาทิตย์, ผลของการโอบรัดของปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ต่อพฤติกรรมเสาคอนกรีต, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย, อุตรธานี, 25-27 ตุลาคม 2549. paper no. STR-002. (in CD-Rom format)

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). **มาตรฐานการสำหรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง**. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008.38. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.

วินิต ช่อวิเชียร. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544). **ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.

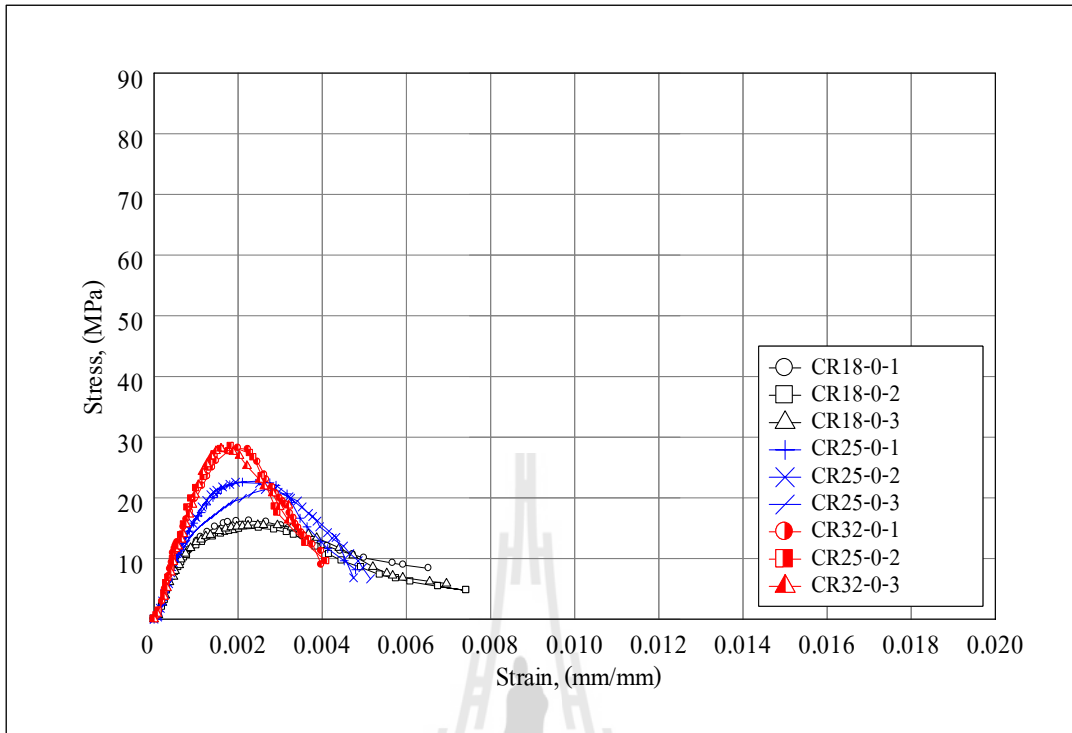
สิทธิชัย แสงอาทิตย์และจักษดา ชำรงวุฒิ. **พฤติกรรมทางโครงสร้างของ tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า**, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550. paper no. STR-018. (in CD-Rom format)

ศรัณย์ กำจัดโรค และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, **เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกรัดด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน**, การประชุมวิชาการนวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 23-24 มกราคม 2547. (ในรูปแบบ CD-Rom)

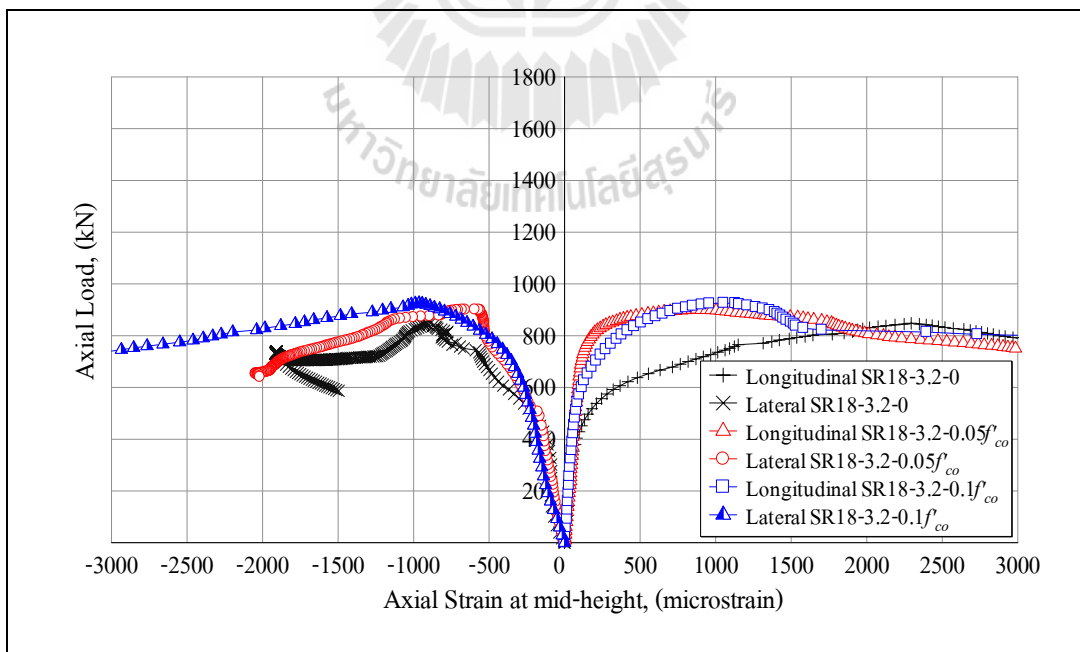


ภาคผนวก ก

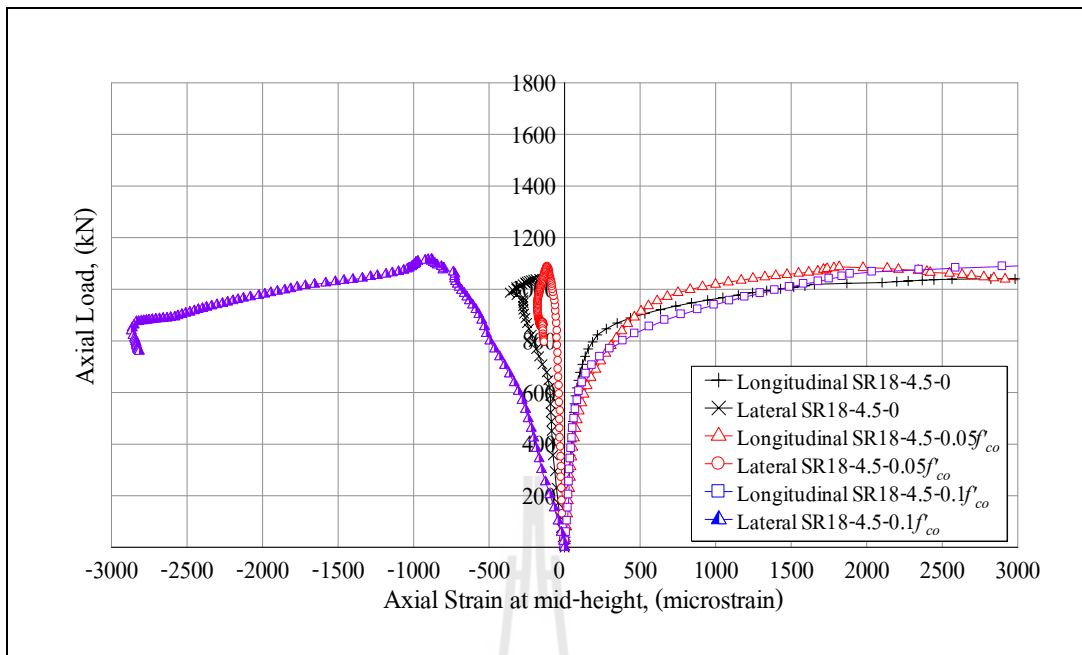
กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ในหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



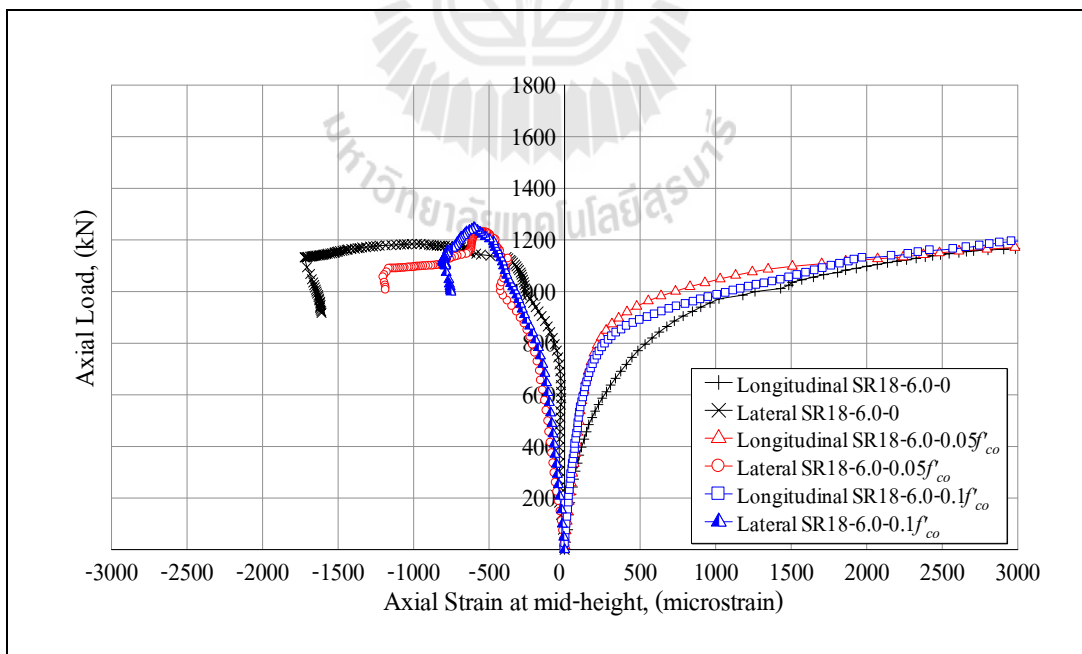
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง



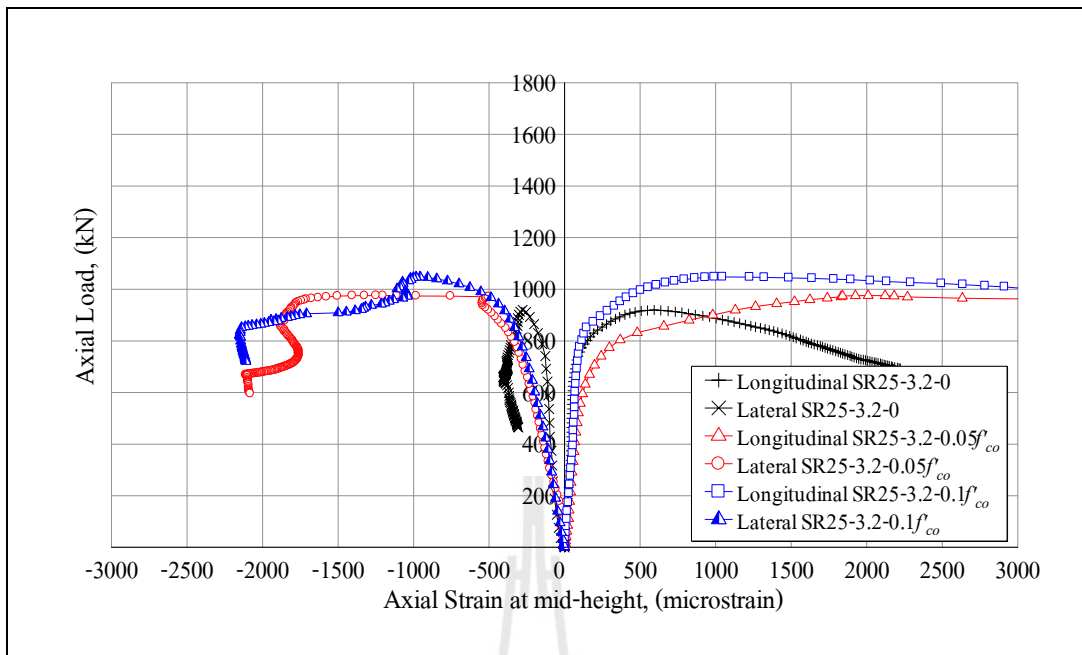
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 3.2



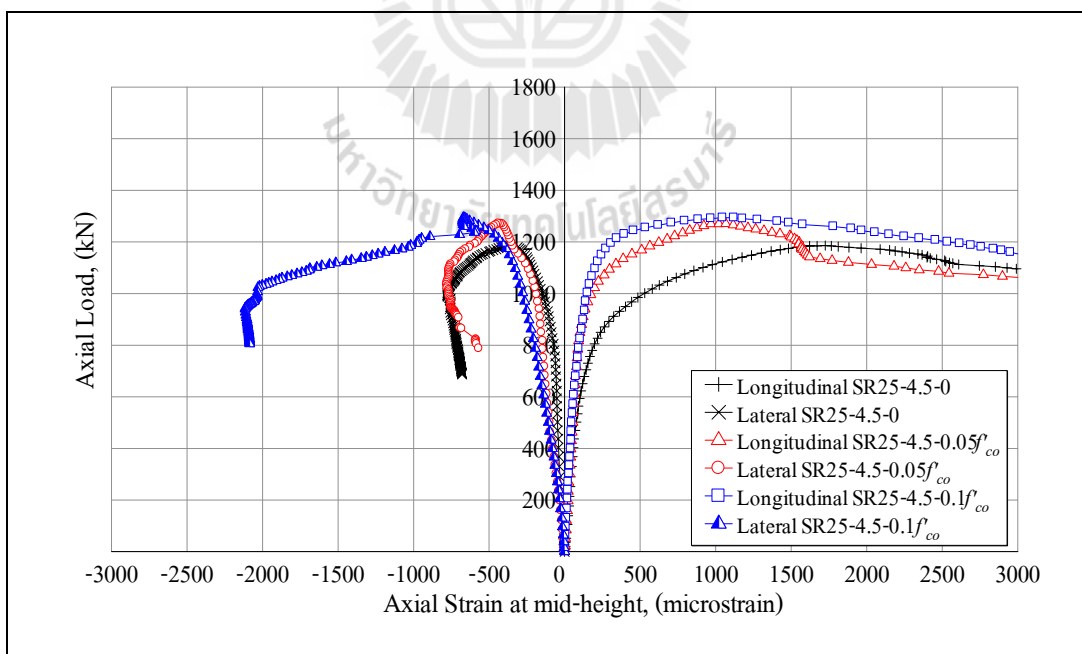
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 4.5



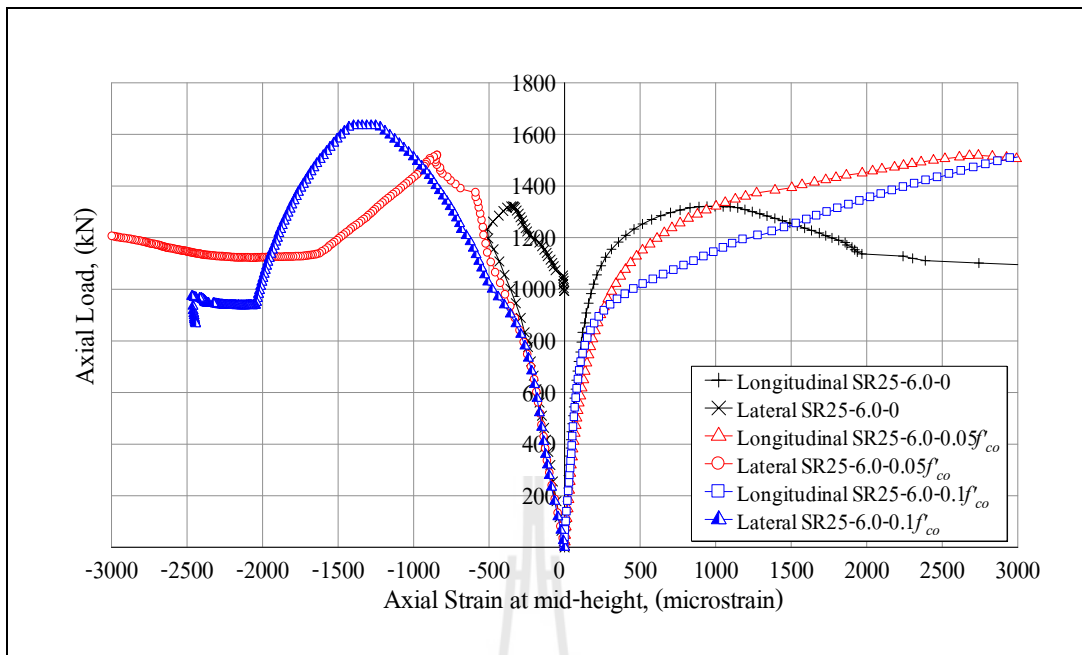
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 6.0



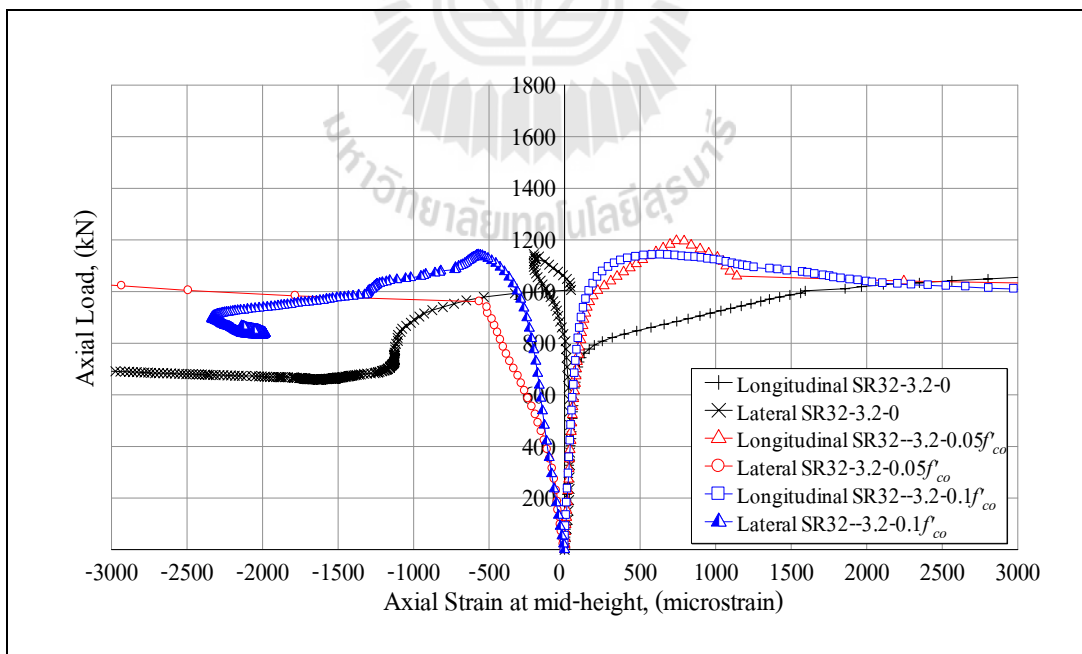
รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 3.2



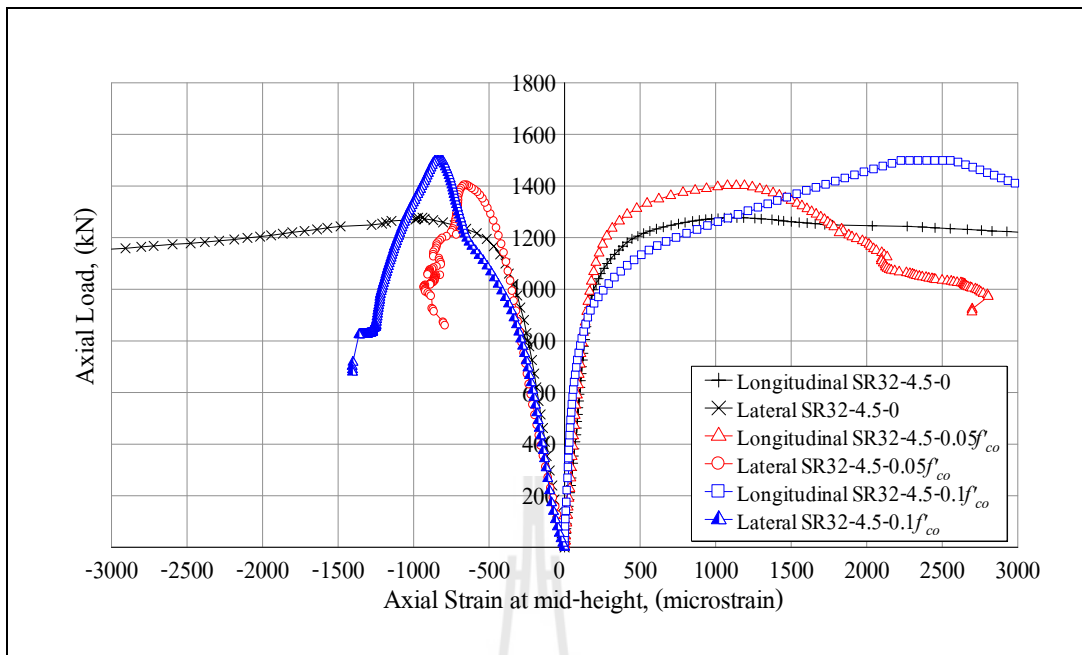
รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 4.5



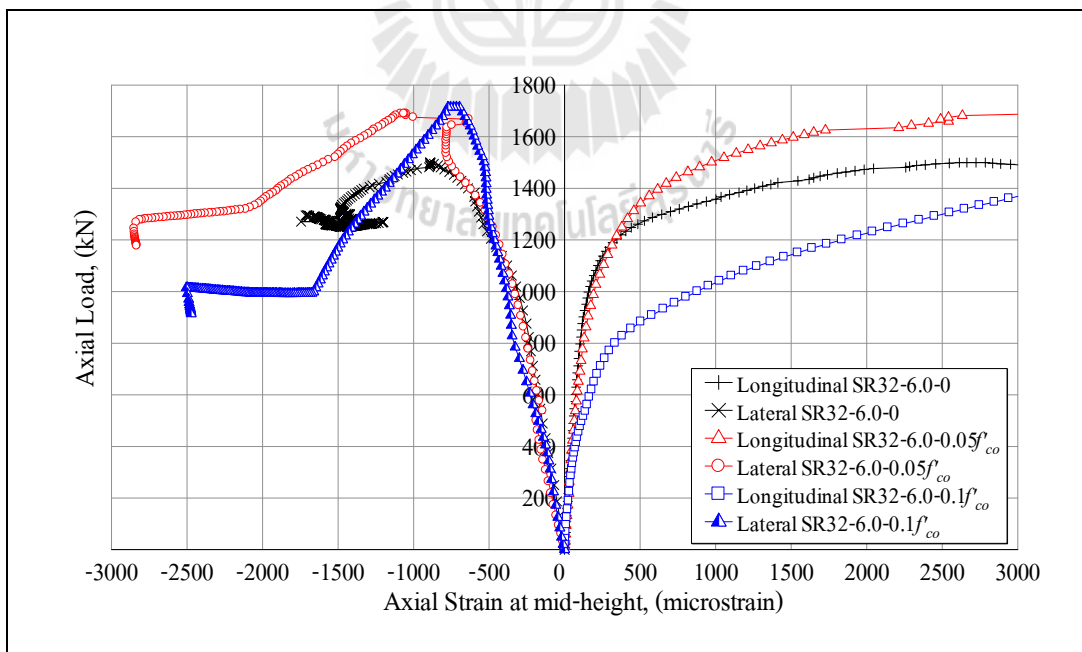
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 6.0



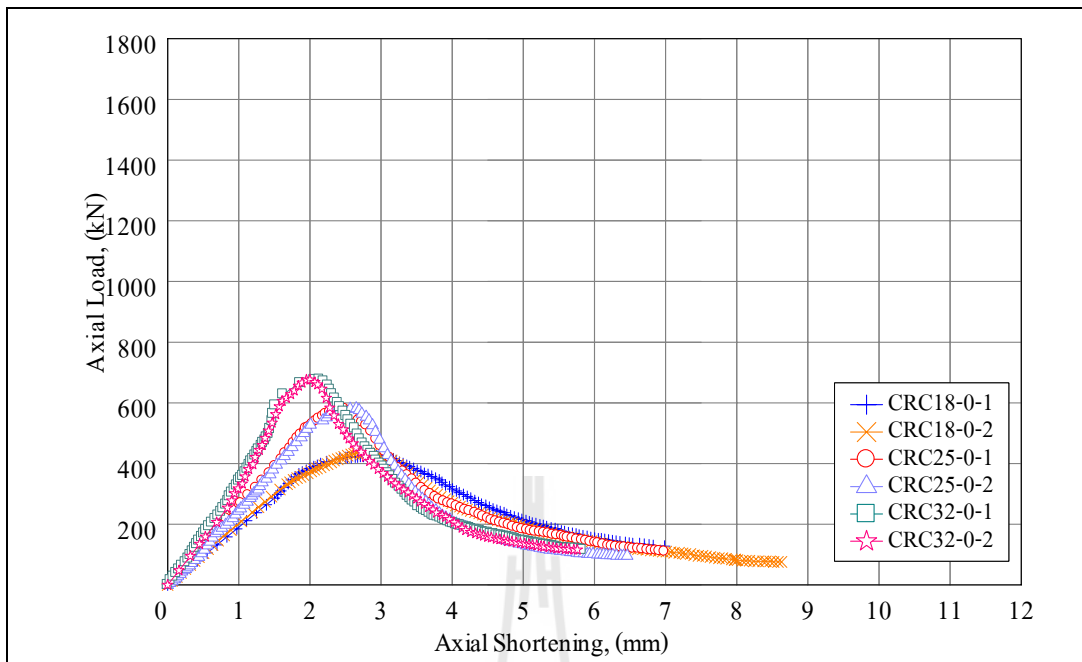
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 3.2



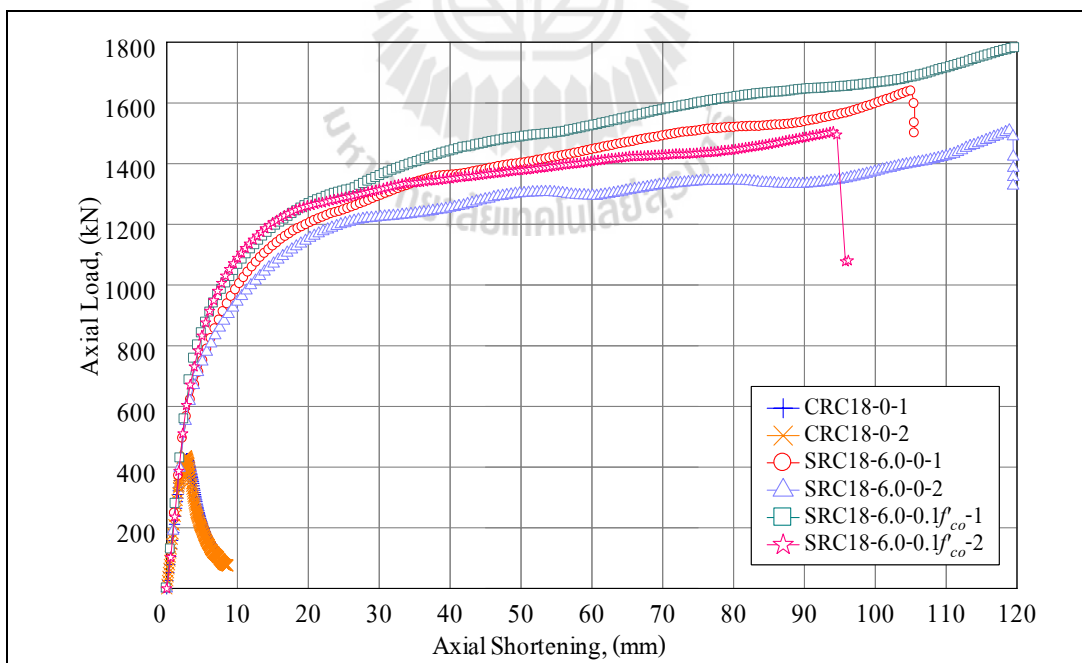
รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 4.5



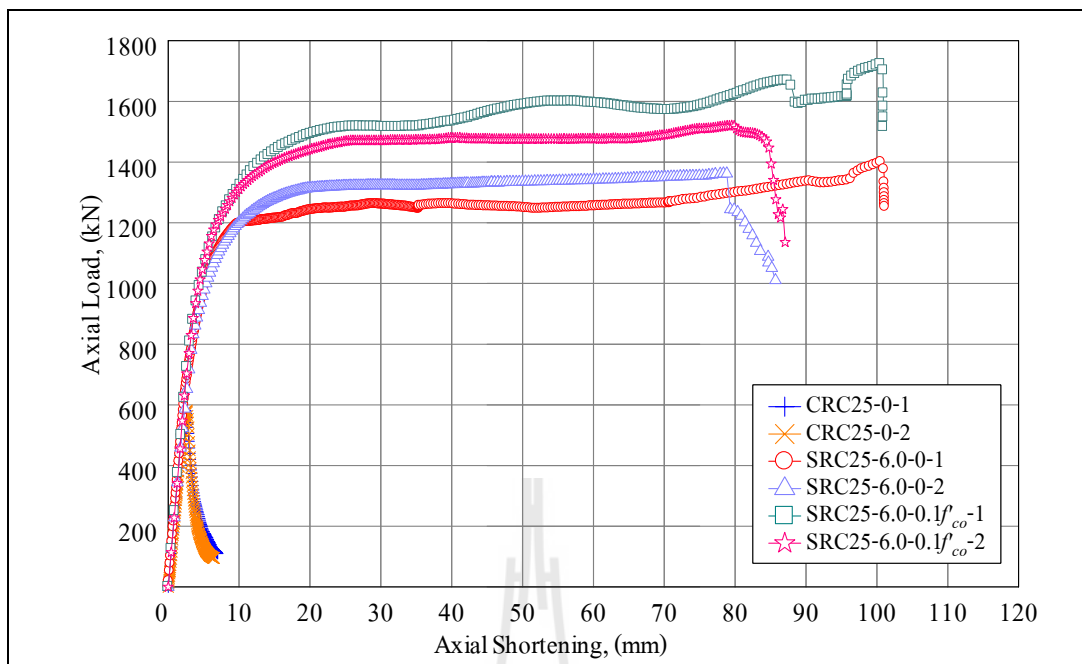
รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 6.0



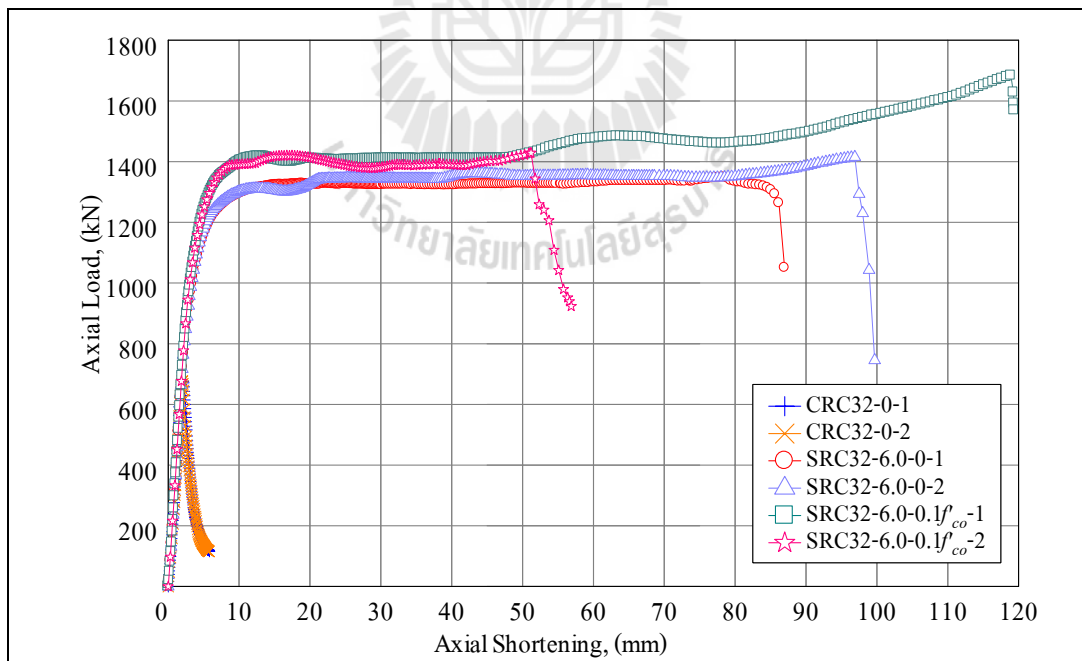
รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน
ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง



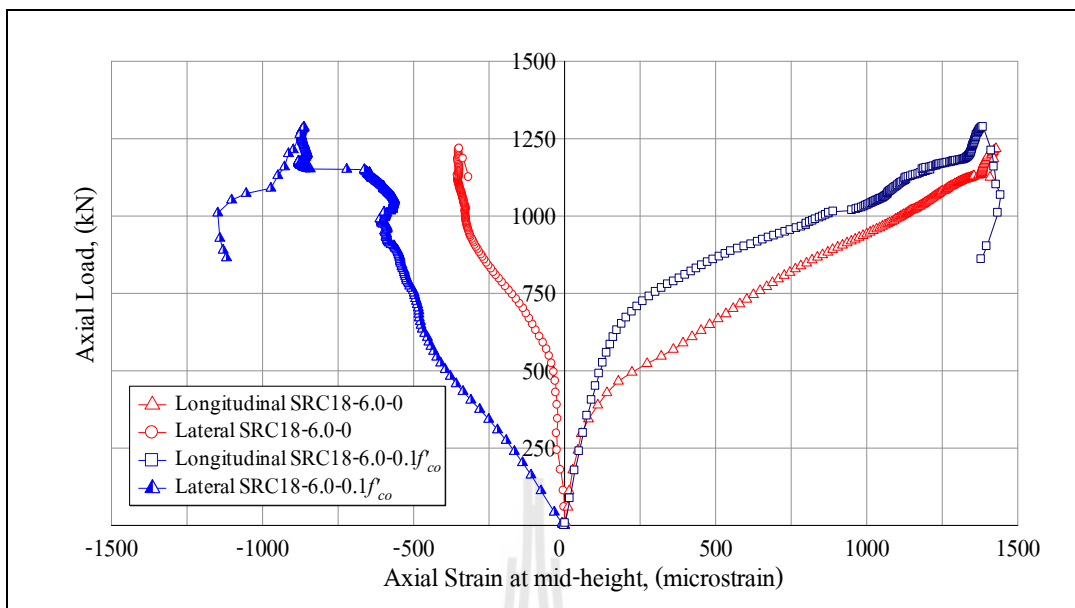
รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน
ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18 \text{ MPa}$



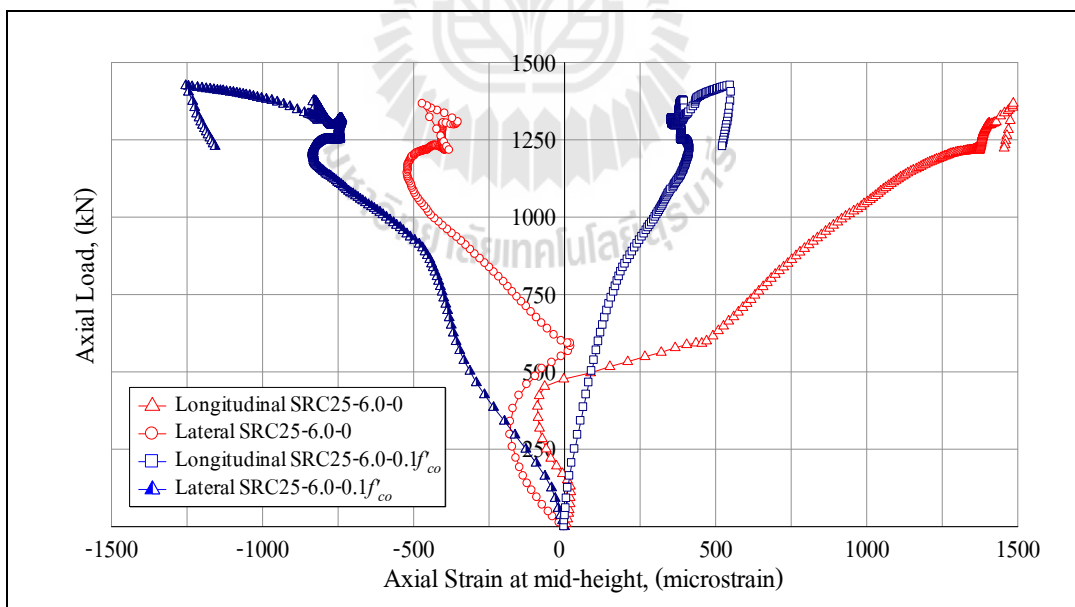
รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน
ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa



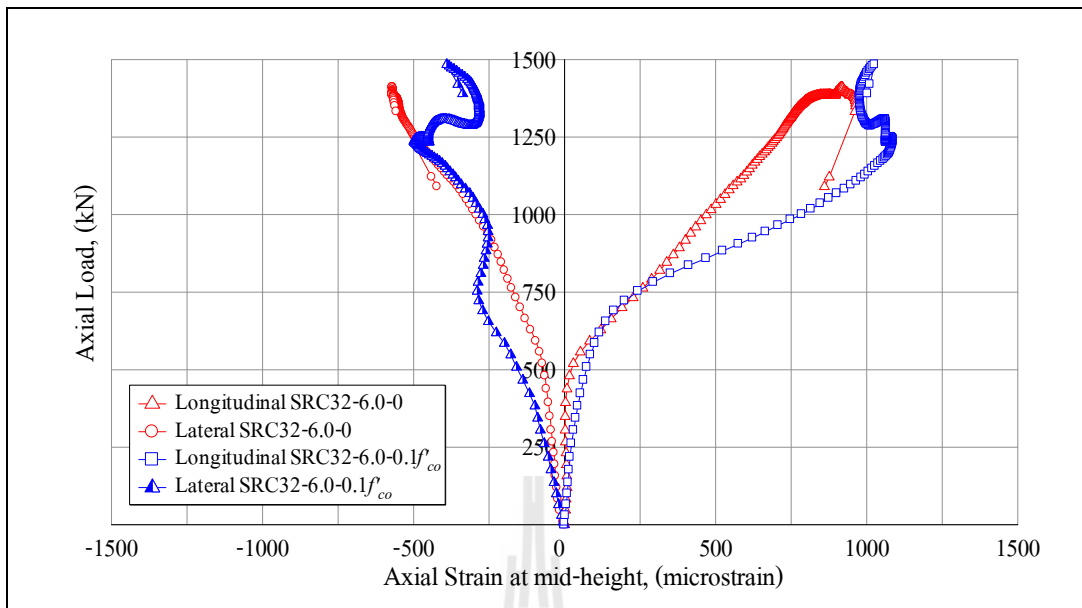
รูปที่ ก.14 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน
ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa



รูปที่ ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa



รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa



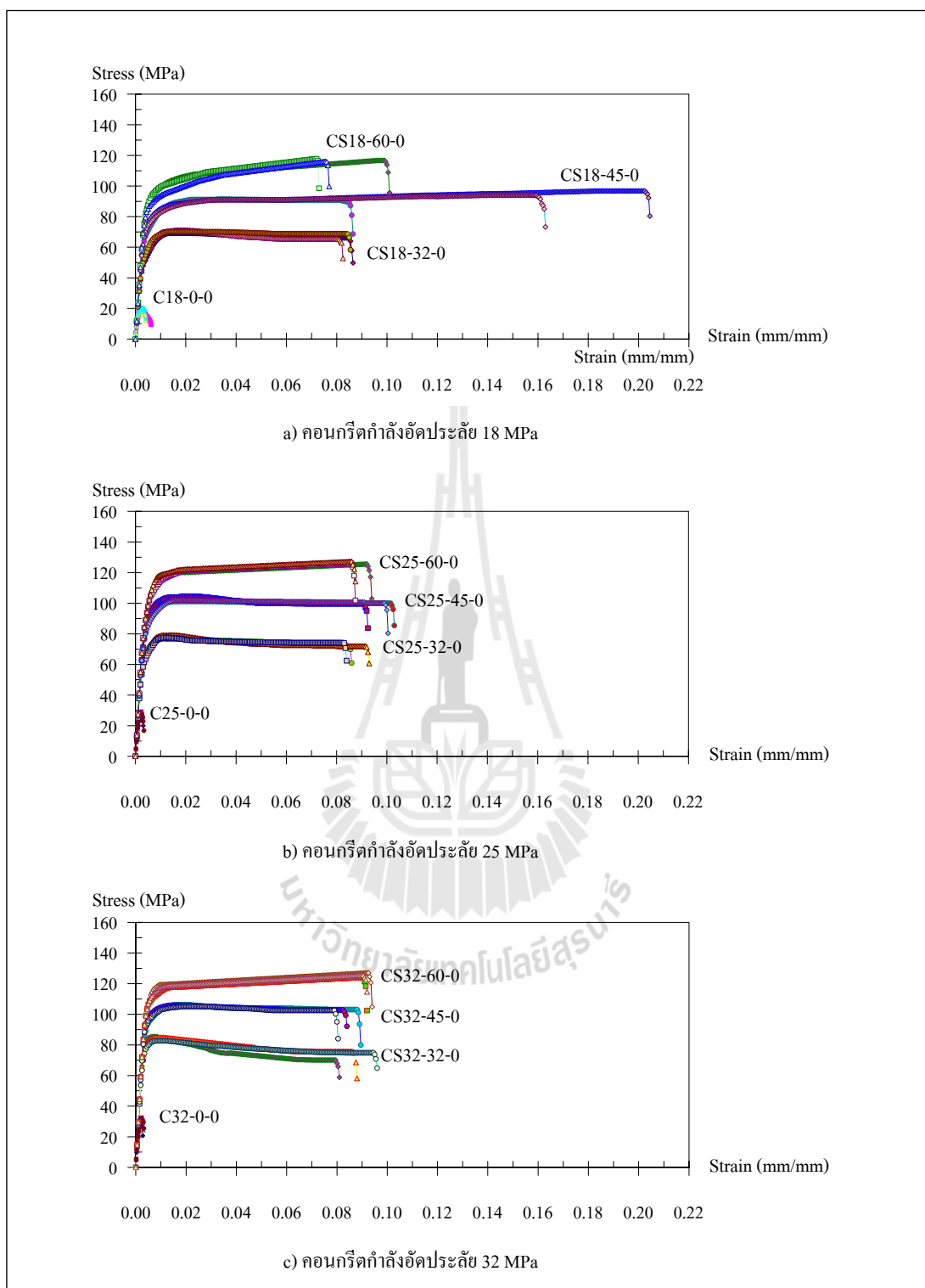
รูปที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa



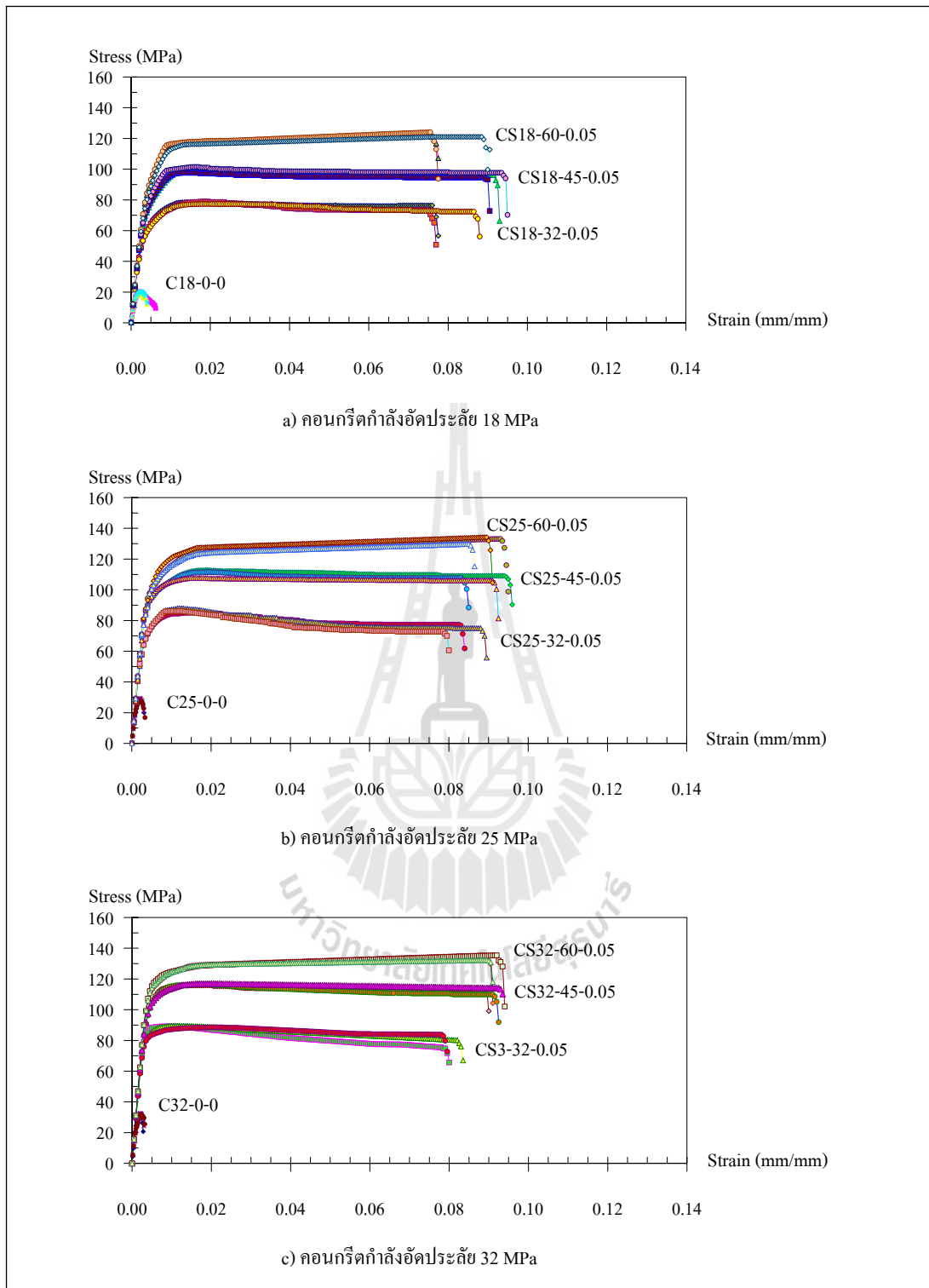


ภาคผนวก ข

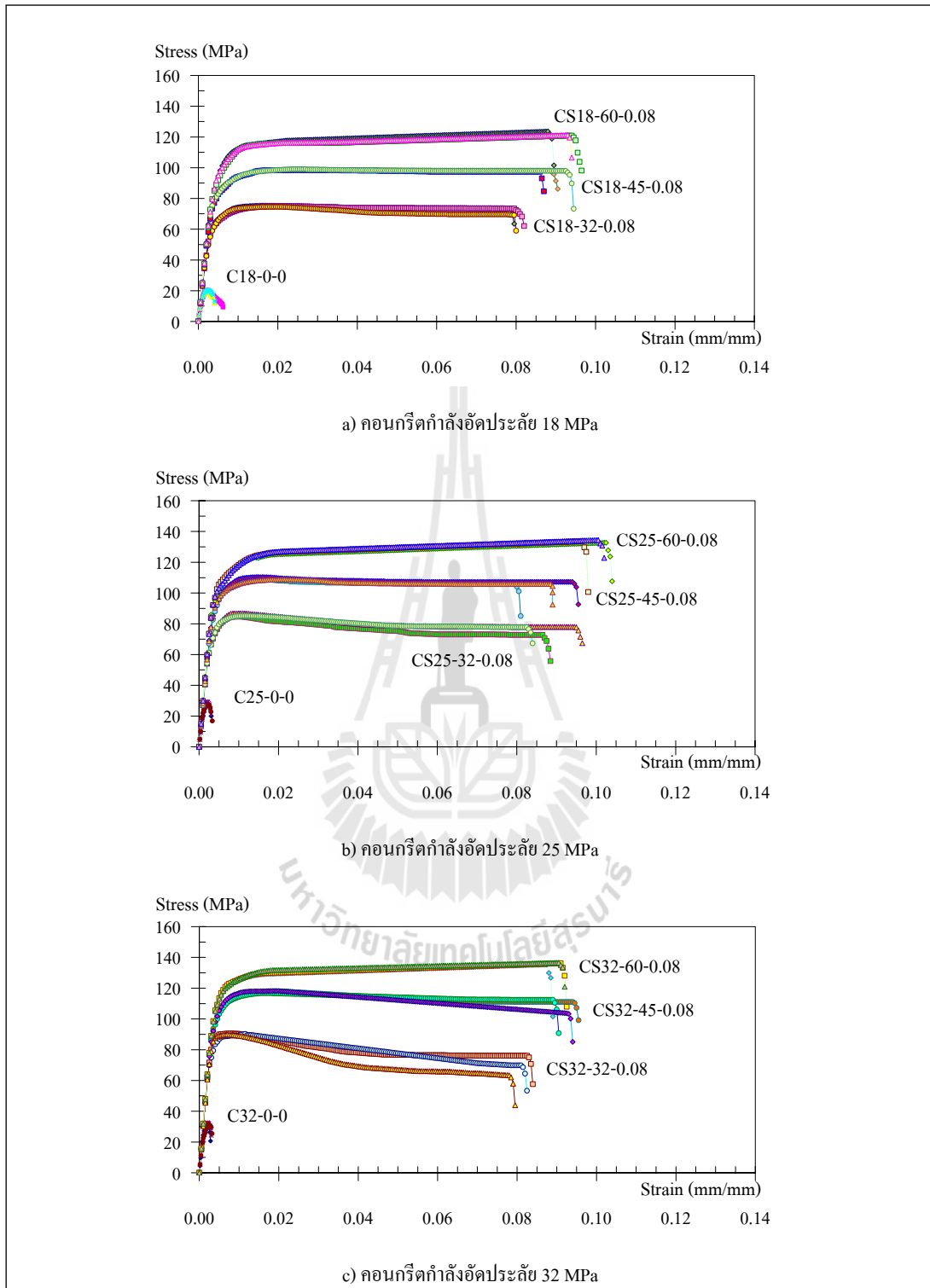
กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ในหน้าตัดกลม



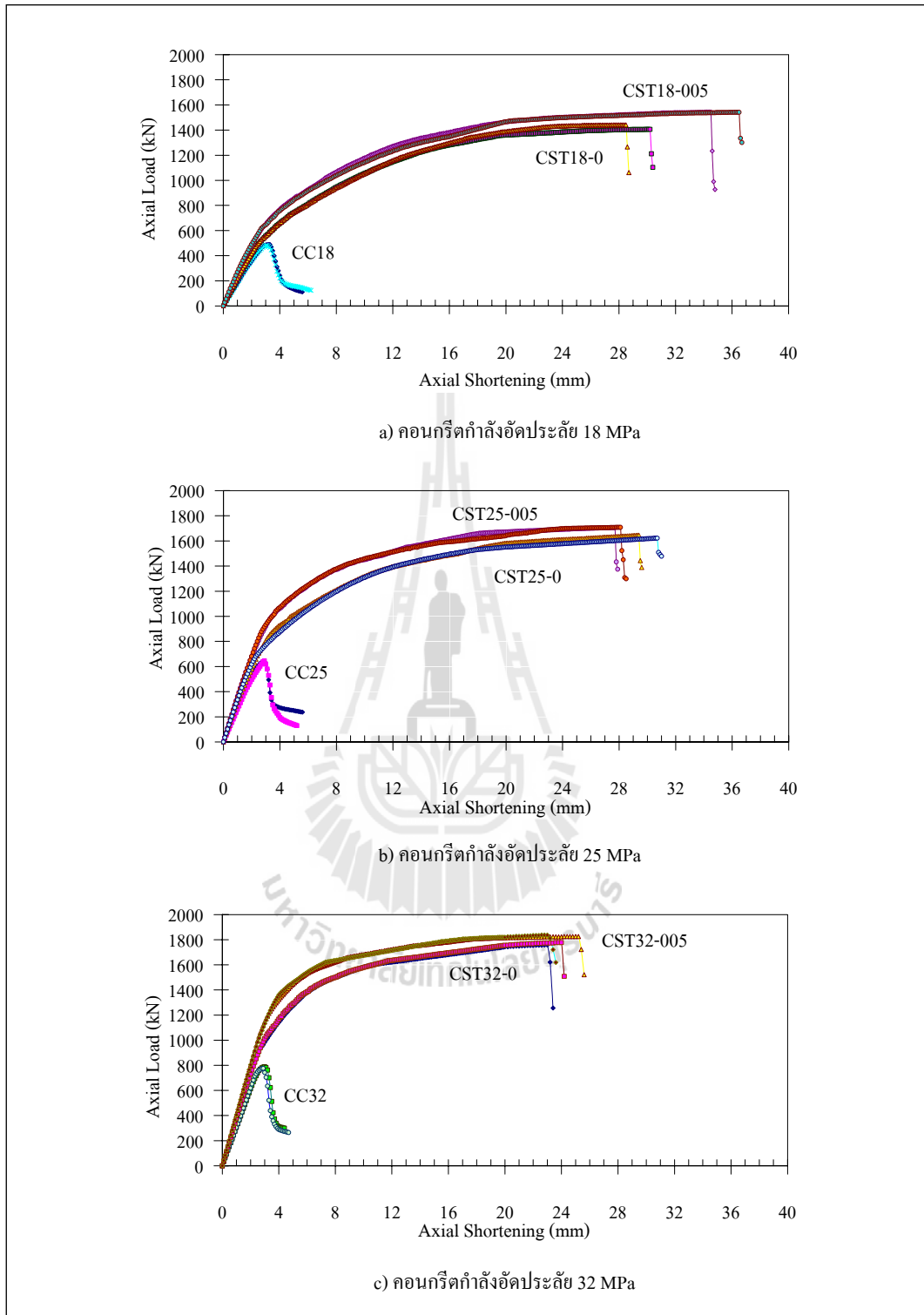
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ
 ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)



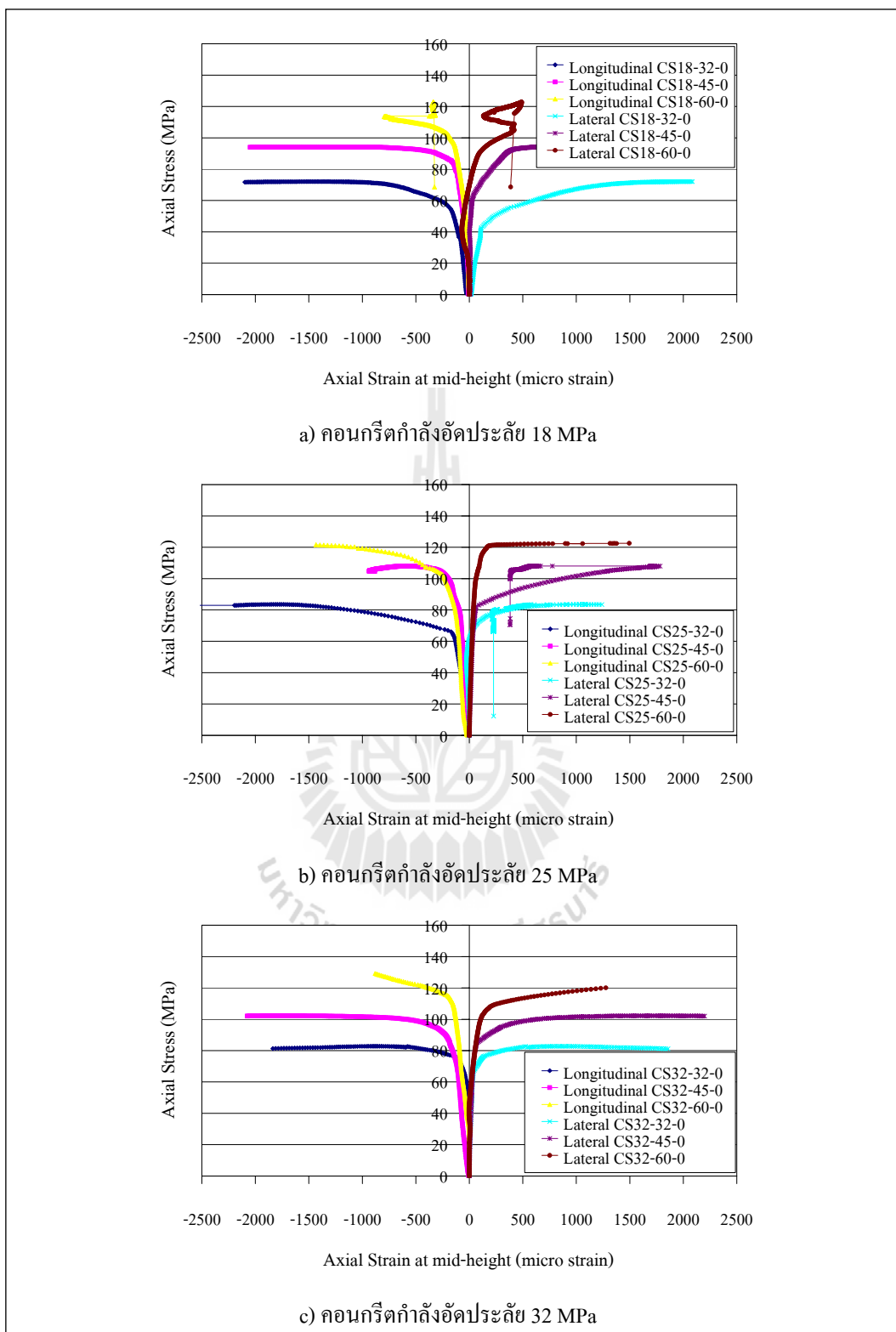
รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ
 ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



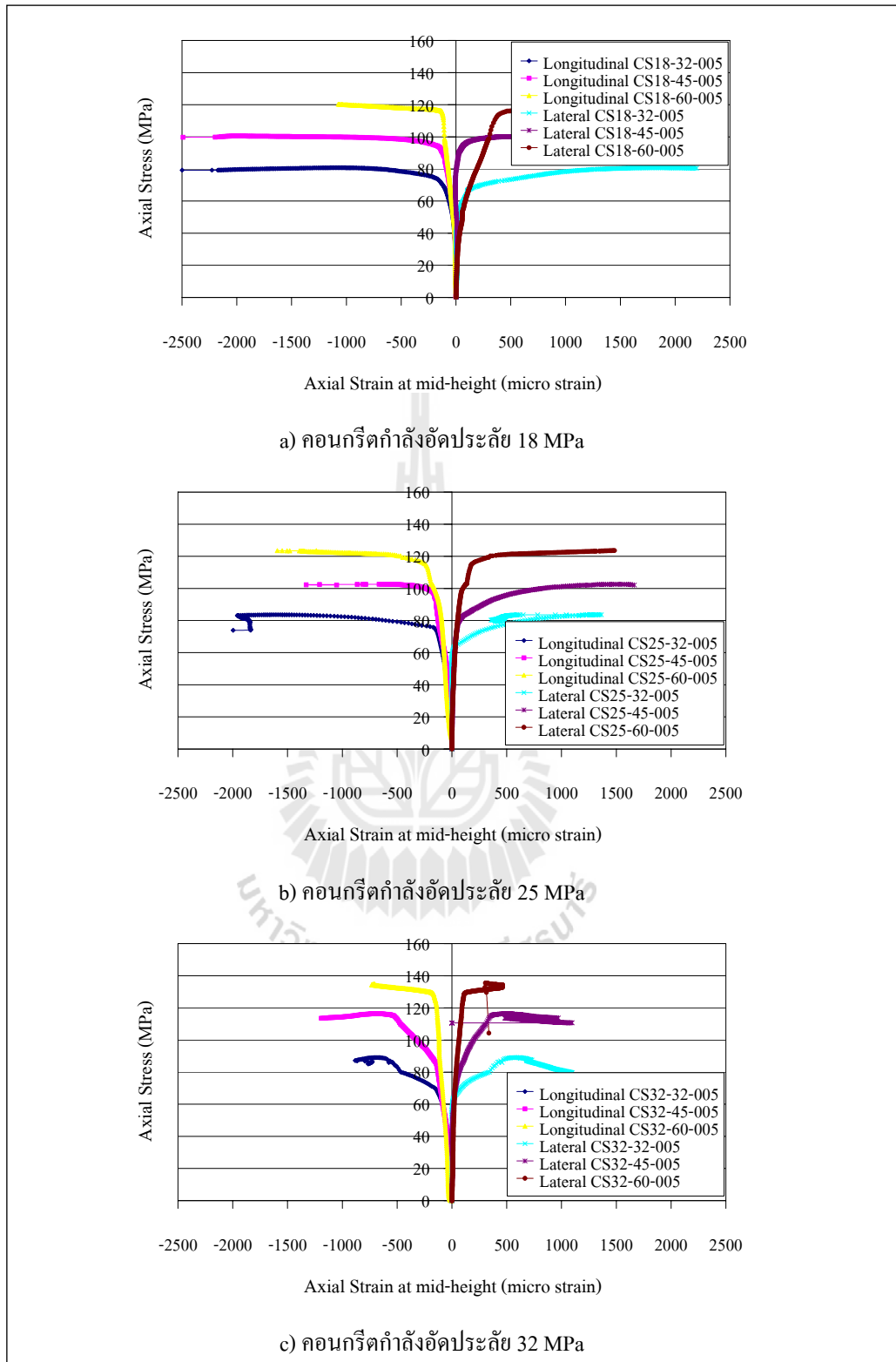
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ
 ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.08 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)



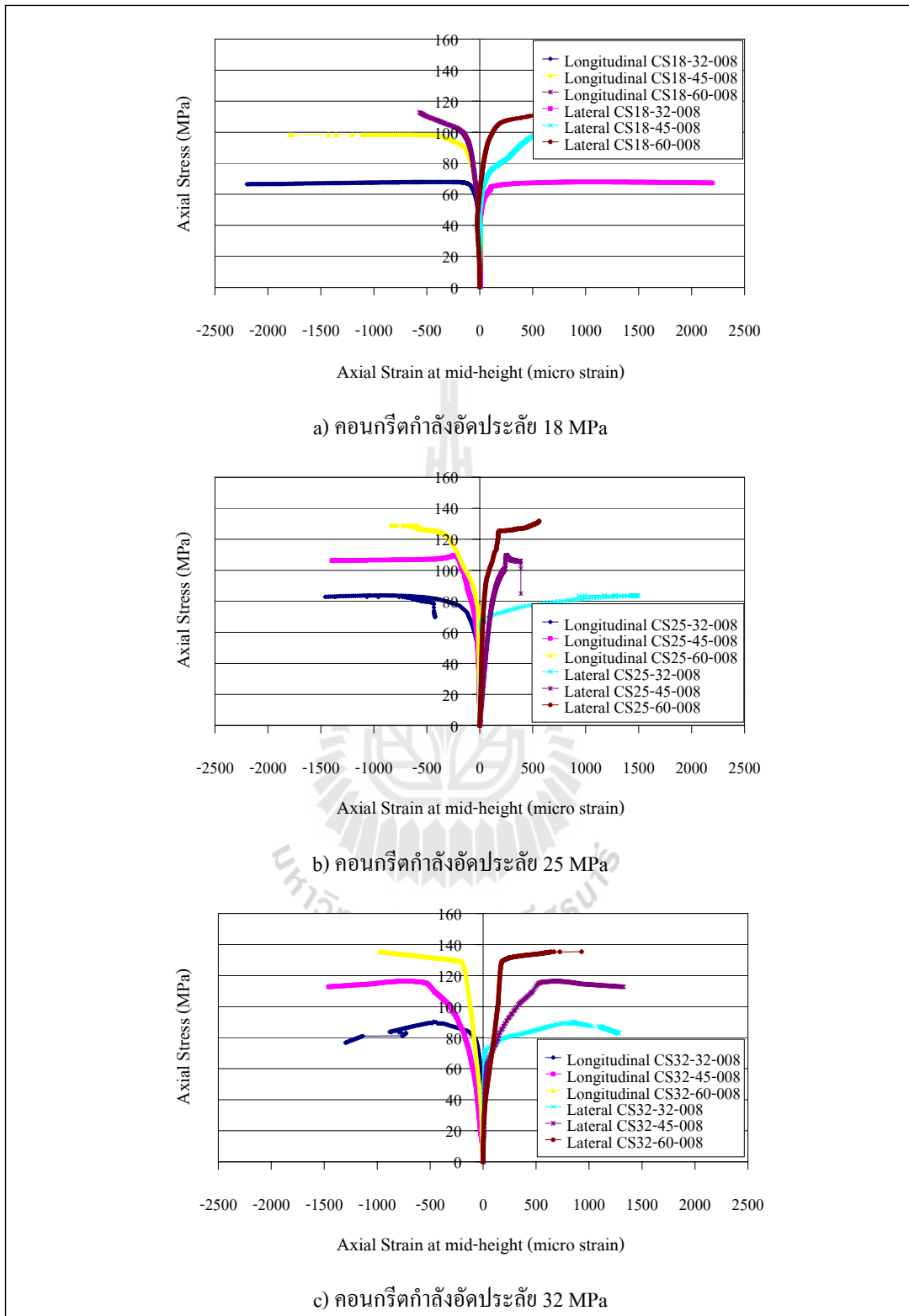
รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของ Tubed RC column ด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตรและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน



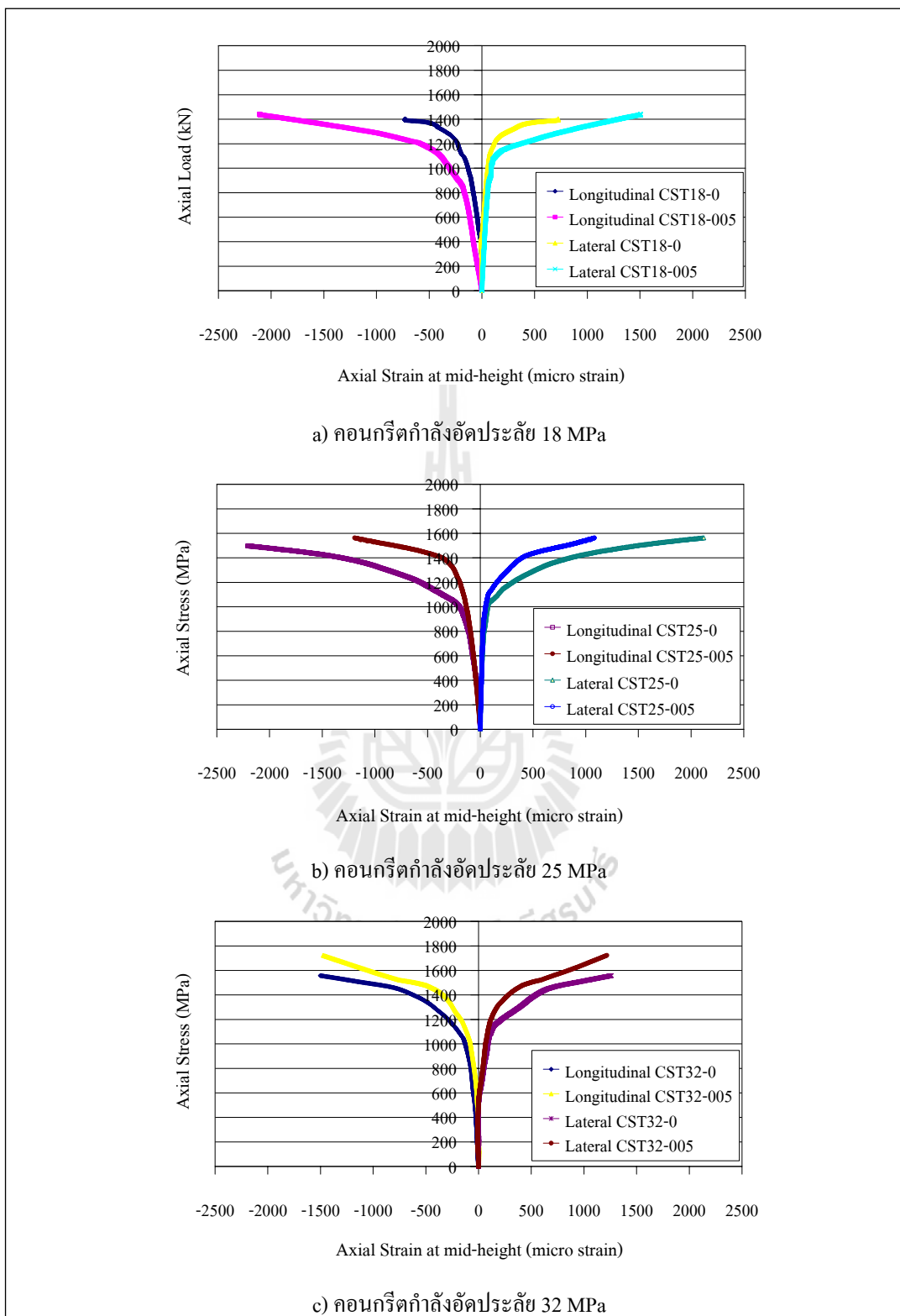
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน



รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.08 f'_{co}$



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของ Tubed RC Column



ภาคผนวก ค

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ค.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ค.1.1 ท่อผนังบาง

สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่ใช้โอบรัดแกน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ถูกประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงในทิศทางของเส้นรอบวงในท่อรับความดันผนังบาง (σ_1) โดยความดันภายในที่เกิดขึ้นนั้น (ρ) เกิดการขยายตัวของแกนคอนกรีตที่รับแรงกดอัดในแนวแกน กระทำในแนวตั้งฉากแก่ผนังของท่อปลอกเหล็กทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงในปลอกเหล็กหรือเรียกว่าหน่วยแรงโอบรัดที่เกิดขึ้น โดยที่มีอัตราส่วนของรัศมีภายในของท่อรับความดันต่อความหนาของผนังท่อ มากกว่าหรือเท่ากับ 10 หรือ $\frac{r}{t} \geq 10$ สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ ค.1

$$\sigma_1 = \frac{\rho r}{t} \quad (\text{ค.1})$$

โดยที่ ρ คือ ความดันภายในท่อรับความดัน

r คือ รัศมีภายในท่อรับความดัน

t คือ ความหนาของท่อรับความดัน

ค.1.2 แรงบิด

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบกระทำโดยการใช้อุปกรณ์สำหรับโอบรัดแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กหน่วยแรงโอบรัดที่เกิดจากการขันอุปกรณ์ด้วยสลักเกลียวโดยใช้ประแจปอนด์ (Torque wrench) ซึ่งสามารถที่จะระบุขนาดของโมเมนต์ในการบิดที่ต้องการได้ โดยสามารถคำนวณ โมเมนต์บิดดังแสดงในสมการที่ ค.2

$$T = CdF_i \quad (\text{ค.2})$$

โดยที่ T คือ โมเมนต์การบิด

C คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะและคุณภาพของเกลียว ซึ่งค่าที่แนะนำให้ใช้งานคือ

$$C = 0.15 \quad \text{เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น}$$

$$C = 0.2 \quad \text{เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น}$$

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุนของสลักเกลียว

F_i คือ แรงดึงขั้นต้นในแนวแกนของสลักเกลียว

ค.2 การคำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดก่อน

ค.2.1 สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ค.2.1.1 การคำนวณขนาดสลักเกลียว

ตัวอย่างทดสอบที่นำมาคำนวณมี f'_{co} เท่ากับ 32 MPa และหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ต้องการจากการขันสลักเกลียวคือ $0.1 f'_{co}$ ซึ่งเป็นกรณีที่มีค่าสูงสุดและเกิดแรงดึงที่สลักเกลียวสูงที่สุดด้วยเช่นกัน เพื่อให้ใช้ได้กับตัวอย่างทดสอบอื่น ๆ ที่มีค่า f'_{co} เท่ากับ 18 และ 25 MPa ได้ด้วย และเป็นการป้องกันการวิบัติจากสลักเกลียวก่อน

- หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีตคือ $0.1 f'_{co}$ จะได้

$$0.1 f'_{co} = 0.1 \times 32 \text{ MPa} = 3.2 \text{ MPa}$$

- คำนวณหาแรงดึงที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงโอบรัดก่อน โดยใช้

$$P = 0.1 f'_{co} \times A$$

$$P = (3.2 \text{ MPa}) \times (0.15 \text{ m}) \times (0.30 \text{ m})$$

$$P = 144 \text{ kN}$$

- คำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว

เนื่องจากการใช้สลักเกลียวทั้งหมดจำนวน 10 ตัว ดังนั้น n จึงมีค่าจำนวนสลักเกลียวเท่ากับ 10 แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว โดยใช้

$$P_i = \frac{P}{n}$$

$$P_i = \frac{144}{10} = 14.4 \text{ kN}$$

จากตารางที่ ค.1 สามารถเลือกสลักเกลียวตามมาตรฐาน ISO/R898/I-1968(E) ที่มีชั้นคุณสมบัติ 6.9 มีหน่วยแรงพิสูจน์ต่ำสุดเท่ากับ 540 N/mm^2 และใช้อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) เท่ากับ 5 ดังนั้นหน่วยแรงใช้งานคือ

$$\sigma_{id} = \frac{540}{5} = 108 \text{ N/mm}^2$$

จาก $A_{ss} = \frac{P_i}{\sigma_{id}}$

โดยที่ A_{ss} คือ พื้นที่รับความเค้นของสลักเกลียว

ดังนั้น $A_{ss} = \frac{11.4 \times 10^3}{108} = 133.33 \text{ mm}^2$

จากตารางที่ ค.2 เลือกใช้สลักเกลียวขนาด M16 ซึ่งมีพื้นที่รับหน่วยแรง $A_s = 157 \text{ mm}^2$

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว หมุดเกลียวและสตั๊ด

คุณสมบัติทางกล	ชั้นคุณสมบัติ											
	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	6.9	8.8	10.9	12.9	14.9
ความต้านแรงดึง ต่ำสุด (N/mm ²)	340	400		500		600			800	1000	1200	1400
ความต้านแรงดึง สูงสุด (N/mm ²)	490	550		700		800			1000	1200	1400	1600
ความต้านแรงดึง ครากต่ำสุด (N/mm ²)	200	240	320	300	400	360	480	-	-	-	-	-
หน่วยแรงพิสูจน์ 0.2% ต่ำสุด (N/mm ²)	-	-	-	-	-	-	-	540	640	900	1080	1260
การยืด หลังจากขาด %	25	25	14	20	10	16	8	12	12	9	8	7



ตารางที่ ค.2 เกลียวเมตรแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ		ระยะพิตช์ P	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางพิตช์ d_2, D_2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย		พื้นที่รับหน่วยแรง A_s, mm^2
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2			d_1	D_1	
1.00		0.25	0.838	0.693	0.729	0.456
1.20		0.25	1.038	0.893	0.929	0.730
1.60		0.35	1.373	1.170	1.221	1.270
2.00		0.40	1.740	1.509	1.567	2.070
2.50		0.45	2.208	1.948	2.013	3.390
3.00		0.50	2.675	2.387	2.459	5.030
4.00	3.50	0.60	3.110	2.764	2.850	6.780
		0.70	3.545	3.141	3.242	8.780
	4.50	0.75	4.013	3.580	3.688	11.300
5.00		0.80	4.480	4.019	4.134	14.200
6.00		1.00	5.350	4.773	4.917	20.100
8.00		1.25	7.183	6.466	6.647	36.600
10.00	(9)	1.25	8.188	7.466	7.647	48.100
		1.50	9.026	8.160	8.376	58.000
	(11)	1.50	10.026	9.160	9.376	72.300
12.00		1.75	10.863	9.853	10.106	84.300
16.00	14.00	2.00	12.701	11.546	11.835	115.000
		2.00	14.701	13.546	13.835	157.000
20.00	18.00	2.50	16.376	14.933	15.294	192.000
		2.50	18.376	16.933	17.294	245.000
	22.00	2.50	20.376	18.933	19.294	303.000
24.00		3.00	22.051	20.319	20.752	353.000
30.00	27.00	3.00	25.051	23.319	23.752	459.000
		3.50	27.727	25.706	26.211	561.000
36.00	33.00	3.50	30.727	28.706	29.211	694.000
		4.00	33.402	31.093	31.670	817.000
	39.00	4.00	36.402	34.093	34.670	976.000
42.00		4.50	39.077	36.479	37.129	1120.00
48.00	45.00	4.50	42.077	39.479	40.129	1300.000
		5.00	44.752	41.866	42.587	1470.000
56.00	52.00	5.00	48.752	45.866	46.587	1760.000
		5.50	52.428	49.252	50.046	2030.000
64.00	60.00	5.50	56.428	53.252	54.046	2360.000
		6.00	60.103	56.639	57.505	2680.000
	68.00	6.00	64.103	60.639	61.505	3060.000

ค.2.1.2 ขั้นตอนการคำนวณการหาโมเมนต์บิดสำหรับการขันสลักเกลียว

การคำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดก่อนของตัวอย่างทดสอบ SC18-3.2-0.05 f'_{co} และ $f'_{co} = 18 \text{ MPa}$ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

■ คำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นจากการขันสลักเกลียวคือ $0.05 f'_{co}$ หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการคือ

$$0.05 f'_{co} = 0.05 \times 18 \text{ MPa} = 0.9 \text{ MPa}$$

■ คำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กและสลักเกลียว โดยใช้

$$P = \sigma_1 A$$

$$P = (0.9 \text{ MPa}) \times (0.15 \text{ m}) \times (0.30 \text{ m})$$

$$P = 40.5 \text{ kN}$$

เนื่องจากการใช้สลักเกลียวทั้งหมดจำนวน 10 ตัว ดังนั้น $n =$ จำนวนสลักเกลียวเท่ากับ 10 แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว โดยใช้

$$P_i = \frac{P}{n}$$

$$P_i = \frac{40.5}{10} = 4.05 \text{ kN}$$

■ คำนวณหาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว โดยใช้สมการ

$$T = CdP_i$$

โดยที่ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียว M16 เท่ากับ 14.701 mm

P_i คือ แรงดึงในแนวแกนของสลักเกลียว

C คือ สัมประสิทธิ์โมเมนต์บิด

$$C = 0.15 \quad \text{เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น}$$

$$C = 0.20 \quad \text{เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น}$$

เนื่องจากการทดสอบนี้ไม่มีการหล่อสลักเกลียว ดังนั้น C เท่ากับ 0.2

ดังนั้น

$$T = (0.2) \times (14.701 \text{ mm}) \times (4.05 \text{ kN})$$

$$T = 11.91 \text{ N.m}$$

ตารางที่ ค.3 สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับชั้นสลักเกลียวที่ค่า $0.05 f'_{co}$

รายการคำนวณ	กำลังอัดประลัย (MPa)		
	18	25	32
หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต $0.05 f'_{co}$ (MPa)	0.9	1.25	1.6
แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว P (kN)	4.05	5.625	7.2
โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว T (N.m)	11.91	16.54	21.17

ตารางที่ ค.4 สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับชั้นสลักเกลียวที่ค่า $0.1 f'_{co}$

รายการคำนวณ	กำลังอัดประลัย (MPa)		
	18	25	32
หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต $0.1 f'_{co}$ (MPa)	1.8	2.5	3.2
แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว P (kN)	8.1	11.25	14.4
โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว T (N.m)	23.82	33.08	42.34



ค.2.2 สำหรับหน้าตัดกลม

ค.2.2.1 ขั้นตอนการคำนวณการหาหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง

การคำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ CS18-32-0.05 คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.5 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คอนกรีต	ปลอกเหล็ก	ขนาดตัวอย่างทดสอบ
$f'_{co} = 18 \text{ MPa}$	$t = 4.5 \text{ มิลลิเมตร}$	$d = 150 \text{ มิลลิเมตร}$
-	$f_y = 321.6 \text{ MPa}$	$L = 300 \text{ มิลลิเมตร}$

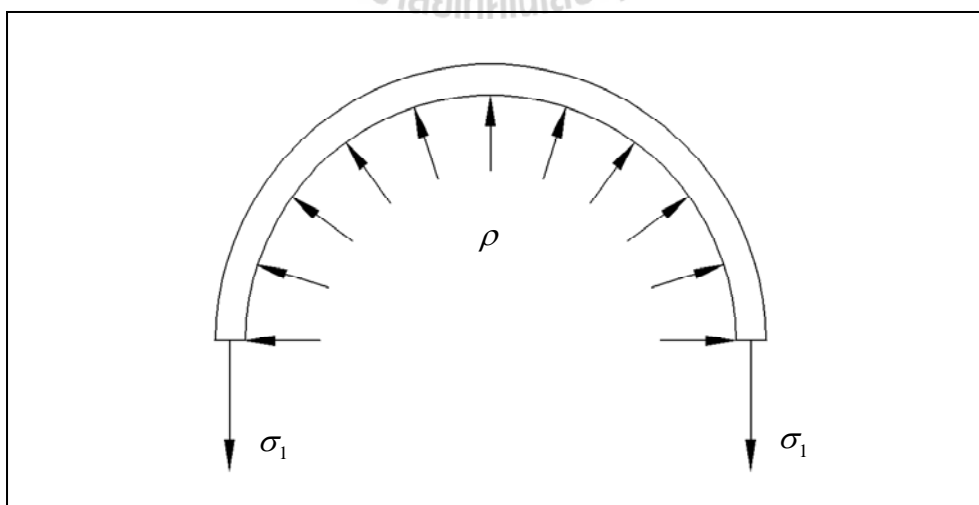
วิธีแสดงการคำนวณ

1. หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต

$$\text{หน่วยแรงโอบรัด } 0.05 f'_{co} = 0.05 \times 18 \text{ MPa} = 0.9 \text{ MPa}$$

2. คำนวณหาหน่วยแรงตามแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) ที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก

$$\begin{aligned} \text{สมการ} \quad \sigma_1 &= \frac{\rho r}{t} \\ \sigma_1 &= (0.9 \text{ MPa}) \times (75 \text{ mm.}) / (4.5 \text{ mm}) \\ \sigma_1 &= 15 \text{ MPa} \end{aligned}$$



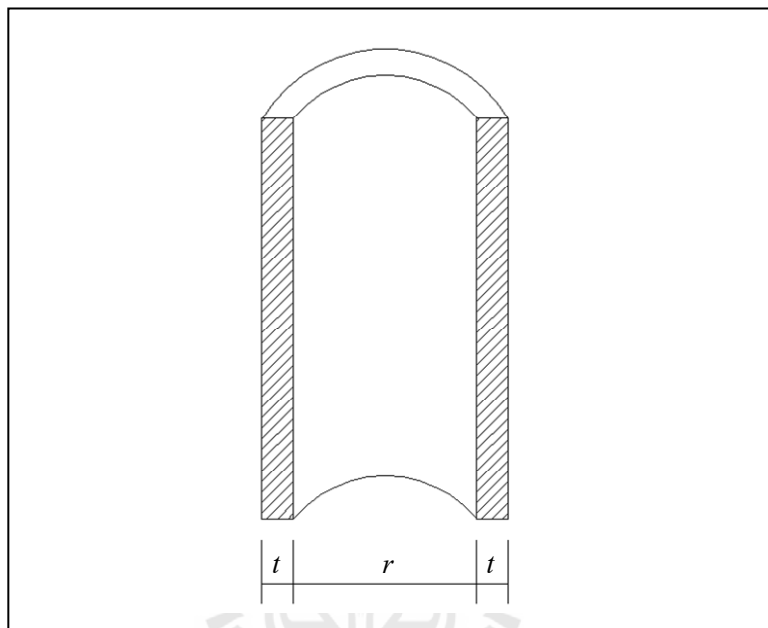
รูปที่ ค.1 Free-body diagram ของปลอกเหล็ก

3. คำนวณหาแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก

สมการ $P = \sigma_1 A$

$$P = (15 \text{ MPa}) \times (4.5 \text{ mm}) \times (300 \text{ mm})$$

$$P = 20.25 \text{ kN}$$



รูปที่ ค.2 ภาพตัดของปลอกเหล็ก

4. คำนวณหาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในสลักเกลียว

สมการ $T = CdF_i = CdP$

$$T = (0.2) \times (14.071 \text{ mm}) \times (20.25 \text{ kN})$$

$$T = 59.54 \text{ N-m}$$

ตารางที่ ค.6 ตารางสรุปผลโมเมนต์บิดที่นำไปบิดสลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัด
ด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

1. หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต						
กำลังอัดประลัย (MPa)	0.05 f'_{co} (MPa)			0.08 f'_{co} (MPa)		
18	0.9			1.44		
25	1.25			2		
32	1.6			2.56		
2. กำหนดหาหน่วยแรงตามแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) ที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก						
กำลังอัดประลัย (MPa)	หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง $\sigma_1 = \frac{\rho r}{t}$ (MPa)					
	0.05 f'_{co}			0.08 f'_{co}		
	3.2 mm	4.5 mm	6.0 mm	3.2 mm	4.5 mm	6.0 mm
18	21.1	15.0	11.3	33.8	24.0	18.0
25	29.3	20.8	15.6	46.9	33.3	25.0
32	37.5	26.7	20.0	60.0	42.7	32.0
3. กำหนดหาแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก						
กำลังอัดประลัย (MPa)	แรงดึงในปลอกเหล็ก $P = \sigma_1 A$ (kN)					
	0.05 f'_{co}			0.08 f'_{co}		
	3.2 mm	4.5 mm	6.0 mm	3.2 mm	4.5 mm	6.0 mm
18	20.3	20.3	20.3	32.4	32.4	32.4
25	28.1	28.1	28.1	45.0	45.0	45.0
32	36.0	36.0	36.0	57.6	57.6	57.6
4. กำหนดหาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว						
กำลังอัดประลัย (MPa)	โมเมนต์บิด $T = CdF_i = CdP$ (N-m)					
	0.05 f'_{co}			0.08 f'_{co}		
	3.2 mm	4.5 mm	6.0 mm	3.2 mm	4.5 mm	6.0 mm
18	59.5	59.5	59.5	95.3	95.3	95.3
25	82.7	82.7	82.7	132.3	132.3	132.3
32	105.8	105.8	105.8	169.4	169.4	169.4

ตารางที่ ค.7 ตารางสรุปผลโมเมนต์บิดที่นำไปบิดสลักเกลียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

1. หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต	
กำลังอัดประลัย	$0.05 f'_{co}$ (MPa)
18	0.9
25	1.25
32	1.6
2. จำนวนหาหน่วยแรงตามแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) ที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก	
กำลังอัดประลัย (MPa)	หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง $\sigma_1 = \frac{Pr}{t}$ (MPa)
18	15.0
25	20.8
32	26.7
3. จำนวนหาแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก	
กำลังอัดประลัย (MPa)	แรงดึงในปลอกเหล็ก $P = \sigma_1 A$ (kN)
18	50.6
25	70.3
32	90.0
4. จำนวนหาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว	
กำลังอัดประลัย (MPa)	โมเมนต์บิด $T = CdF_i = CdP$ (N-m)
18	148.8
25	206.7
32	264.6





ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Namvijitr, N., Seangatith, S., Thumrongvuth, J., and Sukprasert, S. (2010). **Behavior of Circular Steel Tubed Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets under Axial Compression.** The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010). pp 83-88, 4-6 March 2010.

ชวลีพร อวยยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ ศาสน์ สุขประเสริฐ. (2553). การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15th National Convention on Civil Engineering), หน้า 272, STR041.

นันทิกา นามวิจิตร สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ ศาสน์ สุขประเสริฐ (2554). พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. วารสารวิชาการ ม.อบ.. ฉบับที่ 1 ปีที่ 4 ประจำเดือนมกราคม-มิถุนายน 2554.

ชวลีพร อวยยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ ศาสน์ สุขประเสริฐ. (2554). พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (The 16th National Convention on Civil Engineering), หน้า 251, STR053.

Behaviors of Circular Steel Tubed Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets under Axial Compression

Nantika Namvijitr* Sittichai Seangatith⁺ Jaksada Thumrongvut** Sart Sukprasert**
School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima 30000
E-mail: nantika249@gmail.com^{*}, sittichai@sut.ac.th⁺, jaksada@g.sut.ac.th^{**}, sart@sut.ac.th^{**}

Abstract

This study reports the experimental results on the behaviors and modes of failure of the circular concrete specimens preconfined with steel jackets. A total of 30 specimens were tested in this study. The dimensions of the specimens were 150 mm in diameters and 300 mm in height. The main variables were the ultimate compressive strength of concrete, the thickness of steel jacket and the preconfining pressure. From the tests, it was found that the compressive strength and ductility of the tubed concrete specimens are increased significantly compared to the reference concrete specimens, depending on the variables used in this study. The tubed concrete specimens have a linear elastic behavior up to the ultimate compressive strength of the reference specimens or 50-70% of their first maximum compressive load. Then, the behavior of the specimens is nonlinear in the form of elastic-perfectly-plastic and strain softening with very large deformation before failure.

1. Introduction

A composite column is defined as a compression member which may either be a concrete encased steel column or a concrete filled steel tube (CFT) column. It is well known that the CFT has the following advantages over the conventional reinforced concrete column: (1) higher strength-to-weight ratio and higher rigidity, (2) higher ductility and toughness for resisting a reversal loads, and (3) saving in material and construction time [1].

In recent years, a new type of the composite column, called tubed column, has been increasingly used in the construction of buildings [2-4]. The term "tubed column" refers to the function of the tube as primarily transverse reinforcement for reinforced concrete (RC) columns and the composite action between the steel tube and concrete is expected only in the transverse direction. Thus, compared with the conventional CFT column, the tubed column is practically subjected to axially compressive load on the concrete core due to the connection between the beams and the tubed column.

In the past few years, a few studies have been carried out on the tubed columns. Tomii *et al.* [2] investigated the tubed RC column concept as a

method to prevent shear failure and to improve the ductility of short columns in RC frame structures. The steel tubes are used to transversely confine concrete and designed primarily as transverse reinforcement. The longitudinal main reinforcements are still needed for resisting the flexural stresses. The tubed RC column must be properly detailed the tube to minimize the direct transfer of the axial stresses into the tube. This can be done by building gaps between the tube and the beam or floor or footing at the ends of the column. Seangatith and Thumrongvut [5,6] reported the structural behaviors and modes of failure of square tubed concrete columns. A total of 33 specimens were tested under concentrically axial load applied directly to the concrete core. It was found that the tubed concrete columns have ductile-like behavior. They were failed in progressive mode of failure, which can be considered as localized failure, with a high axial ductility, compared to the reference columns. With the increasing of the ultimate compressive strength of the concrete and the wall thickness of the steel tube, the axial compressive strength of the columns increases. However, the E.I.T. 1008-38(4314) specification for composite column was inadequate to predict the strength of the tubed concrete columns. Also, no full confinement was developed in the tubed concrete columns used in these studies. The efficiency of the columns did not reach its highest point.

To enhance the efficiency of the tubed concrete columns, it was proposed that the column should have a circular cross-section and the concrete should be subjected to a preconfined pressure, applied to the column by a mechanical device. Thus, the aims of this experimental study are to report the behaviors and modes of failure of the circular concrete steel tubed specimens preconfined with steel jackets and to compare the compressive strength between the reference concrete specimens and concrete steel tube specimens with different preconfining pressure.

2. Test specimens and Test setup

In this study, a total of 30 specimens were tested. They were classified into 3 groups: Group 1: the reference concrete columns (no jacket), as shown in the Figure 1. Group 2: the concrete specimens with the steel jackets without the preconfining pressure,

N. Namvijitr et al. / TISD2010, Thailand, 4-6 March 2010

Group 3: the concrete specimens with steel jackets with preconfining pressure as shown in Figure 2. The main variables used in this study were the ultimate compressive strength of concrete (18, 25 MPa), the thickness of steel jacket (0, 3.2, 4.5 mm) and the confining pressure (0, 0.05 f'_{co} MPa). All of the specimens have the diameters of 150 mm and the height of 300 mm.

In this study, all circular steel jackets were cold-formed carbon steel. Three coupons were randomly cut from each type of the steel tubes and were tested according to ASTM E8. The concrete used was the commercially ready-mixed concrete produced by Concrete Products and Aggregate Co., Ltd. (CPAC) and was designed for at 28 days of approximately 18, and 25 MPa. Concrete was placed in three layers, and each layer was compacted by a vibrator. The averaged compressive strengths of each type of concrete were tested according to ASTM C39. The specimen numbers were identify in the form of A-B-C-D, where "A" represent to the type of specimens, "B" represent to the ultimate compressive strength of concrete, "C" refer to thickness of steel jackets, "D" refer to the confining pressure. For example, the specimen number SC-25-4.5-0.05 f'_{co} is the tubed concrete specimen, having f'_{co} = 25 MPa, t = 3.2 mm and the preconfining pressure = 0.05 f'_{co} . The preconfined concrete specimens were built by confining the concrete and the steel jacket with a mechanical device as shown in Figure 2 to the given lateral pressure.

Then, each parts of the steel jacket were welded together by a skilled welder. A summary of the specimens is presented in Table 1.



Figure 1. Concrete specimens in group 1 (Reference concrete specimens)



Figure 2. Concrete specimens in group 2 and 3

Table 1. The properties of specimens in this study.

Group	Specimen No.	B/t ratio	L/B ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_w =$ A_s / A_g (%)	Concrete		Steel	
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)
1	C18-0-0	-	-	-	-	17671	20.1	-	-
	C25-0-0	-	-	-	-	17671	28.6	-	-
2	SC-18-32-0.00 f'_{co}	46.9	2.0	-	8.02	17671	20.1	1540.1	312.1
	SC-25-32-0.00 f'_{co}	46.9	2.0	-	8.02	17671	20.1	1540.1	312.1
	SC-18-45-0.00 f'_{co}	33.3	2.0	-	11.00	17671	28.6	2184.2	321.6
	SC-25-45-0.00 f'_{co}	33.3	2.0	-	11.00	17671	28.6	2184.2	321.6
3	SC-18-32-0.05 f'_{co}	46.9	2.0	0.9	8.02	17671	20.1	1540.1	312.1
	SC-25-32-0.05 f'_{co}	46.9	2.0	1.25	8.02	17671	20.1	1540.1	312.1
	SC-18-45-0.05 f'_{co}	33.3	2.0	0.9	11.00	17671	28.6	2184.2	321.6
	SC-25-45-0.05 f'_{co}	33.3	2.0	1.25	11.00	17671	28.6	2184.2	321.6

Figure 3 shows the picture of the test setup. Specimens were placed in a 2000 kN SHIMADZU Universal Testing Machine. The axial compressive load was applied pass the top and bottom steel bearing plates directly to the concrete core of the tubed

concrete column. The steel bearing plates have the dimension of 140 mm in diameters and 50 mm in thickness. Two linear variable differential transducers (LVDTs) were used to monitor overall axial shortening of the concrete core and to ensure that a

uniform compression was imposed on the test specimens.



Figure 3. A picture of the test setup.

Before the beginning of each test, a preload of approximately 25% of the predicted axial compressive capacity of the specimens was applied to settle down the concrete core in order to reduce the friction between the steel bearing plates and the concrete core and to balance the uneven bed surfaces before subjecting to the applied loads. Then, the

specimen was unloaded to about 5 kN to seat it to the testing position. Finally, the specimens were loaded at a very slow rate such that the local lateral pultrusion of the steel tube wall could be carefully observed. A data acquisition system, as shown in the Figure 4, was used to collect the axial load and axial shortening of the concrete core. In addition, the local tube wall pultrusion, the axial compressive capacity and the modes of failure taken by the specimens were recorded.



Figure 4. Data Acquisition System (DAQ)

Table 2. Comparison of ultimate stress and their ultimate strain of the specimens and their behaviors.

Group	Specimen No.	$f_{co,ref}^t$ (MPa)	f_{cc}^t (MPa)	$f_{cc}^t / f_{co,ref}^t$	ϵ_u	$\epsilon_u / \epsilon_{u,ref}$	Nonlinear behaviors of Specimen
1.	C-18-0-0	20.1	-	-	0.0023	-	Concrete crushing
	C-25-0-0	28.6	-	-	0.0022	-	Concrete crushing
2.	SC-18-32-0.00 f_{co}^t	20.1	70.1	3.48	0.0250	10.87	Strain softening
	SC-25-32-0.00 f_{co}^t	28.6	78.0	2.73	0.0230	10.45	Strain softening
	SC-18-45-0.00 f_{co}^t	20.1	91.1	4.53	0.0390	16.95	Elastic-perfectly plastic
	SC-25-45-0.00 f_{co}^t	28.6	102.4	3.58	0.0250	11.36	Strain softening
3.	SC-18-32-0.05 f_{co}^t	20.1	78.1	3.88	0.0200	8.70	Strain softening
	SC-25-32-0.05 f_{co}^t	28.6	85.6	3.00	0.0190	8.63	Strain softening
	SC-18-45-0.05 f_{co}^t	20.1	99.6	4.95	0.0180	7.82	Strain softening
	SC-25-45-0.05 f_{co}^t	28.6	110.4	3.86	0.0220	10.00	Strain softening

3. Result

3.1 Specimen Behaviors

In this paper, the maximum axial shortening was limited to 20 mm without a complete failure, or equivalent to the compressive strain of 0.070 mm/mm, which is about 20 times larger than the strain at the ultimate compressive strength of the concrete ($\epsilon_{c,ub}$). Also, the ‘‘axial compressive capacity’’ of the specimens is defined as the maximum

axial load occurred within 8 mm of the axial shortening, which is about 10 times larger than the strain at $\epsilon_{c,ub}$.

Figure 5 and 6 show the stress-strain diagrams obtained from the tests for the specimens, having $f_{co}^t = 18$ and 25 MPa respectively. It was observed that the initial slope of the specimen group 2 (confined specimen without preconfining pressure) are similar to that of the reference concrete specimens. At this stage, the Poisson's ratio in concrete specimen is less

N. Namvijitr et al. / TISD2010, Thailand, 4-6 March 2010

than that of the steel jacket so that the confining effect can not be developed between the concrete core and steel jacket. The linear behavior of the specimens has been observed up to approximately 50% of their axial compressive capacity. After that, the behavior of the specimen group 2 is slowly becoming nonlinear. The concrete core has more lateral expansion, causing the interaction between concrete core and steel jacket with strain softening nonlinear behavior, excepting the specimen SC-18-45-0.00 f'_{co} . However, at the initial stage of group 3 (confined specimen with preconfining pressure), the specimens have been

confined by the preconfining pressure and the steel jacket gives the restraining effect to the concrete core. Hence, the initial slope of the specimen group 3 is larger than that of the specimen group 1 and 2. In addition, the linear behavior has been observed up to approximately 60-70% of their axial compressive capacity, which is higher than that of the specimen group 1 and 2. After that, the behavior of the specimen group 3 is slowly becoming nonlinear with strain softening, similar to those of the specimen group 2.

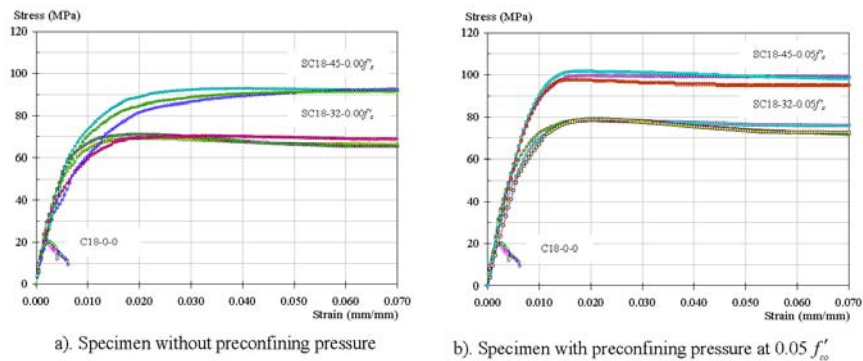


Figure 5. Stress-Strain diagram ($f'_{co} = 18$ MPa, $t = 3.2$ and 4.5 mm thickness of steel jacket)

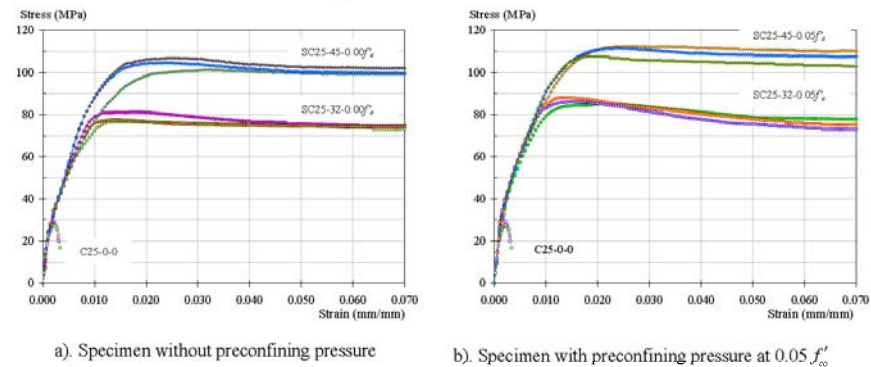


Figure 6. Stress-Strain diagram ($f'_{co} = 25$ MPa, $t = 3.2$ and 4.5 mm thickness of steel jacket)

3.2 Modes of failure

Figure 7 to 9 show the failure modes of the specimens used in this study. The failure mode of reference specimen group 1 is similar to a typical failure mode of concrete in the form of shear failure with about 50° shear plane as shown in Figure 7.

The failure mode of the specimen group 2 and 3 are similar. At failure, the steel tubes had a significant outward local protrusion of the steel tube walls in the

area near the mid-height as shown in Figure 8 and 9. This indicates that the concrete core in this location was restrained or contained by the steel jacket, in turn providing a larger axial deformability to the concrete core, compared to the reference concrete.

In this study, the specimens tend to exhibit the strain-softening behavior. This is because the steel tube section, at failure, has insufficient stiffness to prevent the local protrusion of the wall of the steel

jacket due to the lateral expansion of the concrete core. It should be also observed that the ultimate compressive strength of concrete and the preconfining pressure, used in this study, have a negligible effect on the nonlinear behavior of the specimens.

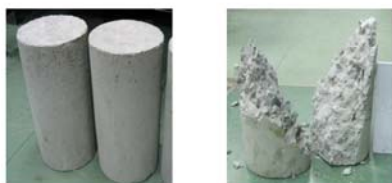


Figure 7. Failure mode of specimen group 1



Figure 8. Failure mode of specimen group 2



Figure 9. Failure mode of specimen group 3

3.3 Axial Compressive Capacity and the Corresponding Axial Shortening

Table 2 shows the comparisons of the obtained axial compressive capacity and the corresponding strain of the specimens group 1 to 3. Compared to the confined specimens with steel jacket, the axial compressive capacity and the corresponding axial shortening of the reference concrete specimens are significantly less than those of the confined specimens. This indicates that the steel jacket can increase not only the axial compressive capacity of the reference concrete specimens but the axial deformability or ductility as well.

Considering the axial compressive capacity of the specimen group 2 and group 3 with the same thickness of steel jacket and the same preconfining

pressure, it was found that the axial compressive capacity of the lower ultimate strength of concrete are less than that of the specimen with higher ultimate strength of concrete. In addition, it was found that the axial compressive capacity and the corresponding axial shortening of the confined specimens with preconfining pressure are higher than that of the reference concrete specimen and the confined specimen without preconfining pressure.

Finally, the preconfining pressure has negligible effect on the nonlinear behavior of the specimens. However, the thicker the steel jacket and the larger the preconfining pressure increase the axial compressive capacity of the specimens in the range of 2.73 to 4.53 for the specimen group 2 and 3.00 to 4.95 for the specimen group 3, comparing to the reference concrete specimens, respectively. Similarly, the corresponding axial shortening of the specimens were increased in the range of 10.45 to 16.95 for the specimen group 2 and 7.82 to 10.00 for the specimen group 3. Therefore, it may be primarily concluded that the concept of strengthening the concrete core with the steel jacket and the preconfining pressure can improve the axial capacity and ductility of the concrete core.

4. Conclusions

Based upon the results of this study, the following conclusions can be drawn:

1. The confined concrete specimens with preconfining pressure have a linear elastic behavior up to the ultimate compressive strength of reference specimen or approximately 50-70% of their compressive strength. Then, the behavior of the specimens is gradually becoming nonlinear with strain softening behavior and a larger axial deformation before failure.
2. The preconfining pressure has negligible effect on the nonlinear behavior of the specimen. However, the thicker the steel jacket and the larger the preconfining pressure produce a significant increase in the axial compressive capacity and ductility of the concrete core.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge all the supports of Suranaree University of Technology for this study, which is a part of the research project "Development of Steel-Tubed Reinforced Concrete Columns with Pre-confinement under Axially Compressive Loads".

Notation

The following symbols are used in this paper

- A_c = concrete cross-section area
- A_g = gross area of specimen
- A_s = steel jacket cross-section area
- B = diameter of concrete specimen

N. Namvijitr et al. / TISD2010, Thailand, 4-6 March 2010

- E_c = modulus of elasticity of concrete
 E_s = modulus of elasticity of steel jacket
 f_y = yielding stress of steel jacket
 f'_{co} = ultimate compressive strength of concrete
 f'_{cc} = maximum compressive strength of concrete
 (With steel jacket and confining pressure)
 L = length of specimen
 t = thickness of steel jacket
 ε_u = ultimate strain of concrete

References

- [1] Saw, H.S. and Liew, J.Y.R. 2000. Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 53: 121-147.
- [2] Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K. and Xiao, Y. 1985. Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. *Proceeding of International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures*, Harbin, China, 19-26.
- [3] Xiao, Y., He, W. and Choi, K. 2005. Confined concrete filled tubular columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 131(3): 488-497.
- [4] Han, L.H., Liu, W. and Yang, F.U. 2008. Behavior of thin walled steel tube confined concrete stub columns subjected to axial local compression. *Thin walled structure*, 46(2):155-164.
- [5] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. 2008. Investigation on square tubed concrete columns subjected to axial compressive loads. *KKU Engineering Journal*, 35(1): 81-99.
- [6] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. 2009. Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 16(3): 205-220.



การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก
 STUDY ON AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF SQUARE CONCRETE SPECIMENS
 PRECONFINED WITH STEEL JACKETS

ชุลีพร อู๋ยยืนยงค์ (Chuleporn Auyyuenyong)¹

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (Sittichai Seangatith)²

ศาสน์ สุขประเสริฐ (Sart Sukprasert)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (aom_ce_sut@hotmail.com)

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sittichai@sut.ac.th)

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sart@sut.ac.th)

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัดในแนวแกนของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก ตัวอย่างทดสอบจะถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก โดยการให้แรงกระทำทางด้านข้างเพื่อก่อให้เกิด pre-confining pressure แก่ตัวอย่างคอนกรีต โดยทดสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อคอนกรีตโดยตรง จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมรับแรงแบบเชิงเส้นในช่วงแรกสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงถึงประมาณ 50-70% ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้น มีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมาก โดยเกิดการหดตัวในแนวแกนและการขยายตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปลอกเหล็กที่โอบรัดเกิดการโก่งตัวออกด้านข้าง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นแล้ว ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนมีกำลังและความเหนียวในการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่สูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคอนกรีตอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และแรงที่ใช้กระทำทางด้านข้าง

ABSTRACT: This paper presents the experimental results on the compressive strength of the square concrete specimens preconfined with steel jackets. The concrete specimens were preconfined with the steel jackets on the sides of the specimens in order to produce the pre-confining pressure. Consequently, the axially compressive loads were applied directly to the concrete core. From the tests, it was found that the maximum compressive strength of the specimens was increased significantly up to 50-70% of their maximum load capacity. Then, the specimens have reached in the nonlinear state with a very large deformation before failure. The axial and lateral displacements of the columns were increased rapidly. The confined jackets were inflated until the failure of the columns. In addition, it was observed that the compressive strength and ductility of the preconfined concrete specimens are increased significantly compared to the reference concrete specimens, depending on the ultimate compressive strength of the concrete, the wall thickness of the steel jacket and the preconfining forces.

KEYWORDS: Axial compression, Concrete, Steel jacket, Preconfinement



1. บทนำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นโครงสร้างซึ่งเกิดจากการบรรจุคอนกรีตลงในท่อเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดกลมกลวงหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นแกนของเสา เป็นการทำงานร่วมกันของท่อเหล็กและคอนกรีตในลักษณะเสาคอมโพสิต (composite column) โดยท่อเหล็กอาจจะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่หลักในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกน (axial stress) ที่เกิดจากแรงกดอัดและโมเมนต์ดัด และ/หรืออาจจะถูกออกแบบรองรับแรงดัดเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ซึ่งทำให้เกิดการโอบรัด (confining effect) ต่อแกนคอนกรีตในขณะเดียวกันแกนคอนกรีตทำหน้าที่ในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วนและยังช่วยให้ท่อเหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) เพิ่มขึ้นซึ่งผลของ composite action ข้างต้นทำให้เสา CFT มีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็ก โครงสร้าง ทั้งในด้านความแกร่ง (stiffness) กำลัง (strength) ความเหนียว (ductility) และการดูดซับพลังงาน (energy absorption) เหมาะสมสำหรับ โครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหว และเป็นผลส่งต่อให้เสา CFT เป็นเสาที่ใช้ปริมาณเหล็กลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็ก โครงสร้าง และท่อเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยัน ซึ่งทำให้การก่อสร้างดำเนินการได้ง่ายและช่วยทำให้ราคาก่อสร้าง โครงสร้างลดลง ดังนั้นจากข้อดีข้างต้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเสา CFT จึงได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ดังตัวอย่างของงานวิจัยที่ถูกนำเสนอโดย Xiao *et. al.* ในปี 2005 [1]

เสาประเภทนี้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [5] และข้อกำหนดของ AISC/LRFD 1994 ใน Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD) ของ AISC [4] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้เสา CFT ถูกแบ่งตามลักษณะการออกแบบให้ท่อเหล็กรองรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบคือ 1) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยเสา CFT จะถูกก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยมีความสูงหลายชั้นหรือสูงตลอดความสูงของอาคาร ซึ่งเสา CFT แบบนี้จะรองรับแรงที่กระทำผ่านท่อเหล็กและ

คอนกรีตร่วมกัน และ 2) ทำหน้าที่หลักในเหล็กเสริมในแนวขวาง (transverse reinforcement) โดยมีรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อ การออกแบบ และการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแนวคิดของเสา CFT แบบที่สองได้ถูกนำเสนอ โดย Tomii *et. al.* ในปี 1985 [2] โดยมีวัตถุประสงค์หลักในท่อเหล็กรองรับแรงกระทำตามขวางและ โมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งเสาประเภทนี้มักถูกเรียกว่า “Tubed column” โดยท่อเหล็กจะถูกออกแบบไม่ให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรง โดยการเว้นช่องว่างระหว่างท่อเหล็กกับท้องถาดหรือฐานรากที่ปลายทั้งสองของเสา ดังนั้น ภายใต้แรงกระทำ ท่อเหล็กทำหน้าที่เป็นปลอก (jacket) โอบรัดต่อแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้สูงขึ้น Seangattith และ Thumrongvut ในปี 2009 [6] ได้นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเสนอผลการทดสอบถึงพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นทาง โครงสร้างของ Tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีต โดยตรง ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิงแล้ว Tubed column มีพฤติกรรมการรับแรงสูงสุดและความเหนียวเพิ่มขึ้นมาก โดยต้องพิจารณาถึงกำลังรับแรงสูงสุดของคอนกรีตและความหนาของปลอกเหล็ก

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่ารูปแบบการใช้ปลอกเหล็กในการห่อหุ้มเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่และปรับปรุงและ/หรือซ่อมแซม โครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว แต่การศึกษามีค่อนข้างน้อยและมุ่งประเด็นในกรณีการเสริมกำลังให้กับ โครงสร้างใหม่ในเสาหน้าตัดกลมและถูกกระทำเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบการให้แรงโอบรัดก่อน (pre-confinement) แก่เสาคอนกรีตโดยใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) แบบใหม่ในช่วงที่มีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคาร โดยไม่ต้องทำการรื้อถอนแล้วก่อสร้างขึ้นใหม่เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลัง ความเหนียวและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกให้แรงโอบรัดก่อนพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลของการรับแรงที่เกิดขึ้นของเสาคอนกรีตล้วน เสาคอนกรีตที่มีการให้หน่วยแรงและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (pre-confinement) ทางด้านข้าง นอกจากนั้นแล้วองค์ความรู้ที่ได้ยัง



สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคารต่างๆซึ่งมีความเสี่ยงต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยอีกด้วย

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

ในการศึกษานี้ การทดสอบสมบัติของวัสดุจะกระทำตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) โดยการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กตามมาตรฐาน ASTM E8

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยเป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตจำนวน 42 ตัวอย่าง โดยถูกจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม โดย กลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วนที่ไม่มีวัสดุโอบรัด จำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 1(a) ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (control columns), กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้ม

ด้วยปลอกเหล็กโดยที่ไม่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง จำนวน 18 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 1(b) และกลุ่มที่ 3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง จำนวน 18 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 1(c)

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm และมีรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 2 และตารางที่ 1 โดยชื่อตัวอย่างทดสอบที่ระบุถูกกำหนดในรูป WX-Y-Z ซึ่ง W หมายถึง ประเภทของตัวอย่างทดสอบ (CR หมายถึงตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ SR ก็คือตัวอย่างคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก), X หมายถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{co} = 18 และ 25 MPa), Y หมายถึงความหนาของปลอกเหล็ก (t = 3.2, 4.5 และ 6.0 mm.) และ Z หมายถึงหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (0 และ $0.05 f'_{co}$) และภาพที่ 3 แสดงลักษณะปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดประลัย (MPa)	ความหนาปลอกเหล็ก (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ในการโอบรัดก่อน (MPa)	จำนวน
1	CR18-0-0	18	-	-	3
	CR25-0-0	25	-	-	3
2	SR18-3.2-0 f'_{co}	18	3.2	0	3
	SR18-4.5-0 f'_{co}	18	4.5	0	3
	SR18-6.0-0 f'_{co}	18	6.0	0	3
	SR25-3.2-0 f'_{co}	25	3.2	0	3
	SR25-4.5-0 f'_{co}	25	4.5	0	3
	SR25-6.0-0 f'_{co}	25	6.0	0	3
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	18	3.2	$0.05 f'_{co}$	3
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	18	4.5	$0.05 f'_{co}$	3
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	18	6.0	$0.05 f'_{co}$	3
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	25	3.2	$0.05 f'_{co}$	3
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	25	4.5	$0.05 f'_{co}$	3
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	25	6.0	$0.05 f'_{co}$	3
รวมตัวอย่างทดสอบ					42



(a)

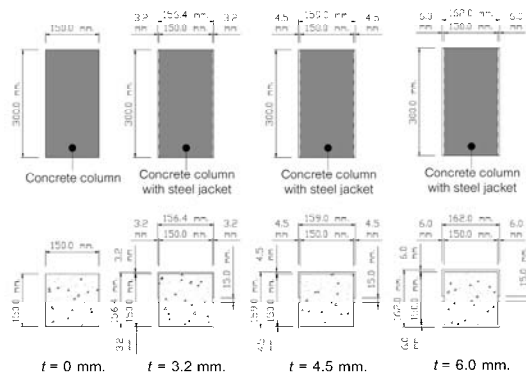


(b)



(c)

ภาพที่ 1 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย (a) กลุ่มที่ 1 (b) กลุ่มที่ 2 (c) กลุ่มที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 2 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

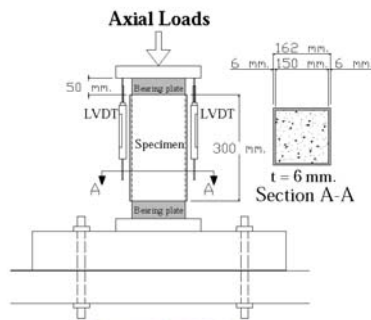
ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและสมบัติทางกลของวัสดุ

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	B/t ratio	L/B ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_w = A_s / A_c$ (%)	สมบัติของคอนกรีต		สมบัติของเหล็ก	
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)
1	CR18-0-0	-	-	-	-	22500	20.1	-	-
	CR25-0-0	-	-	-	-	22500	28.6	-	-
2	SR18-3.2-0	f'_{co} 46.9	2.0	-	8.02	22500	20.1	1961	312.1
	SR18-4.5-0	f'_{co} 33.3	2.0	-	11.00	22500	20.1	2781	321.6
	SR18-6.0-0	f'_{co} 25.0	2.0	-	14.27	22500	20.1	3744	325.0
	SR25-3.2-0	f'_{co} 46.9	2.0	-	8.02	22500	28.6	1961	312.1
	SR25-4.5-0	f'_{co} 33.3	2.0	-	11.00	22500	28.6	2781	321.6
	SR25-6.0-0	f'_{co} 25.0	2.0	-	14.27	22500	28.6	3744	325.0
3	SR18-3.2-0.05	f'_{co} 46.9	2.0	0.90	8.02	22500	20.1	1961	312.1
	SR18-4.5-0.05	f'_{co} 33.3	2.0	0.90	11.00	22500	20.1	2781	321.6
	SR18-6.0-0.05	f'_{co} 25.0	2.0	0.90	14.27	22500	20.1	3744	325.0
	SR25-3.2-0.05	f'_{co} 46.9	2.0	1.25	8.02	22500	28.6	1961	312.1
	SR25-4.5-0.05	f'_{co} 33.3	2.0	1.25	11.00	22500	28.6	2781	321.6
	SR25-6.0-0.05	f'_{co} 25.0	2.0	1.25	14.27	22500	28.6	3744	325.0

2.2 การทดสอบตัวอย่าง

ภาพที่ 4 แสดงแผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2000 kN โดยแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อตัวอย่างทดสอบที่ปลายผ่าน steel bearing plate ขนาด 140 x 140 mm หนา 50 mm ลงสู่คอนกรีตโดยตรง การหัดตัวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) จำนวน 2 ตัว ที่ติดตั้งที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่อง UTM

เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบจะถูก pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้าๆ โดยใช้ Data Acquisition System (DAQ) ดังแสดงในภาพที่ 5 เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 4 การติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 5 Data Acquisition System (DAQ)

3. ผลการทดสอบ

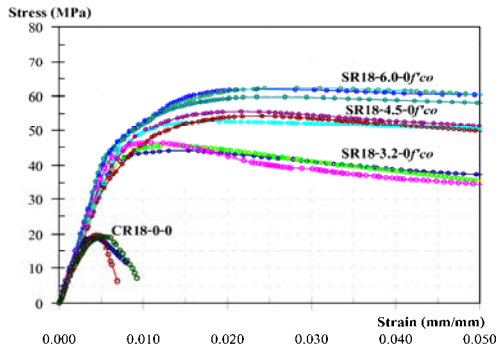
3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัด

ภาพที่ 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงและตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก โดยจัดกลุ่มตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ($f'_{co} = 18$ และ 25 MPa), ความหนาของเหล็ก ($t = 3.2, 4.5$ และ 6.0 mm) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (0 และ $0.05 f'_{co}$) และจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัว 15 mm หรือค่าความเครียด (strain) ในคอนกรีตที่ 0.050 mm/mm ซึ่งเป็นค่าความเครียด (strain) ที่สูงกว่า ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า

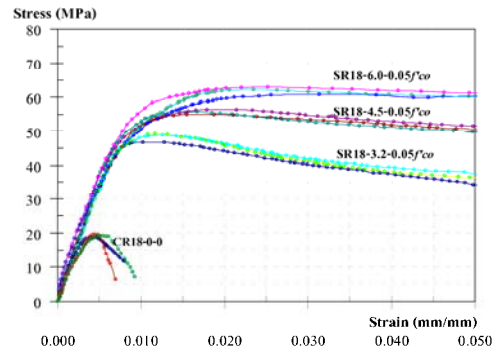
โดยตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ในช่วงแรกจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear elastic) จนถึงค่าของหน่วยแรงประมาณ 50%

ของหน่วยแรงอัดสูงสุดที่หาได้ในช่วงของการพิจารณาและในกลุ่มที่ 3 มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear elastic) จนถึงค่าของหน่วยแรงประมาณ $60-70\%$ ของหน่วยแรงอัดสูงสุด จากนั้นเมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนแกนคอนกรีตถูกแรงกระทำถึงจุดรับแรงสูงสุดแล้ว คอนกรีตจะเริ่มมีแตกร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้น (micro cracking) และมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) มากขึ้น และแกนกลางคอนกรีตเริ่มขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น โดยคอนกรีตจะถ่ายเทแรงสู่ปลอกเหล็ก เป็นผลทำให้คอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุเหนียว (ductile material) มากขึ้น โดยแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจะถูกรองรับโดยปลอกเหล็ก

นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่าปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) ขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{co}), ความหนาของปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยพบว่าตัวอย่างทดสอบเมื่อรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแข็งแรงลดลงหรือพฤติกรรมแบบ strain-softening ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผันของปลอกเหล็กไม่มีความแข็งแรงต่อการยึดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผันของปลอกเหล็กจะเกิดการโค้งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังอัดประลัยที่ $18, 25$ MPa และปลอกเหล็กที่มีความหนา $3.2, 4.5$ mm ทั้งหมด และความหนา 6.0 mm บางตัว ยกเว้น SR18-6.0-0 f'_{co} และ SR18-6.0-0.05 f'_{co} ซึ่งมีพฤติกรรมเมื่อรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว ตัวอย่างทดสอบมีความแข็งแรงประมาณศูนย์หรือพฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอ ผันของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มมีความแข็งแรงต่อการยึดในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผันของปลอกเหล็กจะเกิดการโค้งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อีกต่อเนื่อง

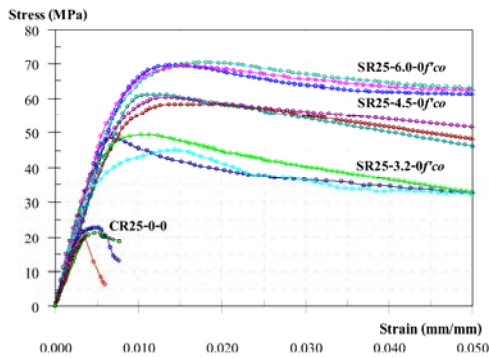


a.) Specimen without preconfining pressure

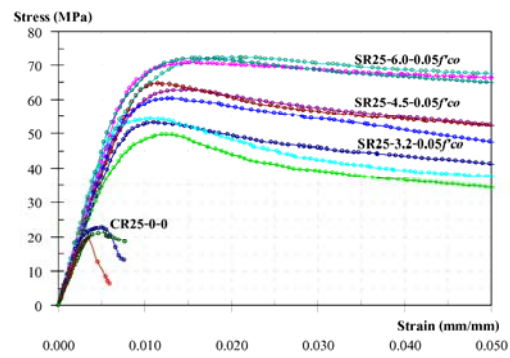


b.) Specimen with preconfining pressure at $0.05 f'_{cv}$

ภาพที่ 6 Stress-Strain diagram ($f'_{cv} = 18$ MPa, $t = 3.2$ mm, 4.5 mm and 6.0 mm thickness of steel jacket)



a.) Specimen without preconfining pressure



b.) Specimen with preconfining pressure at $0.05 f'_{cv}$

ภาพที่ 7 Stress-Strain diagram ($f'_{cv} = 25$ MPa, $t = 3.2$ mm, 4.5 mm and 6.0 mm thickness of steel jacket)

3.2 ลักษณะการวิบัติ

จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) เริ่มต้นจากคอนกรีตถูกกดอัดและแตกร้าวที่ผิวด้านบนและล่าง และเกิดการซุบตัวตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นตัวอย่างทดสอบเกิดการขยายตัวออกด้านข้างเนื่องจากผลของ Poisson's effect โดยเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณตำแหน่ง 100-150 mm ใกล้เคียงบริเวณที่เกิดกดอัดกระทำซึ่งก่อให้เกิดแรงดันออกกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กทางด้านข้างโดยการไปงอกของปลอกเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 8(a) และ 8(b) โดยลักษณะการวิบัตินี้แตกต่างจากการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) ที่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตอย่าง

รวดเร็วในแนวทแยงเมื่อแรงกดอัดมีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (abrupt failure) ดังแสดงในภาพที่ 8(c)



(a) (b) (c)

ภาพที่ 8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

- (a) หน้าที่การวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3
- (b) กลุ่มที่ 2 และ 3 (c) กลุ่มที่ 1



ตารางที่ 3 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	$f'_{co,ref}$ (MPa)	f'_{cc} (MPa)	$f'_{cc} / f'_{co,ref}$ (MPa)	$\epsilon_{u,ref}$	ϵ_u	$\epsilon_u / \epsilon_{u,ref}$	พฤติกรรมการรับแรง
1	CR18-0-0	19.29	-	-	0.0081	-	-	Concrete crushing
	CR25-0-0	21.27	-	-	0.0071	-	-	Concrete crushing
2	SR18-3.2-0 f'_{co}	19.29	45.29	2.35	0.0081	0.0612	7.56	Strain softening
	SR18-4.5-0 f'_{co}	19.29	54.23	2.81	0.0081	0.0654	8.07	Strain softening
	SR18-6.0-0 f'_{co}	19.29	61.31	3.18	0.0081	0.0870	10.74	Elastic-perfectly plastic
	SR25-3.2-0 f'_{co}	21.27	47.59	2.24	0.0071	0.0526	7.41	Strain softening
	SR25-4.5-0 f'_{co}	21.27	59.90	2.82	0.0071	0.0566	7.97	Strain softening
	SR25-6.0-0 f'_{co}	21.27	69.72	3.28	0.0071	0.0610	8.59	Strain softening
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	19.29	48.21	2.50	0.0081	0.0554	6.84	Strain softening
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	19.29	55.74	2.89	0.0081	0.0670	8.27	Strain softening
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	19.29	61.95	3.21	0.0081	0.0851	10.51	Elastic-perfectly plastic
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	21.27	52.33	2.46	0.0071	0.0548	7.72	Strain softening
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	21.27	62.61	2.94	0.0071	0.0613	8.63	Strain softening
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	21.27	71.71	3.37	0.0071	0.0572	8.06	Strain softening

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ โดยค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{co}) เป็นค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ในช่วงที่ตัวอย่างทดสอบมีการหดตัวในแนวแกนไม่เกิน 15 mm จากตารางที่ 3 และภาพที่ 6 และ 7 พบว่า

1. เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง (กลุ่มที่ 2) ที่ความหนาเท่ากัน พบว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบมีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต่ำ ($f'_{co} = 18\text{MPa}$) มีค่าอัตราส่วน $f'_{cc} / f'_{co,ref}$ อยู่ในช่วง 2.81-3.18 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่สูงกว่า ($f'_{co} = 25\text{MPa}$) ซึ่งอยู่ในช่วง 2.89-3.28 ยกเว้นปลอกเหล็กที่มีความหนา 3.2 mm พบว่าค่าอัตราส่วน $f'_{cc} / f'_{co,ref}$ มีค่าน้อยลงและเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีการให้แรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างไปที่ 0.05 เท่าของ f'_{co} (กลุ่มที่ 3) พบว่าที่ความหนาเท่ากัน พบว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบที่มีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต่ำ ($f'_{co} = 18\text{MPa}$) มีค่าอัตราส่วน $f'_{cc} / f'_{co,ref}$ อยู่ในช่วง 2.89-3.21 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่สูงกว่า ($f'_{co} = 25\text{MPa}$) ซึ่งอยู่ในช่วง 2.94-3.37 ยกเว้นปลอกเหล็กที่มีความหนา 3.2 mm พบว่าค่า

อัตราส่วน $f'_{cc} / f'_{co,ref}$ มีค่าน้อยลงเช่นกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะรับแรงดันจากการขยายตัวของคอนกรีต โดยอาศัยความแตกต่างต่อการค้ำของผนังปลอกในรูปของ plate ดังนั้นผนังปลอกเหล็กที่หนาจะมีความแข็งแรงต่อการค้ำมากกว่าผนังที่บาง

2. เมื่อพิจารณาตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง (กลุ่มที่ 2) กับกรณีให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างไปที่ 0.05 เท่าของ f'_{co} (กลุ่มที่ 3) พบว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่า f'_{co} ที่เท่ากันแล้ว อัตราส่วน $f'_{cc,0.05f'_{co}} / f'_{cc,0f'_{co}}$ เพิ่มขึ้นมากสุดในปลอกเหล็กที่มีความหนาน้อย (3.2 mm) และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากค่าของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างควรมีค่าที่สูงมากพอ โดยต้องพิจารณาถึงความหนาของปลอกเหล็กและคำนึงถึงความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมต่อของผนังในขั้นตอนของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง ที่จะช่วยให้ปลอกเหล็กรองรับแรงดันเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้น



ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างกับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างไปที่ 0.05 เท่าของ f'_{cc}

ตัวอย่าง	f'_{cc}		$\frac{f'_{cc,0.05} f'_{cc}}{f'_{cc,0} f'_{cc}}$	%
	$f'_{cc,0} f'_{cc}$	$f'_{cc,0.05} f'_{cc}$		
SR18-3.2	45.29	48.21	1.06	6
SR18-4.5	54.23	55.74	1.03	3
SR18-6.0	61.31	61.95	1.01	1
SR25-3.2	47.59	52.33	1.10	10
SR25-4.5	59.90	62.61	1.05	5
SR25-6.0	69.72	71.71	1.03	3

5. บทสรุป

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก โดยการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างพบว่า

- พฤติกรรมในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบพบว่าจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าที่มีกำลังอัด 50-70% ของกำลังอัดประลัยสูงสุดและจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น โดยพบพฤติกรรมอยู่สองลักษณะคือ Strain-softening และ Elastic-perfectly plastic ซึ่งพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในช่วงนี้จะขึ้นกับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{cc}), ความหนาของปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ และตัวอย่างทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนเกิดการวิบัติ
- สำหรับการวิบัติจะมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป การวิบัติเกิดขึ้นโดยการขยายตัวของด้านข้างที่บริเวณด้านบนและล่าง เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น ปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติ ทำให้แกนคอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของเสาบริเวณดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ
- ผลของการโอบรัดด้วยปลอกเหล็กในกรณีการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างที่ 0.05 f'_{cc} พบว่าความสามารถในการรับแรงกคอัดในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้หน่วยแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิด

confining pressure ของเสาน้ำัดสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง ทำให้การให้หน่วยแรงด้านข้างมีผลน้อยต่อการโอบรัด และมีผลน้อยลงตามความหนาของปลอกเหล็ก แต่ทั้งนี้ก็เป็นการบ่งบอกในเบื้องต้นว่า การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้วยปลอกเหล็ก โดยการให้แรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง มีผลต่อการโอบรัด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน" ทั้งสถานที่ดำเนินการศึกษาและเครื่องมือในการทดสอบ

บรรณานุกรม

- [1] Xiao, Y., Ilc, W., and Choi, K. (2005). Confined concrete filled tubular columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 131(3):488-497.
- [2] Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K., and Xiao, Y. (1985). Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. *Proceeding of International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures*. Harbin, China, 19-26.
- [3] Johansson, M. (2000). *Structural Behavior of Circular Steel-Concrete Composite Columns*. Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering: Chalmers University of Technology.
- [4] American Institute of Steel Construction (1994). *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD)*. 2nd Ed., Chicago.
- [5] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). *มาตรฐานการสำหรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008.38*. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.
- [6] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2009). Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 16(3): 205-220.

**พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลม
ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก**
**Behaviors and Compressive Strength of Circular Concrete Specimens
Preconfined with Steel Jackets**

นันทิกา นามวิจิตร สิทธิชัย แสงอาทิตย์* จักษดา ชำรงวุฒิ ศาสน์ สุขประเสริฐ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Nantika Namvijitr Sittichai Seangatith* Jaksada Thumrongvut Sart Sukprasert

School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Muang, Nakhon Ratchasima 30000
Tel : 0-4422-4420 E-mail: sitchai@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบในการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 90 ตัวอย่าง และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง จากการทดสอบพบว่า กำลังอัดสูงสุด และความเหนียวของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิงซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรข้างต้น ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นในช่วงแรกถึงประมาณ 50-70% ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบค่อยเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมากก่อนการวิบัติ โดยพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นถูกแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ strain hardening elastic perfectly plastic และ strain softening จากการทดสอบพบว่าความหนาปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ในการพัฒนา Tubed column คือความหนาปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$

คำหลัก แรงกดอัดในแนวแกน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หน่วยแรงโอบรัดก่อน เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต ปลอกเหล็ก

Abstract

This paper presents the experimental results on the compressive behaviors and modes of failure of circular concrete specimens preconfined with steel jackets. A total of 90 specimens were tested in this study. The specimen's dimension were 150 mm in diameters and 300 mm in height. There are 3 main variables i.e. the ultimate compressive strength of concrete, the thickness of steel jacket and the preconfining pressure considered in this study. From the study, it was found that the ultimate compressive strength and ductility of the Tubed concrete specimens are increased significantly compared to the control specimens, depending on the ultimate compressive strength of the concrete, the wall thickness of the steel jacket and the preconfining pressure. Also, the Tubed concrete specimens have

a linear elastic behavior up to 50-70% of their maximum compressive strength. Then, the behavior of the concrete specimen is nonlinear with a very large deformation before failure. The nonlinear behaviors can be classified into 3 types: strain hardening, elastic-perfectly plastic and strain softening. For the result, it was found that thickness of steel jacket was 4.5 mm and the preconfining pressure was $0.05f'_{co}$ were optimum for development of Tubed column.

Keywords: Axial compression, concrete specimen, preconfinement, tubed column, steel jacket

1. บทนำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tubed column) เป็นรูปแบบหนึ่งของเสาคอมโพสิตหรือเสาเชิงประกอบ (composite) ที่ได้จากการนำวัสดุมาใช้ในรูปแบบใหม่เพื่อก่อให้เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดจากวัสดุพื้นฐานได้แก่คอนกรีตและปลอกเหล็ก ในปัจจุบันเสาดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นทั้งในสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และ จีน ทั้งในการเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมโครงสร้างเดิม โดยเสาดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นทั้ง ด้านความแกร่ง กำลัง ความเหนียว และการดูดซับพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง [1,2]

ในปัจจุบัน การออกแบบเสาประเภทนี้ทำได้ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น Manual of steel construction: Load and Resistance Factor Design (AISC/LRFD) [3] และมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2538 [4] โดยถูกจำแนกได้ 2 ประเภทได้แก่ 1) CFT column เสาประเภทนี้จะถูกออกแบบให้ท่อปลอกเหล็กรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรงร่วมกับคอนกรีต ซึ่งเสาดังกล่าวจะให้ความสูงหลายชั้นต่อเนื่องกันหรือสูงตลอดความสูงของอาคาร 2) Tubed column ท่อปลอกเหล็กของเสาประเภทนี้จะไม่ถูกออกแบบรับหน่วยแรงในแนวแกน แต่จะถูกออกแบบให้ท่อเหล็กเป็นเหล็กเสริมเพื่อรองรับแรงกระทำในแนวขวาง

แนวคิดของเสา CFT ประเภทที่ 2 หรือ Tubed column ได้นำเสนอโดย Tomii [5] โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ปลอกเหล็กรองรับแรงกระทำทางขวางและโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว โดยคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุในการรับแรงกระทำโดยตรงและปลอกเหล็กจะไม่ได้รับแรงกระทำโดยตรงดังนั้นปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ห่อหุ้มแกนคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ และช่วยเพิ่มความสามารถของกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนให้สูงขึ้นและทำให้ความเหนียวของเสาดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้แนวคิดนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังในแก่โครงสร้างอีกด้วย สิทธิชัยและจักษดา [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column หน้าที่ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษา คือ กำลังอัดประลัย และ ความหนาของท่อเหล็กจากการศึกษาพบว่าเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยที่สูงขึ้นทำให้กำลังของ Tubed column มีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาความหนาของปลอกเหล็กพบว่าความหนาปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร (ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38) ให้กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed column สูงเพิ่มขึ้นมากกว่าปลอกเหล็กขนาด 3.2 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กดังกล่าวไม่ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท.) พร้อมทั้งมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกันและเมื่อเปรียบเทียบกับสมการการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. ไม่ควรนำกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กมาใช้เนื่องจากทำให้สมการการออกแบบดังกล่าวมีค่าสูงเกินกว่ากำลังของเสาที่ใช้ในการศึกษา (overestimate) ดังนั้นการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. ควรได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมในการออกแบบ Tubed column

จากการศึกษาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีต [7] พบว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างในรูปแบบ active confinement พบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีหน่วยแรง ความเครียดและความแกร่งสูงเพิ่มขึ้นจากเดิม นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการให้หน่วยแรงโอบรัดแบบ passive confinement โดยตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วย continuous steel spiral พบว่าถ้าระยะห่างระหว่าง spiral มีค่าน้อยๆ จะทำให้หน่วยแรงในแนวแกนและความเครียดมีค่าสูงขึ้นซึ่งจากการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างแบบ active confinement และ passive confinement มีผลการ

ทดสอบในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างคอนกรีตจะมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากก่อนการวิบัติและการวิบัติจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป และ Richart และคณะ [7] ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังการกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างดังสมการ

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1 \quad (1)$$

เมื่อ f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันรอบข้าง

f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง

f_1 คือ ความดันรัดรอบ (confining pressure)

k_1 คือ confining effectiveness coefficient มีค่าเท่ากับ 4.1 สำหรับคอนกรีตกำลังปกติ และ 2.0 สำหรับคอนกรีตกำลังสูง

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column นั้นยังมีไม่มากนัก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการรับแรงกดอัดของเสาตั้งกล่าวให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างให้แก่ตัวอย่างทดสอบแบบ active โดยตรงแก่ปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตโดยใช้ระบบการอัดแรงทางด้านข้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังการรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อเป็นแนวทางในการเสริมกำลังอีกรูปแบบหนึ่งให้กับ Tubed column โดยตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วยกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

ปลอกเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น cold-formed steel carbon ที่ได้จากการพับแผ่นเหล็กให้มีหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมและคอนกรีตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ผลิตโดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุถูกกระทำตามมาตรฐานของ ASTM โดยการทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบเหล็กและ stainless steel ภายใต้แรงดึงตามมาตรฐาน

ASTM E8 จากตารางที่ 1 แสดงสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบมีรูปร่างทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โดยมีตัวแปรหลัก 3 ตัวแปร ได้แก่ กำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต (18, 25 และ 32 MPa ที่อายุ 28 วัน) ความหนาของปลอกเหล็ก (3.2, 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ให้แก่ตัวอย่างทดสอบ ($0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$) ซึ่งสามารถจำแนกตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม สำหรับกลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างทดสอบอ้างอิง กลุ่มที่ 2 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กไม่มีแรงโอบรัดทางด้านข้าง กลุ่มที่ 3 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$ และกลุ่มที่ 4 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

ชื่อของตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป AB-C-D โดยที่อักษร A หมายถึงชนิดของตัวอย่างทดสอบ อักษร B หมายถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อักษร C หมายถึงความหนาของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ และอักษร D หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดก่อน ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทดสอบ CS25-45-0.05 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลมรูปทรงกระบอก ทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย $f'_{co} = 25$ MPa ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร และถูกกระทำโดยหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างขนาด $0.05 f'_{co}$ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำโดยหน่วยแรงโอบรัดก่อนโดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อหน่วยแรง

มีค่าตามที่ต้องการแล้ว ปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบจะถูกเชื่อมติดกันโดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญ



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะการตัว (LVDT) กับตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 อุปกรณ์ Data acquisition system (DAQ)

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยแรงกดอัดในแนวแกนจะกระทำผ่าน bearing plate ซึ่งมีความหนา 50 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร กระทำโดยตรงสู่แกนคอนกรีต และตัวอย่างทดสอบจะถูก pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตและ unloading เพื่อลดแรงเสียดทาน

ระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงอัดในแนวแกนอย่างช้าๆ จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยระยะการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดโดยใช้ linear variable differential transducers (LVDT) และข้อมูลต่างๆ จะถูกจัดเก็บแบบ real time ในช่วงทดสอบ โดยใช้ data acquisition system (DAQ) ดังแสดงในรูปที่ 4

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษาได้จำกัดการแสดงผลการทดสอบที่ค่าระยะการหดตัว 20 มิลลิเมตร หรือเทียบเท่าค่าความเครียด 0.070 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าสูง และได้นิยามค่า f'_{max} เป็นค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ และจำกัดการทดสอบไว้ที่ระยะการหดตัวไม่เกิน 40 มิลลิเมตร

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดดังรูปที่ 5-7 พบว่า พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะถูกแบ่งออกได้ 2 ช่วงคือ ช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรง และช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยในช่วงแรกเมื่อพิจารณาตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง) พบว่า กราฟในช่วงนี้มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยจะเป็นเส้นตรงถึงประมาณ 50-60% ของหน่วยแรงสูงสุด เนื่องจากเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำ แกนคอนกรีตจะเป็นวัสดุหลักในการรับแรงและจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างอันเนื่องมาจาก Poisson's ratio และเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ Poisson's ratio ต่ำกว่าเหล็ก ดังนั้นการเกิด confining effect ระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กจะมีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่า พฤติกรรมในช่วงแรกของตัวอย่างทดสอบจะมีความชันสูงมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่มนี้มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5-7 เมื่อ

พิจารณากำลังอัดประลัยคอนกรีตและความหนาปลอกเหล็กที่เท่ากัน พบว่าค่าความแกร่งหรือค่าความชันของตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยที่เท่ากันและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่เท่ากัน ค่าความแกร่งของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาปลอกเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้นโดยที่ความชันของตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ และตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4 นี้จะมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงมีค่าประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งสูงกว่าในกรณีของกลุ่มที่ 1 และ 2 เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างแก่ตัวอย่างให้สูงขึ้นทำให้พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าความชันของกราฟจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวในอัตราที่เร็วขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านข้างและแรงดันทางด้านขวางกระทำดังกล่มต่อผนังของปลอกเหล็กทำให้เกิดการรับแรงกระทำร่วมกันระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง โดยปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ช่วยจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าว เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนได้สูงขึ้นก่อนการวิบัติ จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5-7 และตารางที่ 2

แบบที่ 1 พฤติกรรมแบบ strain hardening เกิดขึ้นจากการที่ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำในแนวแกนได้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนาสูง (6.0 มิลลิเมตร) เนื่องจากจากปลอกเหล็กมีความแกร่งมากเพียงพอ สามารถจำกัดการขยายตัวทางด้านของแกนคอนกรีตหลังจากรับกระทำได้เป็นอย่างดี โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ CS18-60-0

แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่ง โดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์

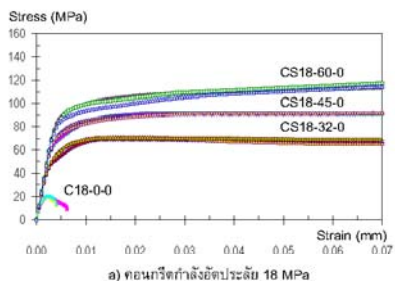
เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแกร่งต้านทานขยายตัวทางด้านของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กำลังอัดประลัย โดยมีปลอกเหล็กขนาดความหนา 4.5 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาปานกลางและความหนาสูง) CS18-45-0, CS18-45-0.05, CS18-45-0.08, CS18-60-0.05, CS18-60-0.08, CS25-45-0 CS25-45-0.05 CS25-45-0.08, CS25-60-0, CS25-60-0.05, CS25-60-0.08, CS32-45-0, CS32-45-0.05, CS32-45-0.08, CS32-60-0, CS32-60-0.05 และ CS32-60-0.08

แบบที่ 3 พฤติกรรมแบบ strain softening โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาน้อย) ดังต่อไปนี้ CS18-32-0, CS18-32-0.05, CS18-32-0.08, CS25-32-0, CS25-32-0.05, CS25-32-0.08, CS32-32-0, CS32-32-0.05 และ CS32-32-0.08 เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแกร่งไม่เพียงพอที่จะจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต ดังนั้นหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดสูงสุด จึงไม่สามารถต้านทานแรงได้อีก และเกิดการไปออกทางด้านข้างที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร โดยการไปออกทางด้านข้างเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางสูงของตัวอย่างทดสอบ ดังในรูปที่ 8-10

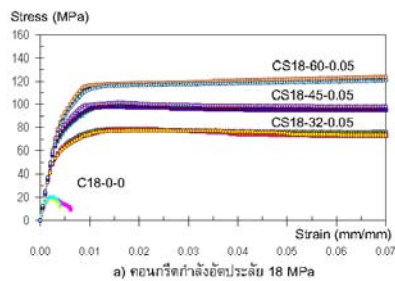
โดยสรุปพบว่า การให้แรงโอบรัดทางด้านข้างต่อตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น แต่ความหนาของปลอกเหล็กจะมีผลทำให้พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น โดยตัวอย่างทดสอบที่มีปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร จะมีพฤติกรรมแบบ strain hardening และ elastic-perfectly plastic ซึ่งเหมาะสมนำไปใช้งาน เพราะตัวอย่างทดสอบมีสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ

3.2 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

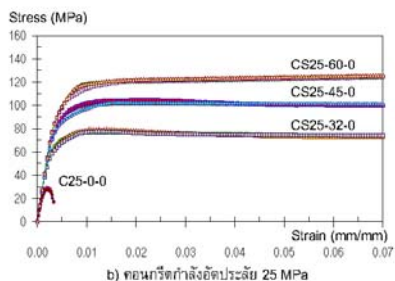
จากการทดสอบลักษณะและการวิบัติของตัวอย่างทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ ตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) และตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง (กลุ่มที่ 2-4)



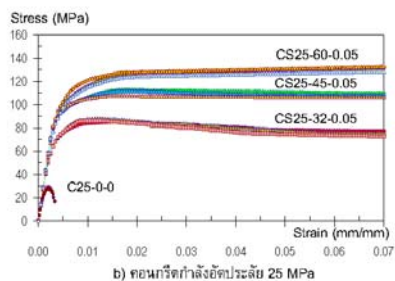
a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



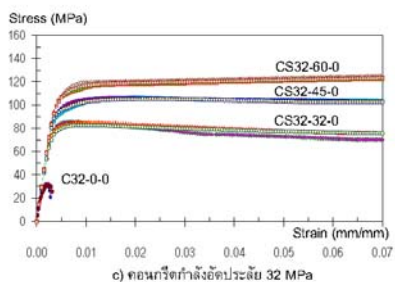
a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



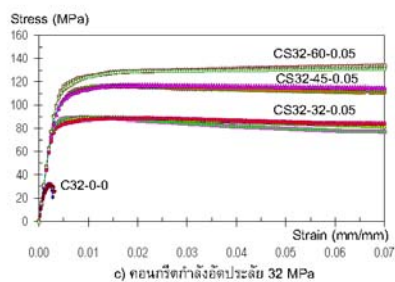
b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa



b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa



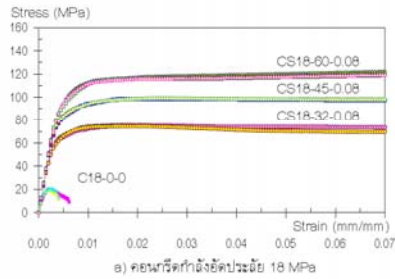
c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa



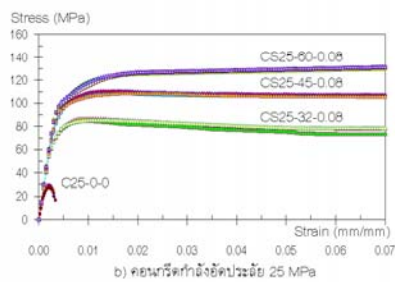
c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงบิดทางดันท่าง (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)

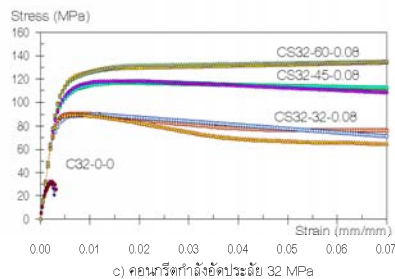
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ มีแรงบิดทางดันท่าง 0.05 f'_{co} (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1



รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2



รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเคียวของ
ตัวอย่างทดสอบ มีแรงไอบรหดด้านข้าง $0.08 f'_{\infty}$
(ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)

การวิบัติของตัวอย่างอ้างอิง(กลุ่มที่ 1) มีลักษณะคล้ายกับการวิบัติคอนกรีตกำลังอัดปกติทั่วไป ซึ่งเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงกดอัดร่วมกัน โดยมีรอยแตกทำมุมประมาณ 50 องศา กับแกนของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 8

สำหรับการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน โดยเกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีตซึ่งดันผนังปลอกเหล็กให้เกิดการโป่งตัวออกทางด้านข้างโดย เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

โดยสรุปพบว่า ตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2-4 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติและมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง และตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา

4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร เกิดการโป่งตัวทางด้านข้างน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กดังกล่าวมีความแข็งแรงเพียงพอในการจำกัดการขยายตัวของแกนคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเพียงพอตามมาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของ ว.ส.ท. และ AISC/LRFD โดยที่ความหนาปลอกเหล็กทั้ง 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร

3.3 หน่วยแรงกอดัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

จาก column ที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 2 ได้แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} โดยเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนที่เท่ากัน พบว่า ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 3.2 มิลลิเมตร จะมีค่าอัตราส่วนของกำลังที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 2.48-3.37 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ในช่วง 3.03-4.25 และ 3.41-4.95 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความหนาและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากัน พบว่า อัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากได้ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างแก่ตัวอย่างทดสอบทำให้ปลอกเหล็กชิดกับแกนคอนกรีตมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง ดังนั้นจึงเกิดการโอบรัดระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเริ่มรับแรงกระทำ และเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำจึงสามารถรับแรงกอดัดในแนวแกนสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เท่ากัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} จากความหนา 3.2 มิลลิเมตร ไปความหนา 4.5 มิลลิเมตร มีการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45-90% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรไปยัง 6.0 มิลลิเมตร มีการเพิ่มขึ้นค่าในช่วง 21-82%

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงทางด้านและตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ f'_{max} / f'_{co} จากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดที่ $0.05 f'_{co}$ มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 3-42% ซึ่งมีค่าสูงกว่า

อัตราการเพิ่มขึ้นของ f'_{max} / f'_{co} จากตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$ ไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$ มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6-13%

โดยสรุปพบว่า ปลอกเหล็กที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และตัวอย่างทดสอบจะมีความสามารถรับแรงกระทำลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยที่สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตกำลังอัดประลัยค่าสูงมีค่า poisson's ratio ต่ำ ทำให้การกระจายแรงจากแกนคอนกรีตไปปลอกเหล็กมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตกำลังอัดประลัยค่าน้อย นอกจากนั้นการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างจากการไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังมีการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างเพิ่มขึ้นเป็น $0.05 f'_{co}$ นั้นทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้น มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้นจาก $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ ซึ่งการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ นั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะช่วยให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้น ยังช่วงทำให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

จากรูปที่ 11 และตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ($f'_{max} / f'_{max,0} f'_{co}$) และอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยของคอนกรีตและความหนาที่เท่ากันพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$ มีแนวโน้มสูงกว่าอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$ และอัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 11a-11c

เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน พบว่าอย่างตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตร มีแนวโน้มของอัตราส่วนกำลังดังก้าวดีกว่าตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 และ 6.0 มิลลิเมตร และอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	B/t ratio	Confining pressure (MPa)	$\rho_{sc} =$ A_s/A_g (%)	สมบัติของคอนกรีต			สมบัติของเหล็ก		
					A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1	C18-0-0	-	-	-	17671	19.9	20.4	-	-	-
	C25-0-0	-	-	-	17671	26.7	24.2	-	-	-
	C32-0-0	-	-	-	17671	31.9	27.5	-	-	-
2	CS18-32-0	46.9	-	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0	46.9	-	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0	46.9	-	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0	33.3	-	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0	33.3	-	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0	33.3	-	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0	25.0	-	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0	25.0	-	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
3	CS18-32-0.05	46.9	0.90	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0.05	46.9	1.25	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0.05	46.9	1.60	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0.05	33.3	0.90	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0.05	33.3	1.25	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0.05	33.3	1.60	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0.05	25.0	0.90	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0.05	25.0	1.25	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
4	CS18-32-0.08	46.9	1.44	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0.08	46.9	2.00	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0.08	46.9	2.56	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0.08	33.3	1.44	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0.08	33.3	2.00	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0.08	33.3	2.56	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0.08	25.0	1.44	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0.08	25.0	2.00	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
CS32-60-0.08	25.0	2.56	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5	

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ				ค่าความแกร่ง (GPa)	พฤติกรรม การรับแรง
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (% ϵ)	ϵ'_{u}		
1	C18-0-0	19.9	-	0.22	-	-	crushing
	C25-0-0	26.7	-	0.21	-	-	crushing
	C32-0-0	31.9	-	0.21	-	-	crushing
2	CS18-32-0	58.4	2.93	0.44	2.00	21.5	แบบที่ 3
	CS25-32-0	69.2	2.60	0.45	2.14	25.4	แบบที่ 3
	CS32-32-0	82.2	2.58	0.48	2.29	27.9	แบบที่ 3
	CS18-45-0	74.0	3.72	0.51	2.32	22.6	แบบที่ 2
	CS25-45-0	86.1	3.22	0.49	2.33	26.5	แบบที่ 3
	CS32-45-0	96.7	3.03	0.51	2.43	28.9	แบบที่ 3
	CS18-60-0	90.3	4.54	0.56	2.55	23.8	แบบที่ 1
	CS25-60-0	100.9	3.78	0.54	2.57	27.5	แบบที่ 1
CS32-60-0	108.7	3.41	0.53	2.52	29.7	แบบที่ 1	
3	CS18-32-0.05	64.4	3.24	0.50	2.27	22.7	แบบที่ 3
	CS25-32-0.05	74.1	2.82	0.48	2.29	27.0	แบบที่ 3
	CS32-32-0.05	85.6	2.68	0.49	2.33	29.6	แบบที่ 3
	CS18-45-0.05	83.4	4.14	0.55	2.50	23.9	แบบที่ 3
	CS25-45-0.05	96.8	3.60	0.53	2.52	27.9	แบบที่ 3
	CS32-45-0.05	104.8	3.29	0.53	2.52	30.4	แบบที่ 3
	CS18-60-0.05	97.1	4.88	0.58	2.64	24.8	แบบที่ 1
	CS25-60-0.05	104.5	3.81	0.53	2.52	29.3	แบบที่ 1
CS32-60-0.05	115.6	3.62	0.54	2.57	31.3	แบบที่ 1	
4	CS18-32-0.08	67.0	3.37	0.51	2.32	23.1	แบบที่ 3
	CS25-32-0.08	76.5	2.94	0.48	2.29	27.1	แบบที่ 3
	CS32-32-0.08	88.4	2.77	0.49	2.33	30.6	แบบที่ 3
	CS18-45-0.08	85.6	4.25	0.54	2.45	24.8	แบบที่ 2
	CS25-45-0.08	98.4	3.65	0.52	2.48	28.5	แบบที่ 2
	CS32-45-0.08	107.0	3.35	0.53	2.52	31.6	แบบที่ 3
	CS18-60-0.08	98.4	4.94	0.56	2.55	25.7	แบบที่ 1
	CS25-60-0.08	106.6	3.87	0.53	2.52	30.1	แบบที่ 1
CS32-60-0.08	117.5	3.68	0.55	2.62	32.0	แบบที่ 1	

หมายเหตุ: พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้น

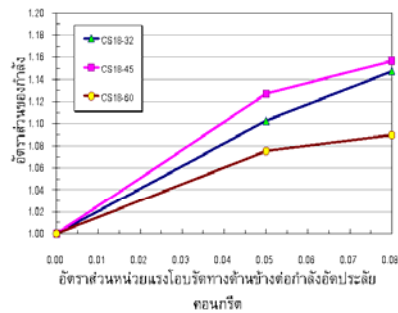
แบบที่ 1 คือ พฤติกรรมแบบ Strain hardening

แบบที่ 2 คือ พฤติกรรมแบบ Elastic perfectly plastic

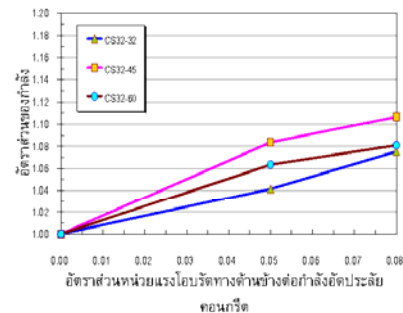
แบบที่ 3 คือ พฤติกรรมแบบ Strain softening

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโบริคทางด้านข้างกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโบริคทางด้านข้าง

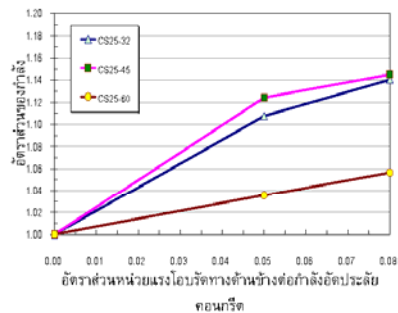
ตัวอย่างทดสอบ	f'_{max}			$\frac{f'_{max,0.05 f'_{co}}}{f'_{max,0 f'_{co}}}$	$\frac{f'_{max,0.08 f'_{co}}}{f'_{max,0 f'_{co}}}$
	$f'_{max,0 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{max,0.05 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{max,0.08 f'_{co}}$ (MPa)		
CS18-32	58.4	64.4	67.0	1.10	1.15
CS25-32	69.2	74.1	76.5	1.07	1.10
CS32-32	82.2	85.6	88.4	1.04	1.08
CS18-45	74.0	83.4	85.6	1.13	1.16
CS25-45	86.1	96.8	98.4	1.12	1.14
CS32-45	96.7	104.8	107.0	1.08	1.11
CS18-60	90.3	97.1	98.4	1.08	1.09
CS25-60	100.9	104.5	106.6	1.04	1.06
CS32-60	108.7	115.6	117.5	1.06	1.08



a) คอนกรีตก้ำกึ่งอัตราประลัย 18 MPa



c) คอนกรีตก้ำกึ่งอัตราประลัย 32 MPa



b) คอนกรีตก้ำกึ่งอัตราประลัย 25 MPa

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของก้ำกึ่งของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโบริคเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโบริคและอัตราส่วนของหน่วยแรงโบริคทางด้านข้างต่อก้ำกึ่งอัตราประลัยของคอนกรีต

3.4 ผลของหน่วยแรงโบริคทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

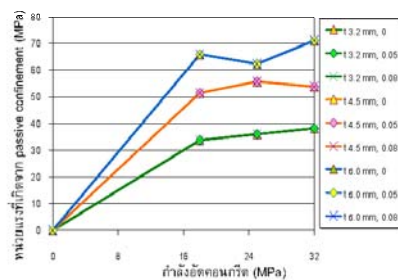
จากสมการทำนายก้ำกึ่งแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง ที่ถูกนำเสนอโดย Richart และคณะ. ดังนี้

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$$

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลของการเพิ่มหน่วยแรงโบริคทางด้านข้างให้แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4 จากค่า f'_{max} ที่ได้จากการทดสอบ

นั้นเกิดจากผลรวมของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและผลของ passive confinement และ active confinement ซึ่งจะมีค่าอยู่ในรูปของ $k_c f_c$ ดังสมการข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของ passive confinement จะขึ้นอยู่กับความแกร่งของปลอกเหล็กที่นำมาห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ และผลของ active confinement จะเกิดจากการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตคอนกรีต $f'_{max,conc}$ คือหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กหักออกจากค่า f'_{max} ดังแสดงในตารางที่ 4

นิยามให้ $f'_{max,pass}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement สามารถคำนวณได้จากสมการ $f'_{max,pass} = 2\sigma_j t / D$ โดยที่ σ_j คือ hoop stress ของปลอกเหล็ก ในงานวิจัยใช้ค่าเท่ากับ f_y ของปลอกเหล็ก D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ และ t คือ ความหนาของปลอกเหล็ก



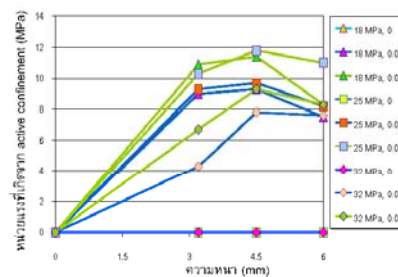
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement

และนิยามให้ $f'_{max,ac}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement สามารถคำนวณได้จากสมการ $f'_{max,ac} = f'_{max,conc} - f'_{co} - f'_{max,pass}$ ดังแสดงในตารางที่ 4

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบกับค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดจากผล passive confinement และ เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากันพบว่า ค่าหน่วยแรง

ดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความหนาเท่ากัน พบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement นี้จะขึ้นอยู่กับกำลังของปลอกเหล็กที่นำมาห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ

จากตารางที่ 4 เมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างหรือ active confinement แก่ตัวอย่างทดสอบ ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรองรับหน่วยแรงกระทำในแนวแกนได้สูงเพิ่มขึ้น และสามารถแยกหน่วยแรงดังกล่าวเป็นหน่วยแรงที่เกิดจาก passive confinement ($f'_{max,pass}$) และหน่วยแรงที่เกิดจาก active confinement ($f'_{max,ac}$) และเมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรง $f'_{max,ac}$ ที่เพิ่มขึ้นจาก $f'_{max,pass}$ มีค่าสูงเพิ่มขึ้นประมาณ 10.6-32.4% และเมื่อพิจารณารูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ โดยความหนาปลอกเหล็กที่ทำให้ $f'_{max,ac}$ มีค่าสูงสุดคือความหนา 4.5 มิลลิเมตร และเมื่อความหนาปลอกเหล็ก 6.0 มิลลิเมตร ค่า $f'_{max,ac}$ จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาที่ความหนาปลอกเหล็กและการให้หน่วยโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากันพบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังน้อยและปานกลาง (18 MPa และ 25 MPa) ค่า $f'_{max,ac}$ มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตกำลังสูง (32 MPa)



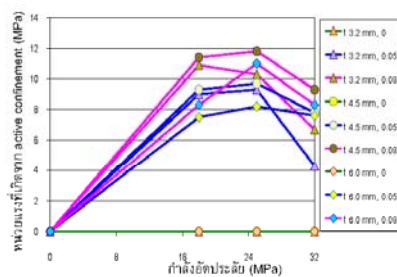
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก passive confinement และ active confinement

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ								
		f'_{max} (MPa)	P'_{max} (kN)	ϵ_{steel} (microstrain)	P_{steel} (kN)	P'_{conc} (kN)	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$			
							$f'_{max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	$f'_{max,pass}$ (MPa)	$f'_{max,ac}$ (MPa)
1	C18-0-0	19.9	-	-	-	-	-	-	-	-
	C25-0-0	26.7	-	-	-	-	-	-	-	-
	C32-0-0	31.9	-	-	-	-	-	-	-	-
2	CS18-32-0	58.4	898	231.6	71.9	826	53.7	19.9	33.8	0.0
	CS25-32-0	66.2	1018	171.1	53.1	965	62.7	26.7	36.0	0.0
	CS32-32-0	82.2	1266	603.9	187.5	1079	70.1	31.9	38.2	0.0
	CS18-45-0	74.0	1145	103	45.9	1099	71.4	19.9	51.5	0.0
	CS25-45-0	86.1	1325	127.6	56.8	1268	82.4	26.7	55.7	0.0
	CS32-45-0	96.7	1487	375.6	167.3	1320	85.7	31.9	53.8	0.0
	CS18-60-0	90.3	1390	120.4	69.9	1320	85.8	19.9	65.9	0.0
	CS25-60-0	100.9	1496	216	125.5	1370	89.0	26.7	62.3	0.0
CS32-60-0	108.7	1673	149.3	86.7	1586	103.0	31.9	71.1	0.0	
3	CS18-32-0.05	64.4	991	81	25.1	966	62.7	19.9	33.8	9.1
	CS25-32-0.05	74.1	1141	143.9	44.7	1096	71.2	26.7	36.0	8.5
	CS32-32-0.05	85.6	1310	530.6	164.7	1145	74.4	31.9	38.2	4.3
	CS18-45-0.05	83.4	1284	94.5	42.1	1242	80.7	19.9	51.5	9.3
	CS25-45-0.05	96.8	1490	163.2	72.7	1417	92.1	26.7	55.7	9.7
	CS32-45-0.05	104.8	1613	390.3	173.9	1439	93.5	31.9	53.8	7.8
	CS18-60-0.05	97.1	1495	101.5	58.9	1436	93.3	19.9	65.9	7.5
	CS25-60-0.05	104.5	1609	192.5	111.8	1497	97.3	26.7	62.3	8.2
CS32-60-0.05	115.6	1780	134.2	77.9	1702	110.6	31.9	71.1	7.5	
4	CS18-32-0.08	67.0	1031	117	36.3	995	64.6	19.9	33.8	11.0
	CS25-32-0.08	76.5	1178	175	54.3	1124	73.0	26.7	36.0	10.3
	CS32-32-0.08	88.4	1361	576.6	179.0	1182	76.8	31.9	38.2	6.7
	CS18-45-0.08	85.6	1318	97.8	43.6	1274	82.8	19.9	51.5	11.4
	CS25-45-0.08	98.4	1515	145.4	64.8	1450	94.2	26.7	55.7	11.8
	CS32-45-0.08	107.0	1646	412	183.6	1462	95.0	31.9	53.8	9.3
	CS18-60-0.08	98.4	1515	113.7	66.0	1449	94.1	19.9	65.9	8.4
	CS25-60-0.08	106.6	1641	176.2	102.3	1539	100.0	26.7	62.3	10.9
CS32-60-0.08	117.5	1803	155.6	90.3	1713	111.3	31.9	71.1	8.2	

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement โดยที่ลักษณะกราฟมีรูปร่างแบบโค้งคว่ำ เช่นเดียวกับรูปที่ 13 พบว่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจากกำลังต่ำ (18 MPa) ไปยังกำลังปานกลาง (25 MPa) และจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าสูง (32 MPa)

ดังนั้นค่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมในการศึกษาคือค่าความหนา 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$ เพราะว่าตัวแปรดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงกอดอัดในช่วงเส้นตรงได้เพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวยังมีพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นแบบ elastic-perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน เมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบนี้ พบว่าจะเกิดการไปออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตรนี้ มีความแกร่งเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD และ ว.ส.ท.



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและมีการให้แรงกระทำทางด้านข้างภายใต้แรงกอดอัดในแนวแกนสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างทำให้พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นจากพฤติกรรมดังกล่าวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยพฤติกรรมในช่วงดังกล่าวมีค่าประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวแปรที่ผลต่อพฤติกรรมในช่วงนี้คือ ความหนาของปลอกเหล็ก กำลังอัดประลัยของคอนกรีตและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง จากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีความชันของเส้นกราฟลดลงอย่างต่อเนื่อง และพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบ สามารถถูกจำแนกออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ strain hardening elastic-perfectly plastic และ strain softening โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักคือ ความหนาปลอกเหล็กและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง การวิบัติของตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก โดยเฉพาะที่มีความหนาที่ผ่านมาตรฐานของการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD และ ว.ส.ท. จะเกิดขึ้นที่ค่าการหดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมาก

2) เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าหนึ่งแล้ว การเพิ่มขึ้นของความหนาของปลอกเหล็กและการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงกอดอัดและความเหนียวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง โดยความหนาของปลอกเหล็กมีอิทธิพลมากกว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยต่ำ และภายใต้ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้ ความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปประยุกต์ใช้งานกับเสา Tubed column ต่อไป คือ ปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรและหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง "การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน"

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า

A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
A_g	=	พื้นที่หน้าตัดรวมของตัวอย่างทดสอบ
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก
B	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีต
E_c	=	modulus of elasticity ของคอนกรีต
E_s	=	modulus of elasticity ของปลอกเหล็ก
f_y	=	หน่วยแรงครากของปลอกเหล็ก
f'_{co}	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
f'_{max}	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ
$f'_{max,ac}$	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดจากผลของ active confinement
$f'_{max,conc}$	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของคอนกรีต
$f'_{max,pass}$	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดจากผลของ passive confinement
L	=	ความสูงของตัวอย่างทดสอบ
t	=	ความหนาของปลอกเหล็ก
ϵ'_{max}	=	ความเครียดใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Xiao, Y., He, W. and Choi, K. 2005. Confined concrete filled tubular columns. Journal of Structural Engineering, ASCE. 131(3): 488-497.

[2] Saw, H.S. and Liew, J.Y.R. 2000. Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings. Journal of Constructional Steel Research, 53: 121-147.

[3] American Institute of Steel Construction. 1994. Manual of steel construction load and resistance factor design (LRFD). 2nd Ed. Chicago.

[4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538. มาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐานว.ส.ท. 1008-38. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานคร.

[5] Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K. and Xiao, Y. 1985. Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. Proceeding of International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin. China. 19-26.

[6] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษดา อารังวุฒิ. 2551. การตรวจสอบ TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน. วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, มกราคม-กุมภาพันธ์ 2551: 81-99.

[7] Richart, F.E, Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. 1928. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. University of Illinois Engineering Experimental Station Bulletin 185.

**พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส
ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก**
**Compressive Behaviors of Square Concrete Specimens
Preconfined with Steel Jackets**

ชวลีพร อู๋ยืนยงค์^{1*}, สิทธิชัย แสงอาทิตย์², จักรกานต์ อารังวุฒิ³, ศาสัน สุขประเสริฐ⁴
^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
aom_ce_sut@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัด ลักษณะการวิบัติและผลของการโอบรัดก่อนที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยตัวแปรหลักประกอบด้วยกำลังรับแรงอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18, 25 และ 32 MPa และความหนาของปลอกเหล็ก 3 ค่า คือ 3.2, 4.5 และ 6.0 mm ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างถูกให้แรงโอบรัดกระทำทางด้านข้าง เพื่อก่อให้เกิด pre-confining pressure ต่อแกนคอนกรีต และถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดและห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก และตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกหน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.1 f_{cu} ตัวอย่างทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 63 ตัวอย่าง มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงแรกตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีพฤติกรรมรับแรงแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงรับแรงอัดสูงสุดหรือที่ค่าแรงกระทำประมาณ 60-80% ของกำลังรับแรงสูงสุดแรก และช่วงที่สองมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ elastic-perfectly plastic และ strain-softening สุดท้าย การวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปโดยมีความเหนียวที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตอ้างอิง

ABSTRACT

This paper presents experimental results of square concrete specimens preconfined with steel jackets. The objective of this research work is to study effects of preconfining pressure on compressive behaviors, modes of failure and compressive strength of the square concrete specimens. The main variables used in this study were the ultimate compressive strengths of the concrete, which are 18, 25 and 32 MPa, and the wall thicknesses of the steel jacket, which are 3.2, 4.5, and 6.0 mm. In this study, the specimens were preconfined with the steel jackets on the sides of the specimens in order to produce the preconfining pressure to the

* ชวลีพร อู๋ยืนยงค์ (Corresponding author)

concrete core. They were divided into 3 groups including: concrete specimens for reference, steel-encased concrete specimens without preconfining pressure and steel-encased concrete specimens with preconfining pressure of $0.1 f'_{cc}$. A total of 63 specimens were tested. The dimensions of the square concrete specimens were 150 mm wide and 300 mm long. It was found that the concrete specimens have a linear elastic behavior up to the ultimate compressive strength of the reference concrete or about 60-80% of their first maximum compressive load. Then, the behavior of the concrete specimens is nonlinear. The nonlinear behavior of the concrete specimens can be classified into 2 types: elastic-perfectly plastic and strain-softening. Finally, the concrete specimens were failed in progressive mode of failure with a high axial ductility, compared to the reference concrete.

คำสำคัญ: Square concrete specimens; Pre-confined pressure; Steel jacket; Compressive load

1. บทนำ

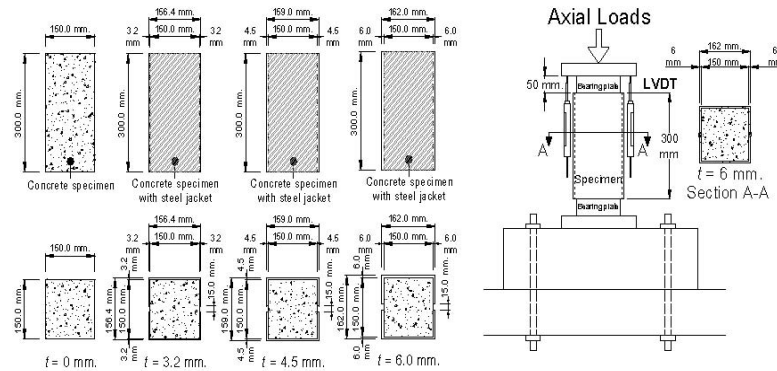
เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นเสา composite ที่ได้จากการใช้ท่อเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดทรงกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นแบบท่อหุ้มแกนของเสาซึ่งอาจจะเป็นคอนกรีตล้วนหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง ทั้งในด้านกำลัง (strength) ความแกร่ง (stiffness) ความเหนียว (ductility) และการดูดซับพลังงาน (energy absorption) Xiao et al. (2005) โดยทั่วไปเสา CFT ถูกแบ่งตามลักษณะการออกแบบให้ท่อเหล็กรองรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบคือ 1.) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยเสา CFT จะถูกก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยมีความสูงหลายชั้นหรือสูงตลอดความสูงของอาคาร ซึ่งเสา CFT แบบนี้จะรองรับแรงที่กระทำผ่านท่อเหล็กและคอนกรีตร่วมกัน และ 2.) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง (transverse reinforcement) โดยมีรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อ การออกแบบ และการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแนวคิดของเสา CFT แบบที่สองได้ถูกนำเสนอโดย Tomii et al. (1985) โดยมีวัตถุประสงค์หลักให้ท่อเหล็กดังกล่าวรองรับแรงกระทำตามขวางและโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งเสาประเภทนี้มักถูกเรียกว่า "Tubed column" โดยท่อเหล็กจะถูกออกแบบไม่ให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรง โดยการเว้นช่องว่างระหว่างท่อเหล็กกับท้องคานหรือฐานรากที่ปลายทั้งสองของเสา ดังนั้น ภายใต้แรงกระทำ ท่อเหล็กทำหน้าที่เป็นปลอก (jacket) โอบรัดต่อแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้สูงขึ้น สัททิชัยและจักษดา (2550) ได้นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมเสาคอนกรีต โดยนำเสนอผลการทดสอบที่กล่าวถึงพฤติกรรมโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของ Tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงและได้เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับสมการของ ACI Committee 440 ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิงแล้ว Tubed column มี

พฤติกรรมการรับแรงสูงสุดและความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองของ ACI ยังสามารถทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างได้ถูกต้องพอเพียง และเพื่อประสิทธิภาพของ Tubed column ที่สูงขึ้นควรเสริมท่อเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอ เพื่อให้มีกำลังอัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า รูปแบบการใช้ปลอกเหล็กในการโอบรัดเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่และปรับปรุงและ/หรือซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยพบว่ากำลังและความเหนียวของเสา CFT และ Tube concrete column จะเพิ่มขึ้นเมื่อเสริมการโอบรัดทางด้านข้างที่พอเพียง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการรับแรงอัดของเสาให้สูงขึ้น โดยการเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างแก่ตัวอย่างทดสอบโดยตรงแก่ปลอกเหล็กสูกแกนคอนกรีต โดยการพัฒนากระบวนการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (pre-confinement) แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตโดยใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) แบบใหม่ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน และลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง เพื่อเป็นแนวทางในการเสริมกำลังอีกรูปแบบหนึ่งให้กับ Tubed column

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างทดสอบ ปลอกเหล็กที่ใช้เป็น cold-formed steel carbon ที่ได้จากการพับแผ่นเหล็กสองส่วนมาประกบกันเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเป็นเหล็กตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของ มอก. และคอนกรีตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ผลิตโดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) การทดสอบสมบัติของวัสดุกระทำตามมาตรฐานของ ASTM โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กตามมาตรฐาน ASTM E8 ตัวอย่างทดสอบมี ขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm และมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 1 โดยชื่อตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป WX-Y-Z ซึ่ง W คือประเภทของตัวอย่างทดสอบ (CR หมายถึงคอนกรีตอ้างอิง และ SR คือคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก) X หมายถึงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f_{co} = 18, 25 และ 32 MPa) ที่อายุ 28 วัน Y คือความหนาของปลอกเหล็ก (t = 3.2, 4.5 และ 6.0 mm) และ Z หมายถึงหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (0 และ $0.1 f_{co}$) ตัวอย่างทดสอบจำนวน 63 ตัวอย่าง ถูกจำแนกเป็น 3 กลุ่มโดย กลุ่มที่ 1 เป็นคอนกรีตล้วนที่ไม่มีวัสดุโอบรัด (control column) จำนวน 9 ตัวอย่าง, กลุ่มที่ 2 คอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กโดยไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง 27 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ 3 ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำ โดยให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.1 f_{co}$ 27 ตัวอย่าง เมื่อทำการให้หน่วยแรงมีค่าตามที่ได้คำนวณออกแบบไว้แล้ว ปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบจะถูกเชื่อมติดกันโดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญ



ภาพที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 2 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

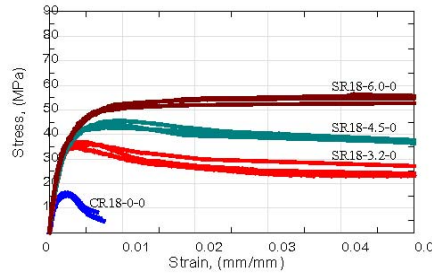
2.2 รายละเอียดการทดสอบ การทดสอบใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2000 kN โดยแรงอัดในแนวแกนกระทำลงสู่แกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบโดยตรงที่ปลายทั้งสองข้างผ่าน Steel bearing plate ขนาด 140x140 mm หนา 50 mm ดังแสดงในภาพที่ 2 การหัดตัวในแนวแกนถูกวัดโดยใช้ Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกด จากนั้นเมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ทำการ pre-loading ประมาณ 40% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ เริ่มทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้าๆ เก็บข้อมูลการทดสอบโดยใช้ Data Acquisition System (DAQ) อย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์

3. ผลการทดสอบ

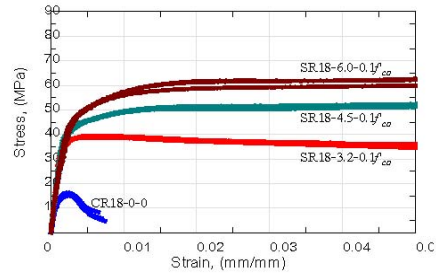
3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด ในการศึกษาได้จำกัดการแสดงผลที่ค่าการหัดตัว 15 mm หรือเทียบเท่าค่าความเครียด (strain) ในคอนกรีตที่ 0.050 mm/mm ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่สูงกว่า ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 18.75 เท่า ภาพที่ 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ของตัวอย่างทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือพฤติกรรมแบบเส้นตรงและพฤติกรรมไร้เชิงเส้น เมื่อพิจารณาตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง) ในช่วงแรกความสัมพันธ์มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเริ่มรับแรงกระทำแกนคอนกรีตจะเป็นวัสดุหลักในการรับแรงและเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง ในช่วงนี้คอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างน้อยมากเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ต่ำกว่าเหล็ก โดยพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบทุกต้นเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงประมาณ 60-80% ของหน่วยแรงสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 พบว่าพฤติกรรมในช่วงแรกของตัวอย่างทดสอบจะมีความชันสูง

มากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.1 f_{co}'$ ซึ่งจะก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 3 และ 4 เมื่อพิจารณา f_{co}' และความหนาปลอกเหล็กที่เท่ากัน พบว่าค่าความแกร่งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามหน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน ค่าความแกร่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาปลอกเหล็กมากขึ้น โดยที่ความแกร่งของตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่สอง ค่าความชันของกราฟจะเริ่มลดลงเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect เป็นผลทำให้ความชันของกราฟเริ่มมีค่าลดลง ในขณะที่แกนคอนกรีตจะมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นและจะทำให้ความดันรัดรอบ (confining pressure) ระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็กเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลทำให้คอนกรีตมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุเหนียว (ductile)

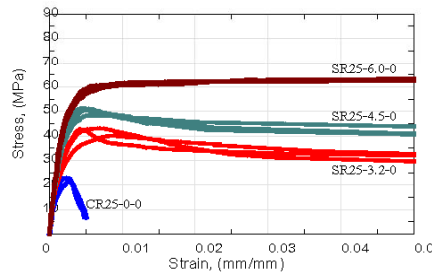
นอกจากนี้ พฤติกรรมในช่วงที่สองของตัวอย่างทดสอบจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f_{co}') ความหนาของปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1.) ตัวอย่างทดสอบรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแกร่งประมาณศูนย์หรือ elastic-perfectly plastic ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอผนังของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มมีความแกร่งต่อการตัดในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และทำหน้าที่รัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและปลอกเหล็กที่ความหนา 6.0 mm ทั้งหมด อีกทั้งพฤติกรรมดังกล่าวยังพบในการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.1 f_{co}'$ ซึ่งเกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่หนาปานกลาง (4.5 mm) และทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 2.) ตัวอย่างทดสอบเมื่อรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแกร่งลดลงหรือ strain-softening ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กไม่มีความแกร่งต่อการตัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถรัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและปลอกเหล็กที่ความหนา 3.2 และ 4.5 mm ทั้งหมด



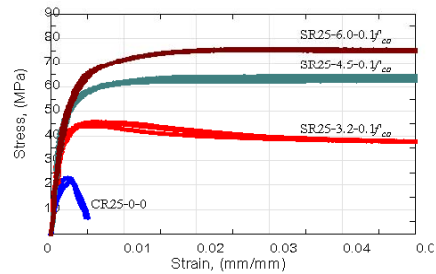
(ก) Concrete specimens with steel jacket at $f'_{co} = 18$ MPa



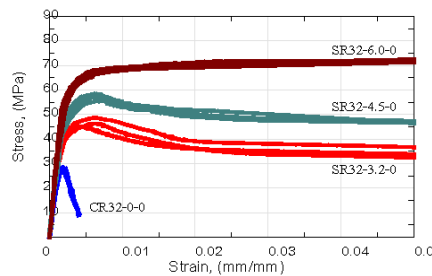
(ข) Concrete specimens with steel jacket at $f'_{co} = 18$ MPa



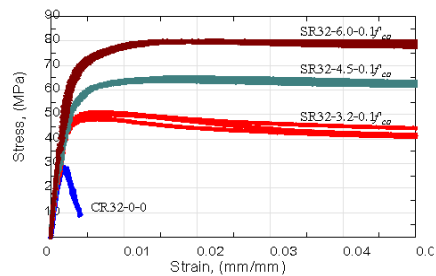
(ค) Concrete specimens with steel jacket at $f'_{co} = 25$ MPa



(ง) Concrete specimens with steel jacket at $f'_{co} = 25$ MPa



(จ) Concrete specimens with steel jacket at $f'_{co} = 32$ MPa



(ฉ) Concrete specimens with steel jacket at $f'_{co} = 32$ MPa

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่มีหน่วยแรงโอบรัด 0.1 f'_{co}

3.2 ลักษณะการวิบัติ ตัวอย่างทดสอบอ้างอิงที่ถูกให้แรงอัดในแนวแกนจะเกิดการแตกร้าวที่ผิวด้านบนและล่างทำให้เกิดการขยายตัวออกด้านข้างเนื่องจากผลของ Poisson's effect รอยแตกร้าวมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแนวแรงแม่เมื่อแรงอัดมีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (abrupt failure) ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ซึ่งแตกต่างจากการวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยมีลักษณะการวิบัติ

แบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) เริ่มต้นจากการอัดแตกของคอนกรีตในบริเวณที่แรงอัดกระทำ ซึ่งทำให้แกนคอนกรีตเกิดการหดตัวในแนวแกนและการขยายตัวออกทางด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันออกกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กทางด้านข้างทำให้ปลอกเหล็กเกิดการโก่งเคาะของผนังโดยการโป่งออกของปลอกเหล็กซึ่งเกิดขึ้นมากสุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วงความสูง 100-150 mm ของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5(ข)-(ค) เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นและปลอกเหล็กเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างมากจนไม่สามารถโอบรัดคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ ปลอกเหล็กจะช่วยรัดแกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าหากันและทำให้การ crushing ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่อง และทำให้แรงอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็ก เป็นผลทำให้มีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติโดยรวม ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและประหยัด ตัวอย่างทดสอบควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอในบริเวณที่ผนังท่อเกิดการโป่งออก



(ก) คอนกรีตล้วน



(ข) ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต



(ค) หน้าตัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

ภาพที่ 5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

4. วิจัยผลลัพธ์

หน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบและค่าความเครียดสูงสุด

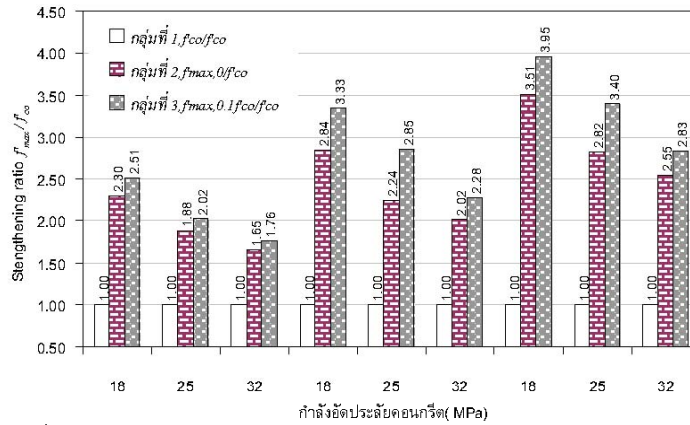
ในการศึกษานี้ได้นิยามให้ f'_{max} เป็นค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ จาก column ที่ 4 ของตารางที่ 1 พบว่า เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากัน ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่หนา 3.2 mm มีค่าอัตราส่วน f'_{max}/f'_{co} อยู่ในช่วง 1.69-2.57 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ความหนา 4.5 และ 6.0 mm มีค่าอยู่ในช่วง 2.01-3.03 และ 2.41-3.38 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความหนาของปลอกเหล็กและคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากัน พบว่า อัตราส่วน f'_{max}/f'_{co} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่สูงขึ้น (มีค่าอยู่ในช่วง 1.69-2.82 และ 1.86-3.38 ในกลุ่มที่ 2 และ 3 ตามลำดับ) อาจเนื่องมาจากการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างแก่ตัวอย่างทดสอบทำให้ปลอกเหล็กชิดกับแกนคอนกรีตมากกว่าที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง ดังนั้นจึงเกิดการโอบรัดระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตก่อนที่จะเริ่มรับแรงกระทำ เมื่อเริ่มรับแรงกระทำจึงสามารถรับแรงอัดในแนวแกนได้สูงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

กลุ่ม	ตัวอย่าง	f'_{max} เฉลี่ย (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$ (MPa)	ϵ'_{max} (% ϵ)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_u}$	ความแกร่ง (GPa)	พฤติกรรมการรับแรง
1	CR18-0-0	15.50	-	0.26	-	-	crushing
	CR25-0-0	21.79	-	0.28	-	-	crushing
	CR32-0-0	26.47	-	0.23	-	-	crushing
2	SR18-3.2-0	35.50	2.29	0.36	1.38	22.17	SS
	SR25-3.2-0	39.90	1.83	0.42	1.52	26.40	SS
	SR32-3.2-0	44.72	1.69	0.34	1.48	28.73	SS
	SR18-4.5-0	40.48	2.61	0.40	1.53	25.81	SS
	SR25-4.5-0	49.59	2.28	0.46	1.67	27.09	SS
	SR32-4.5-0	53.33	2.01	0.37	1.61	29.70	SS
	SR18-6.0-0	43.74	2.82	0.41	1.58	26.23	EPP
	SR25-6.0-0	58.74	2.70	0.55	1.99	28.21	EPP
	SR32-6.0-0	63.72	2.41	0.41	1.80	30.92	EPP
3	SR18-3.2-0.1 f'_{co}	39.84	2.57	0.37	1.44	25.87	SS
	SR25-3.2-0.1 f'_{co}	44.49	2.04	0.37	1.33	27.74	SS
	SR32-3.2-0.1 f'_{co}	49.14	1.86	0.42	1.82	31.81	SS
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	46.91	3.03	0.40	1.55	25.90	EPP
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	56.84	2.61	0.39	1.43	29.04	EPP
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	59.15	2.23	0.43	1.87	33.44	EPP
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	52.40	3.38	0.40	1.55	29.77	EPP
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	68.04	3.12	0.65	2.37	30.48	EPP
	SR32-6.0-0.1 f'_{co}	72.19	2.73	0.49	2.14	33.76	EPP

หมายเหตุ: EPP และ SS คือ พฤติกรรม Elastic perfectly plastic และ Strain softening ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของการให้แรงโอบรัด พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนจากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดที่ $0.1 f'_{co}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 17.0-56.0% ซึ่งเมื่อคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.1 f'_{co}$ มีแนวโน้มทำให้อัตราส่วนกำลังมีค่าสูงขึ้นและอัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน Strengthening ratio f'_{max} / f'_{co} ของตัวอย่างทดสอบ

โดยสรุปพบว่า ป्लอกเหล็กที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มี f'_{co} ที่สูงขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะช่วยให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้น ยังช่วยให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมในการรับแรงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไร้เชิงเส้น ตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าที่มีกำลังอัด 60-80% ของกำลังอัดประลัยสูงสุด จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น พฤติกรรมดังกล่าวพบอยู่ 2 ลักษณะคือ Strain-softening และ Elastic-perfectly plastic พฤติกรรมในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{co}) ความหนาของปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ
2. การวิบัติเกิดที่ค่าการหดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป แสดงว่าตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นโดยการขยายตัวออกทางด้านข้างและเกิดมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วง 100-150 มม ของ

ตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติ ทำให้แกนคอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของตัวอย่างทดสอบบริเวณดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ

3. ผลของการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างในเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้หน่วยแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิด confining pressure ของเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง อย่างไรก็ตามความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดและความเหนียวมีค่าสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สถานที่ดำเนินการศึกษา และเครื่องมือในการทดสอบ ในโครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน"

เอกสารอ้างอิง

- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และจักษุดา ชำรงวุฒิ, 2550. พฤติกรรมทางโครงสร้างของ Tubed Column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า. เอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2550, บทความ Vol.7 (STR):51-56
- American Institute of Steel Construction, 1994. Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD). 2nd Ed., Chicago.
- Architectural Institute of Japan, 1997. Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD). 2nd Ed., Chicago.
- Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K., and Xiao, Y., 1985. Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. Proceeding of International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin, China, 19-26.
- Xiao, Y., He, W., and Choi, K., 2005. Confined concrete filled tubular columns. Journal of Structural Engineering, ASCE. 131(3):488-497.

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ-สกุล นายสิทธิชัย แสงอาทิตย์
Mr. Sittichai Seangatith
2. ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์
3. สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
E-mail: sitichai@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

Ph.D. in Civil Engineering (1997), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA

M.Eng. in Civil Engineering (1993), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA

B.Eng. in Civil Engineering (1990), Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ

Structural Engineering - Experimental and Applied Mechanics on Civil Engineering Fiber Reinforced Plastic Composite Materials and Structures, Reinforced Concrete, Masonry, and Steel. Finite Element Analysis.

6. ผลงานทางวิชาการ (ย้อนหลัง 3 ปี 2552-2554)

6.1 บทความวิจัย

1. หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์ชวลิตกุล “พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบฟัลทรูดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเงื่อนไข และการตัด,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 4 หน้า 1625-1632.
2. จักขดา ชำรงวุฒิ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน “TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าและสมการออกแบบของเสาเชิงประกอบ,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 6 หน้า 1931-1937.
3. Duangjaras, C., Seangatith, S. and Apichatvullop, A., “Failure Characteristics of Full Depth Precast Slabs with Loop Joints,” The Fourteenth National Convention on Civil Engineering, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 13-15, 2009. Vol. 6, pp. 2275-2279.

4. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., "Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns under Axial Compression," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 16, No. 3, July-September 2009, pp. 205-220.
5. จักษดา ชำรงวุฒิ วรรณ คำลือ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และวินัย มณีรัตน์ "การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูป," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, สมาคมคอนกรีตไทย, นครราชสีมา, 20-22 ตุลาคม 2552. paper no. STR-07. (in CD-Rom format)
6. Namvijitr, N., Seangatith, S., Thumrongvut, J. and Sukprasert, S., "Axial Compressive Capacity of Circular Steel Tubed Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets," The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2010), Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Royal Mekong Nongkhai Hotel, Nong Khai, March 4-6, 2010, paper A3_005. (Best paper presentation award)
7. ชุติพร อวยยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และศาสน์ สุขประเสริฐ "การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, อุบลราชธานี, 12-14 พฤษภาคม 2553. paper no. STR-41. (in CD-Rom format)
8. Seangatith, S., "Experimental Study on PFRP Box Columns with Different Supports under Axial Compression," The Third International Conference Advanced Composite Materials Engineering (COMAT2010), Transylvania University of Brasov, Brasov, Romania, October 27-29, 2010.
9. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., "Behaviors of Square Thin-walled Steel Tubed RC Columns under Direct Axial Compression on RC Core," The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong SAR, China, January 26-28, 2011. (Procedia Engineering 14 (2011) 513-520 doi:10.1016/j.proeng.2011.07.064)
10. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Experimental Study on Lateral-Torsional Buckling of PFRP Cantilevered Channel Beams," The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong SAR, China, January 26-28, 2011. (Procedia Engineering 14 (2011) 2438-2445 doi:10.1016/j.proeng.2011.07.306)
11. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Responses of PFRP Cantilevered Channel Beams under Tip Point Loads," Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, Switzerland,

- Vols. 471-472 (Composite Science and Technology), February 2011, pp. 578-583. (doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.578)
12. นันทิกา นามวิจิตร สิทธีชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ “พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก,” วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน 2554, หน้า 1-15
 13. ชูสิทธิ์ อุษยีนรงค์ สิทธีชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ “พฤติกรรม การรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. STR-0053. (in CD-Rom format)
 14. นันทพร กาญจนวัฒน์นางศ์และสิทธีชัย แสงอาทิตย์ “ผลของเรซินและมวลรวมละเอียดต่อ พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์ตคอนกรีต,” การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. MAT-0069. (in CD-Rom format)
 15. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “Flexural-Torsional Buckling Behaviors of Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-point Loading,” The Sixteenth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Chonburi, Thailand, May 18-20, 2011. paper no. STR-0078. (in CD-Rom format)
 16. กรรณ คำลือ จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธีชัย แสงอาทิตย์ “การตรวจสอบคานคอนกรีตอัดแรง สำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. STR-0079. (in CD-Rom format)
 17. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “On the Structural Responses of Simply Supported PFRP Channel Beams under Three-point Loading,” International Journal of Civil & Environmental Engineering, IJENS Publishers, Vol. 11, No. 04, August 2011, pp. 13-17.
 18. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “Experimental Evaluation on Fixed End Supported PFRP Channel Beams and LRFD Approach,” Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 105-107 (Vibration, Structural Engineering and Measurement I), September 2011, pp. 1671-1676. (doi:10.4028/ www.scientific.net/ AMM.105-107.1671)

19. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., “Experimental Investigation on Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-point Loading,” *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 335-336 (*Advanced Materials and Structures*), September 2011, pp. 1321-1326. (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1321).

6.2 บทความทั่วไป

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “สิ่งที่นักศึกษาใหม่ควร “รู้” บนพื้นฐานของอัตลักษณ์ มทส.,” เรียนอย่าง Smile ใน มทส., วีรพงษ์ พลนิกรกิจ บรรณาธิการ, พิมพ์ครั้งที่ 8 ฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2552, หน้า 1-20.
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “ตัวบ่งชี้การประกันคุณภาพการศึกษาและภาวการณ์เป็นมหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐ,” วารสาร สอ. ประเทศไทย (ASAIHL-Thailand Journal), สมาคมสถาบันการศึกษาขั้นอุดมแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, พฤศจิกายน 2552, หน้า 66-78 และ 60-65.

6.3 รายงานวิจัย

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จั๊กชดา ชำรงวุฒิ และกรรณ คำลือ, “การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูปที่ถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมสั้น,” รายงานการวิจัย, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552. (แหล่งทุน: บริษัท ไทย แมค ฟริแคชท์ จำกัด, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 50%)
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จั๊กชดา ชำรงวุฒิ และกรรณ คำลือ, “การทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง,” รายงานการวิจัย, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554. (แหล่งทุน: บริษัท เอส-คอนกรีต จำกัด, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 50%)

6.4 ตำราและเอกสารคำสอน

1. เอกสารคำสอนวิชา Engineering Statics
2. ตำราวิชา Mechanics of Materials
3. เอกสารคำสอนวิชา Material Testing
4. คู่มือปฏิบัติการวิชา Material Testing
5. เอกสารคำสอนวิชา Theory of Structures
6. ตำราวิชา Structural Analysis
7. เอกสารคำสอนวิชา Structural Steel Design
8. เอกสารคำสอนวิชา Advanced Mechanics of Materials (ภาษาอังกฤษ)
9. ตำราวิชา Advanced Theory of Structures