

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอถึง ผลของการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ ที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ คอนกรีต ปลอกเหล็ก และเหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากนี้ได้นำเสนอถึงพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วย ปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ซึ่งประกอบด้วย พฤติกรรมในการรับแรงกดอัด ในแนวแกน ลักษณะการวิบัติ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น รวมทั้งได้เปรียบเทียบกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบตาม มาตรฐานออกแบบที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งนำเสนอ สมการที่เหมาะสมในการทำนายกำลัง รับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้ หน่วยแรง โอบรัดก่อน

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

4.1.1. ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

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

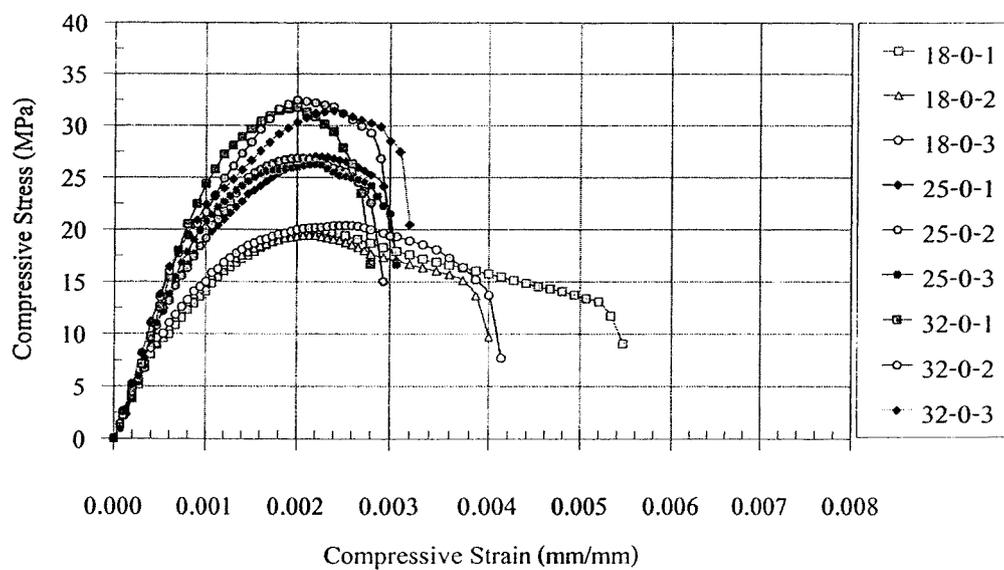
ในการแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตจะนำเสนอ 2 ส่วนคือ (1) กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้ แรงกดอัดในแนวแกนค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย 19.3 26.0 และ 32.0 MPa และมีค่าของ โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 20.5 24.2 และ 27.8 GPa ตามลำดับ (2) กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอก เหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยมีหน่วยแรงกดอัด สูงสุดเฉลี่ยดังนี้ 19.9 26.7 และ 31.8 MPa และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยมีค่า 20.4 24.2 และ 27.6 GPa ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1

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

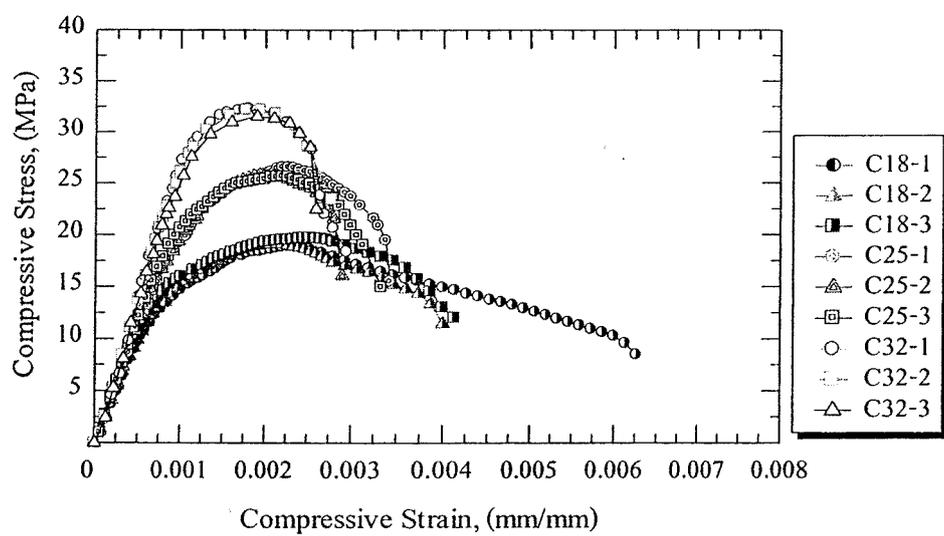
สำหรับการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนร่วมกัน แต่ลักษณะการวิบัติเกิดจากหน่วยดึงและหน่วยแรงเฉือนในเนื้อคอนกรีต โดยมีระนาบการวิบัติทำมุมประมาณ 50-60 องศากับแนวแกนของตัวอย่าง สาเหตุเกิดจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุและจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่หัวสัมผัสกับตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างดังนั้นจึงมีผลให้สถานะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป 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

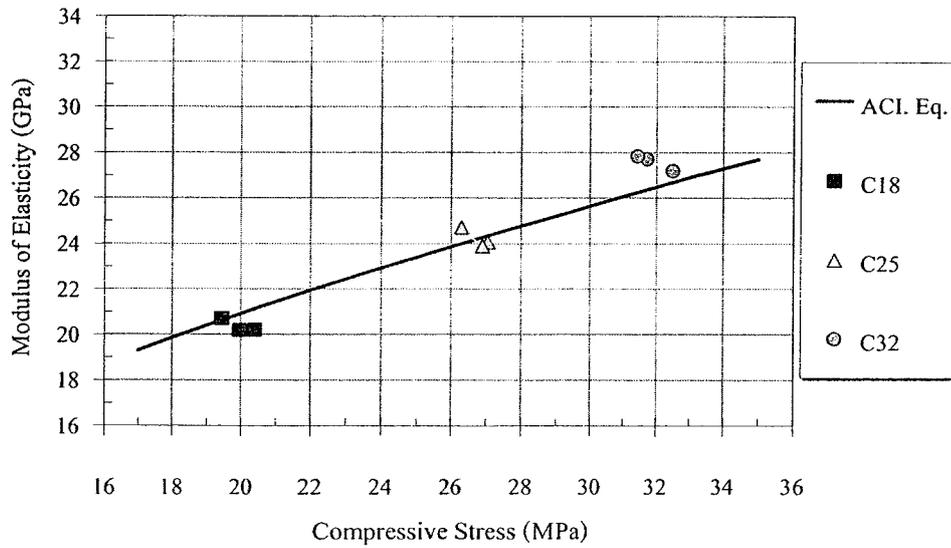


a). สำหรับการทดสอบในหน้าตัดกลม

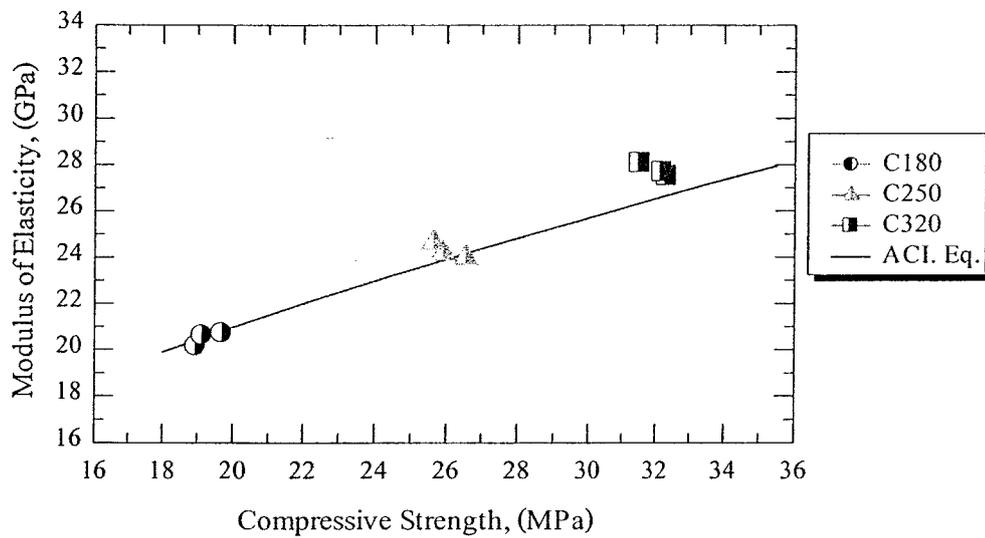


b). สำหรับการทดสอบในหน้าสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

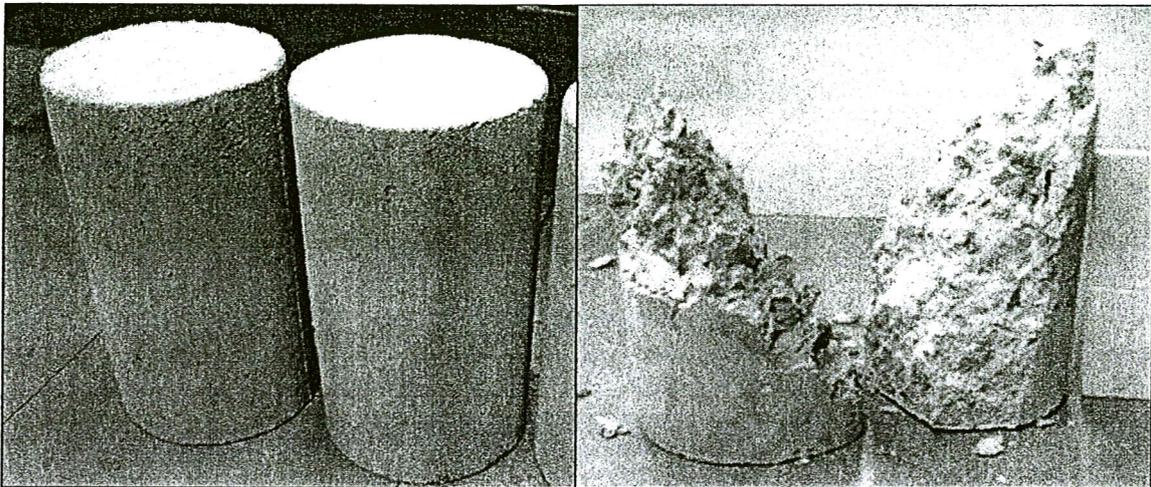


a). สำหรับการทดสอบในหน้าตัดกลม



b). สำหรับการทดสอบในหน้าสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

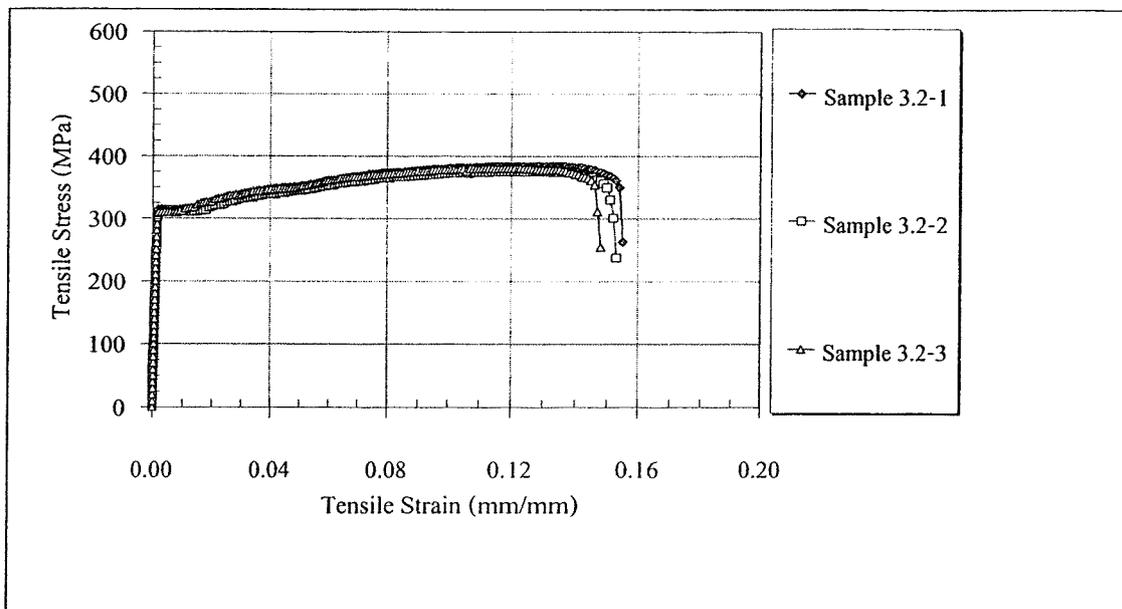
4.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก

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

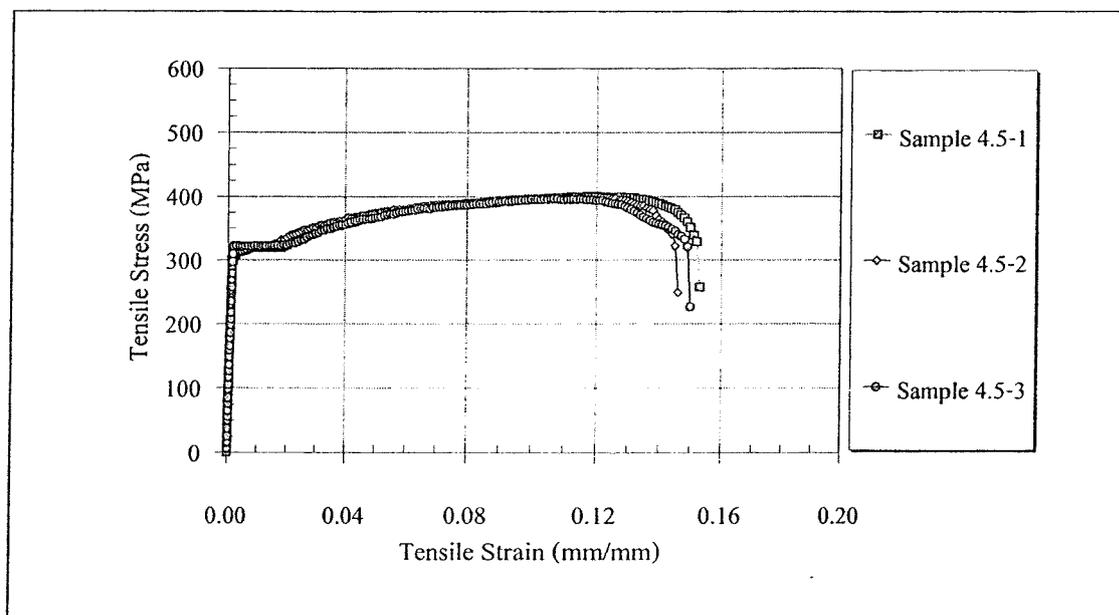
จากการทดสอบการรับแรงดึงของปลอกเหล็ก พบว่าหน่วยแรงดึงที่จุดครากของตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร มีหน่วยแรงดึงที่จุดครากเฉลี่ยดังนี้ 312.10 321.16 และ 326.06 MPa ตามลำดับ จากนั้นปลอกเหล็กจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงคราก โดยที่ปลอกเหล็กจะรับแรงได้คงที่แต่มีความเครียดมากขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากนั้นปลอกเหล็กจะสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง 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

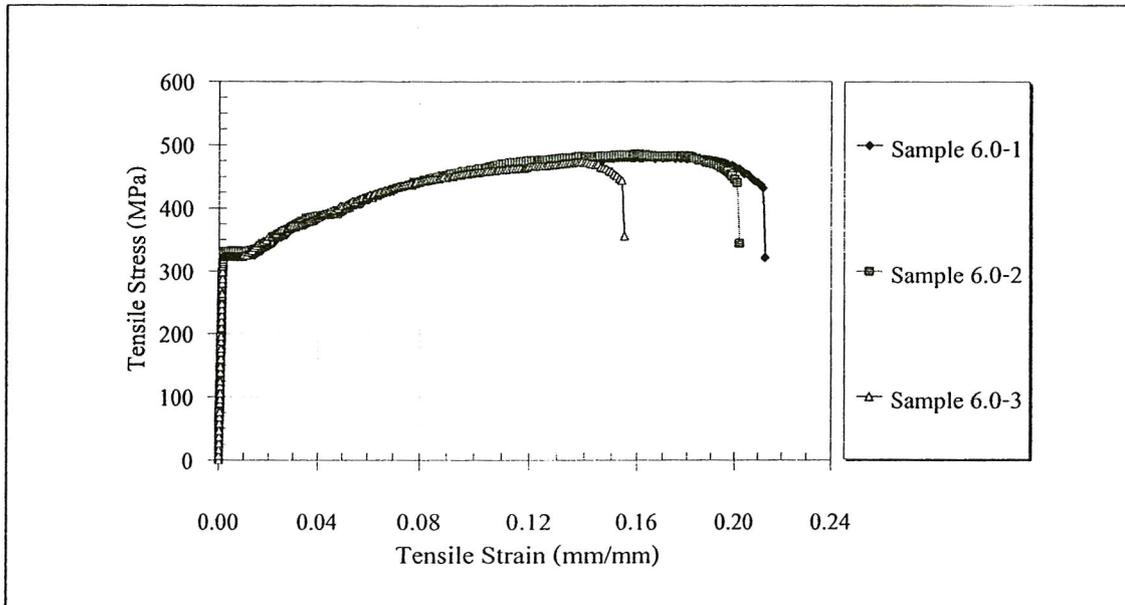
ตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 3.2 มิลลิเมตร				
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	314.83	384.93	202.76	15.50
2	311.10	375.93	201.00	15.25
3	310.38	380.89	200.98	14.80
เฉลี่ย	312.10	380.59	201.58	15.18
ตัวอย่างทดสอบเหล็ก ความหนา 4.5 มิลลิเมตร				
ตัวอย่าง	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



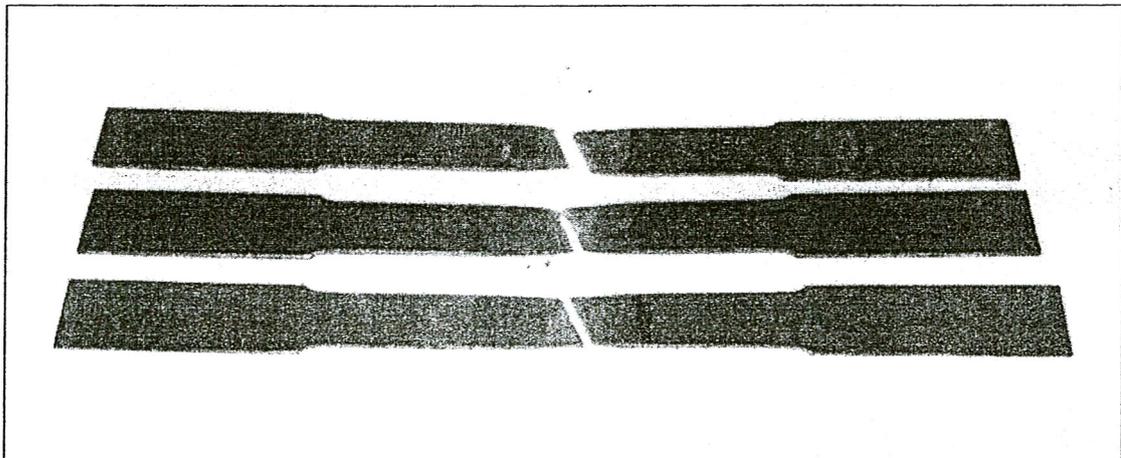
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก
ความหนา 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก
ความหนา 4.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและค่าความเครียดของปลอกเหล็ก
ความหนา 6.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็ก

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน B/t ตามข้อกำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5 สามารถสรุปการเปรียบเทียบปลอกเหล็กอัตราส่วน B/t ตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 หรือ มาตรฐานการออกแบบของ ACI Committee 318 และมาตรฐานการออกแบบของ 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 • $E_s = 201.58 \text{ GPa}$ • $f_y = 312.10 \text{ MPa}$	46.9	44.0	35.9
		(ไม่ผ่านข้อกำหนด)	(ไม่ผ่านข้อกำหนด)
2. ความหนา 4.5 mm • $E_s = 205.03 \text{ GPa}$ • $f_y = 321.60 \text{ MPa}$	33.3	43.7	35.7
		(ผ่านข้อกำหนด)	(ผ่านข้อกำหนด)
3. ความหนา 6.0 mm • $E_s = 197.47 \text{ GPa}$ • $f_y = 326.06 \text{ MPa}$	25.0	42.6	34.8
		(ผ่านข้อกำหนด)	(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 ซึ่งตัวอย่างทดสอบเหล็กเสริมมีหน่วยแรงดึงที่จุกครากดังนี้สำหรับเหล็กกลม มีค่า 259.09 MPa และ เหล็กข้ออ้อย มีค่า 353.32 MPa จากนั้นเหล็กเส้นดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงคราก คือตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นจะรับหน่วยแรงดึงได้คงที่แต่จะมีความเครียดสูงเพิ่มขึ้น

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

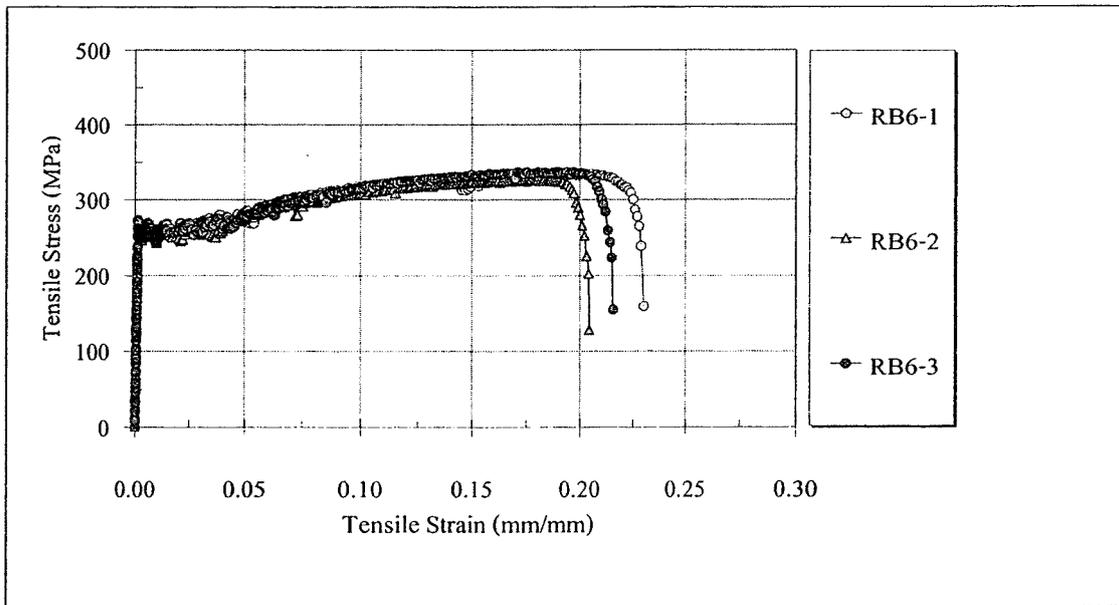
ตัวอย่างทดสอบจะรับหน่วยแรงดึงได้ลดลงส่งผลให้ความชันของกราฟ มีค่าความชันลดลง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ และที่จุดวิบัติมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดังนี้ 21.67% และ 33.70% ตามลำดับของเหล็กกลม (RB6) และเหล็กข้ออ้อย (DB12) โดยแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 และลักษณะการวิบัติของเหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อยแสดงในรูปที่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

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม (RB6)

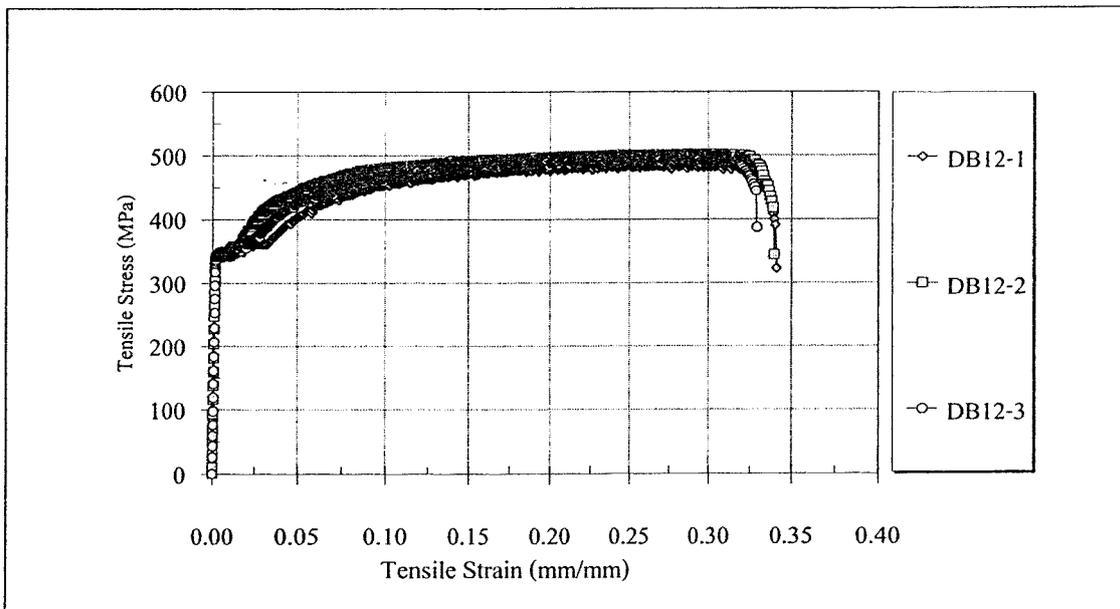
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	262.43	336.00	196.50	23.0
2	257.10	325.71	192.20	20.4
3	257.73	337.60	194.80	21.6
เฉลี่ย	259.09	333.10	194.50	21.67

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย (DB12)

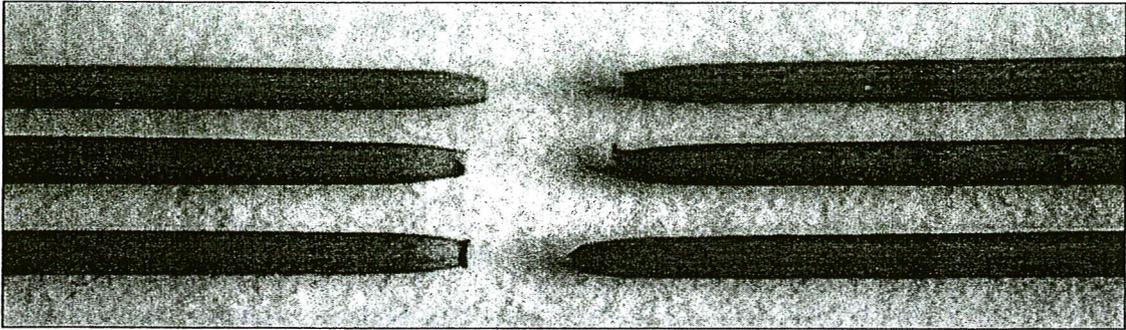
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	361.32	484.92	190.30	34.1
2	350.95	502.36	191.30	34.0
3	347.70	492.56	190.70	33.0
เฉลี่ย	353.32	493.28	190.77	33.70



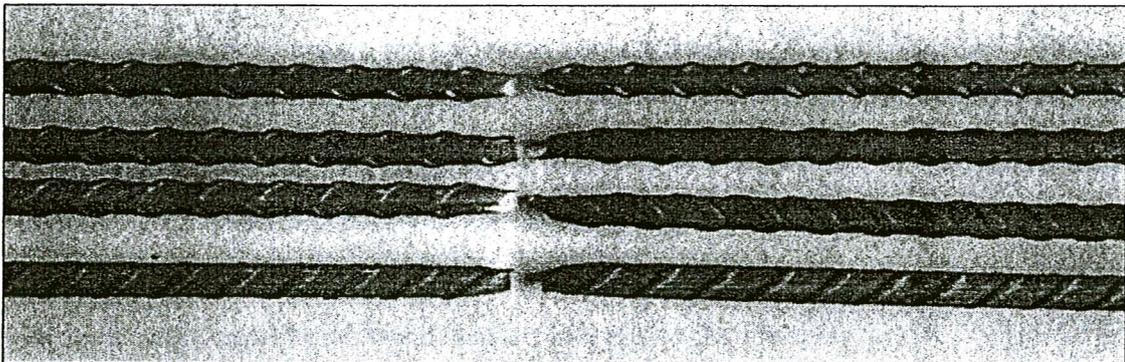
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นกลม



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 $0.1 f'_{co}$)

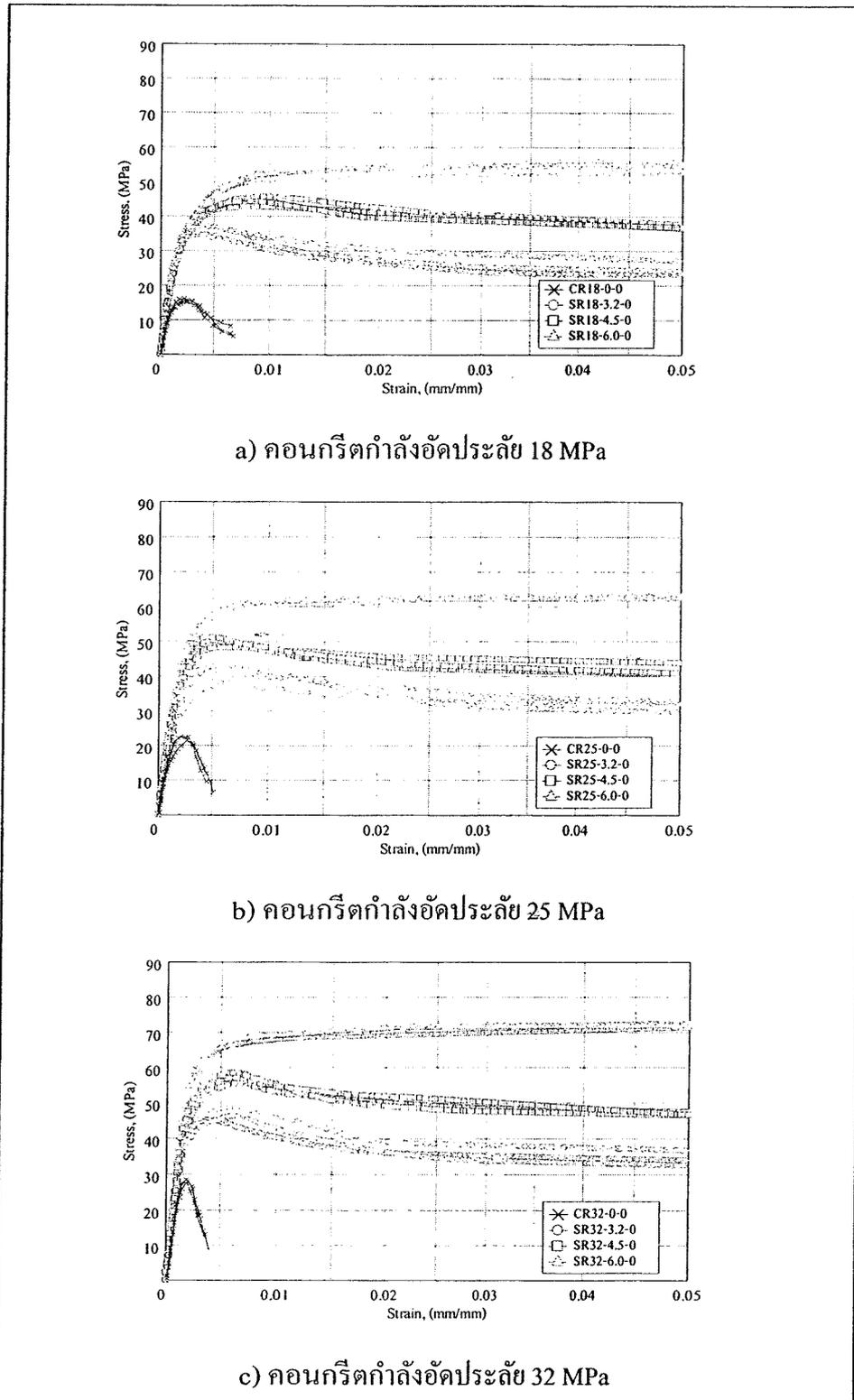
และจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวมีค่า 15 mm หรือเทียบเท่าค่าความเครียด (Strain) ในคอนกรีตที่ค่า 0.050 mm/mm เป็นค่าความเครียด (Strain) ที่สูงกว่า Ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 18.75 เท่า

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 ในช่วงแรกและเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกดอัดโดยปลอกเหล็กที่รับแรงกดอัดได้บ้าง โดยอาศัยการถ่ายแรงบางส่วนจากแกนคอนกรีตโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยว (Bond) และแรงเสียดทานระหว่างผิวแกนของคอนกรีตและผิวในของปลอกเหล็ก (Johansson, M., 2000) โดยพฤติกรรมช่วงนี้มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดประมาณ 60 - 80% ของหน่วยแรงสูงสุดและเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่า พฤติกรรมในช่วงแรกนั้นจะมีค่าความชันสูงมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีการให้หน่วยแรง โอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ ตามลำดับซึ่งก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น จากนั้นช่วงที่สองเมื่อแกนคอนกรีตถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro cracking) ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้นค่าความชัน (Slope) ของกราฟความสัมพันธ์จึงเริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) มากขึ้นในขณะเดียวกันเมื่อแกนคอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น ก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กมากขึ้นแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะต้านทานต่อแรงดันดังกล่าว โดยอาศัยความแกร่งต่อการคดของผนังในรูปของแผ่น (Plate) ซึ่งก่อให้เกิดแรงตั้งฉากและแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแกนคอนกรีตและในส่วนผนังด้านในของปลอกเหล็กมากขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ปลอกเหล็กต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนร่วมกับแกนของคอนกรีตอย่างต่อเนื่องและเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ที่ผนังของปลอกเหล็ก (Local tube wall buckling) ขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้น ได้ไม่มากนักโดยปลอกเหล็กทำหน้าที่ในการจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้มากขึ้นและทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนที่สูงมาก (คล้ายพฤติกรรมของวัสดุเหนียว) ก่อนการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

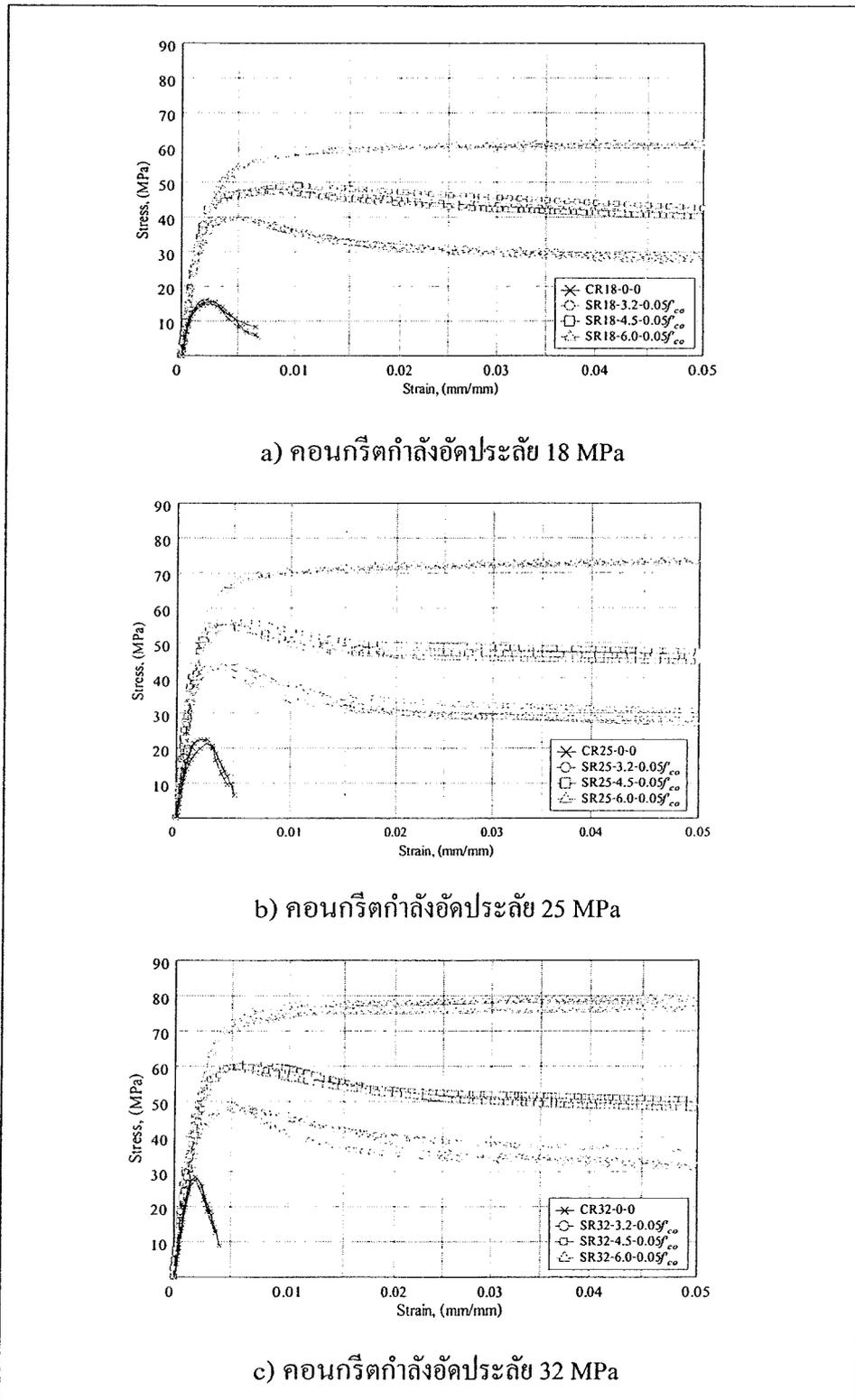
พฤติกรรมในช่วงที่สองของตัวอย่างทดสอบพบอยู่ 2 รูปแบบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12-4.14 และตารางที่ 4.6 โดยลักษณะของพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น เป็นดังนี้

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 ผนังของปลอกเหล็กจะมีความแข็งแรงต่อการดัดในการต้านทานต่อผลของการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัดคงที่ได้อย่างต่อเนื่องถึงจุดหนึ่ง ในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งเป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบมีค่าแรงสูงสุดเกิดได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติ โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก

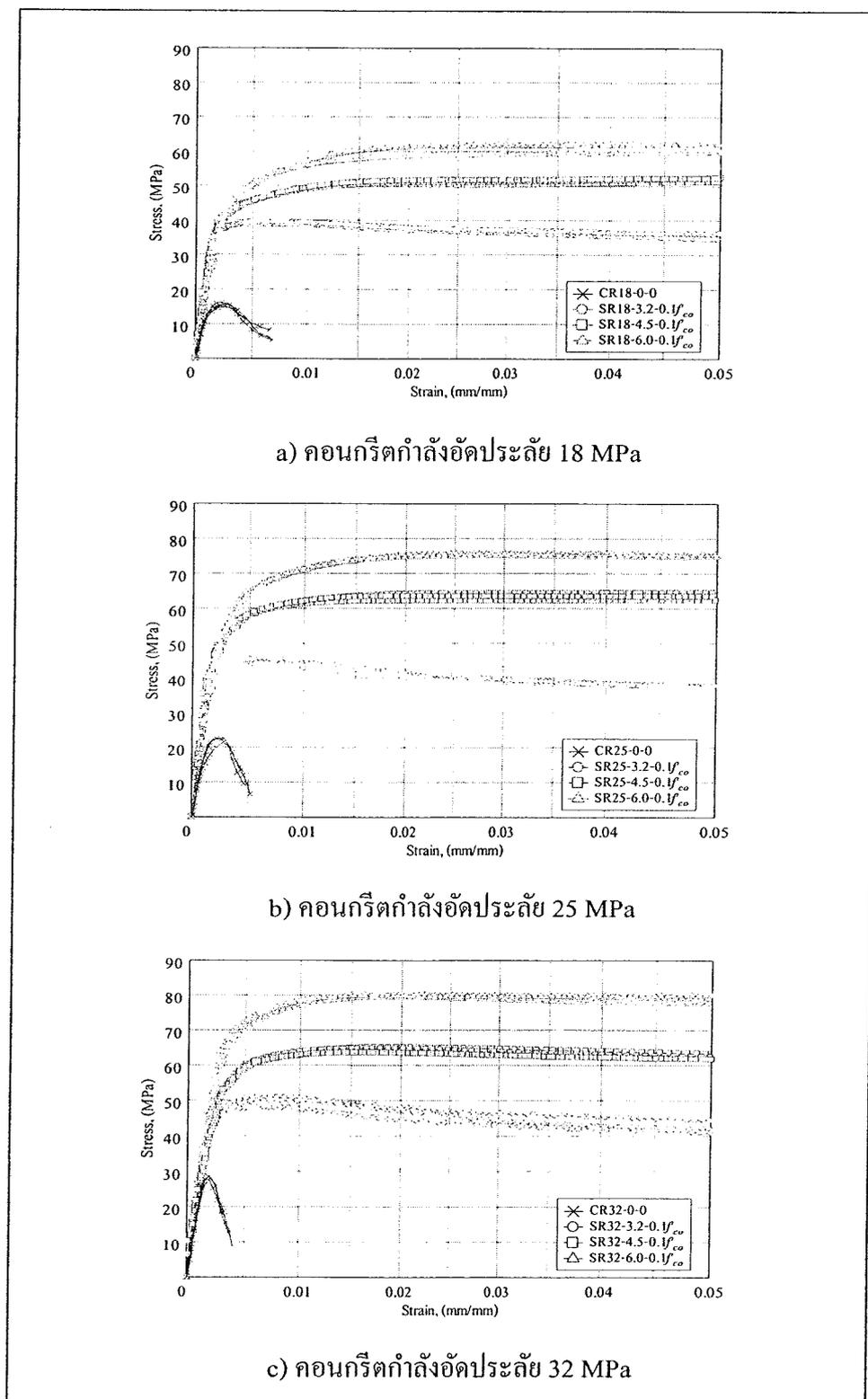
แบบที่ 3 เมื่อรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะมีความแข็งแรงลดลงหรือ Strain softening เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ S18 - 3.2 S25 - 3.2 และ S32 - 3.2 เป็นตัวอย่างทดสอบที่มีผนังของปลอกเหล็กบาง (3.2 mm) และในตัวอย่างทดสอบ S18 - 4.5 S25 - 4.5 และ S32 - 4.5 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีผนังของปลอกเหล็กหนาปานกลาง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



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ไม่มีการให้หน่วยแรงไอบรอดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)



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



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

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีคาร์โบไบนีทให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ						พฤติกรรมการรับแรง
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)		
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 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีภาระให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ต่อ)

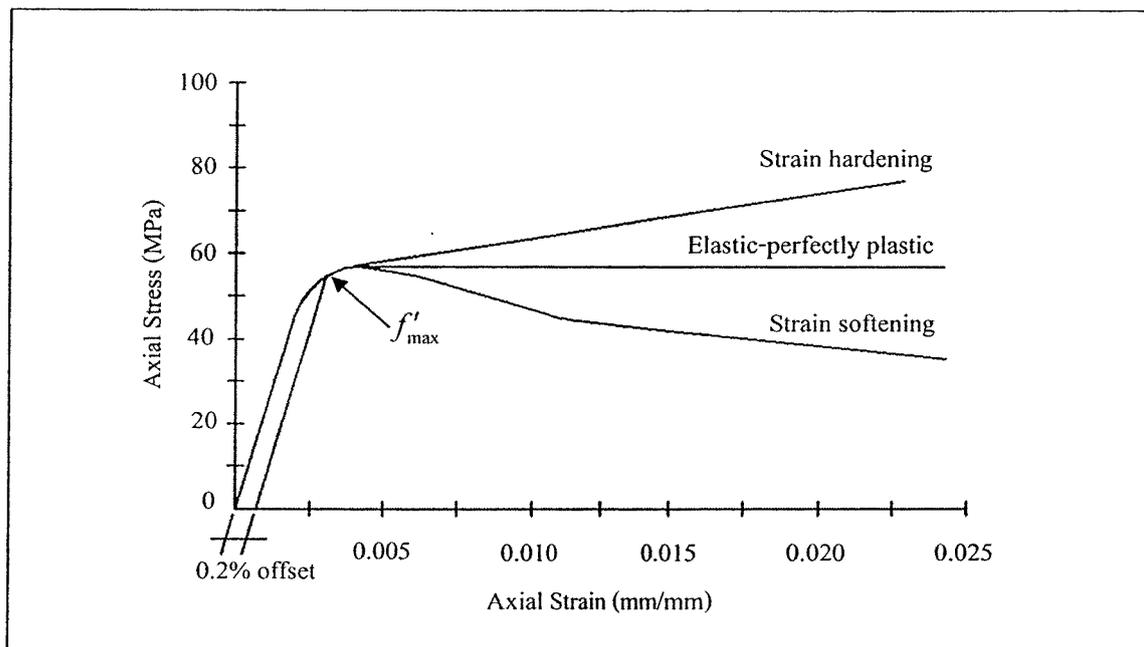
กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ							
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)	พฤติกรรมการรับแรง		
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	39.09	2.52	0.41	1.58	23.24	Strain softening		
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	43.64	2.00	0.36	1.30	27.59	Strain softening		
	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							พฤติกรรมการรับแรง
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon''}$	ความแข็งแรง (GPa)			
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 มีการให้หน่วยแรง โอบริคก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ และ 0.08 ตามลำดับซึ่งจะก่อให้เกิดการโอบริคแกนคอนกรีตทำให้ ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16-4.18 เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยคอนกรีตและความหนาปลอกเหล็กที่เท่ากัน พบว่าค่าความแกร่งหรือค่าความชันของ ตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรง โอบริคก่อนที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อ พิจารณากำลังอัดประลัยที่เท่ากันและการให้หน่วยแรง โอบริคก่อน ที่มีค่าเท่ากันค่าความแกร่งของ ตัวอย่างทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาปลอกเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยที่ความชันของ ตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ และตัวอย่างทดสอบกลุ่ม ที่ 3 และ 4 นี้จะมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงมีค่าประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุด (f'_{max}) ซึ่งสูง กว่าในกรณีของกลุ่มที่ 1 และ 2 เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มการให้หน่วยแรง โอบริคก่อนแก่ ตัวอย่างให้สูงขึ้นทำให้พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

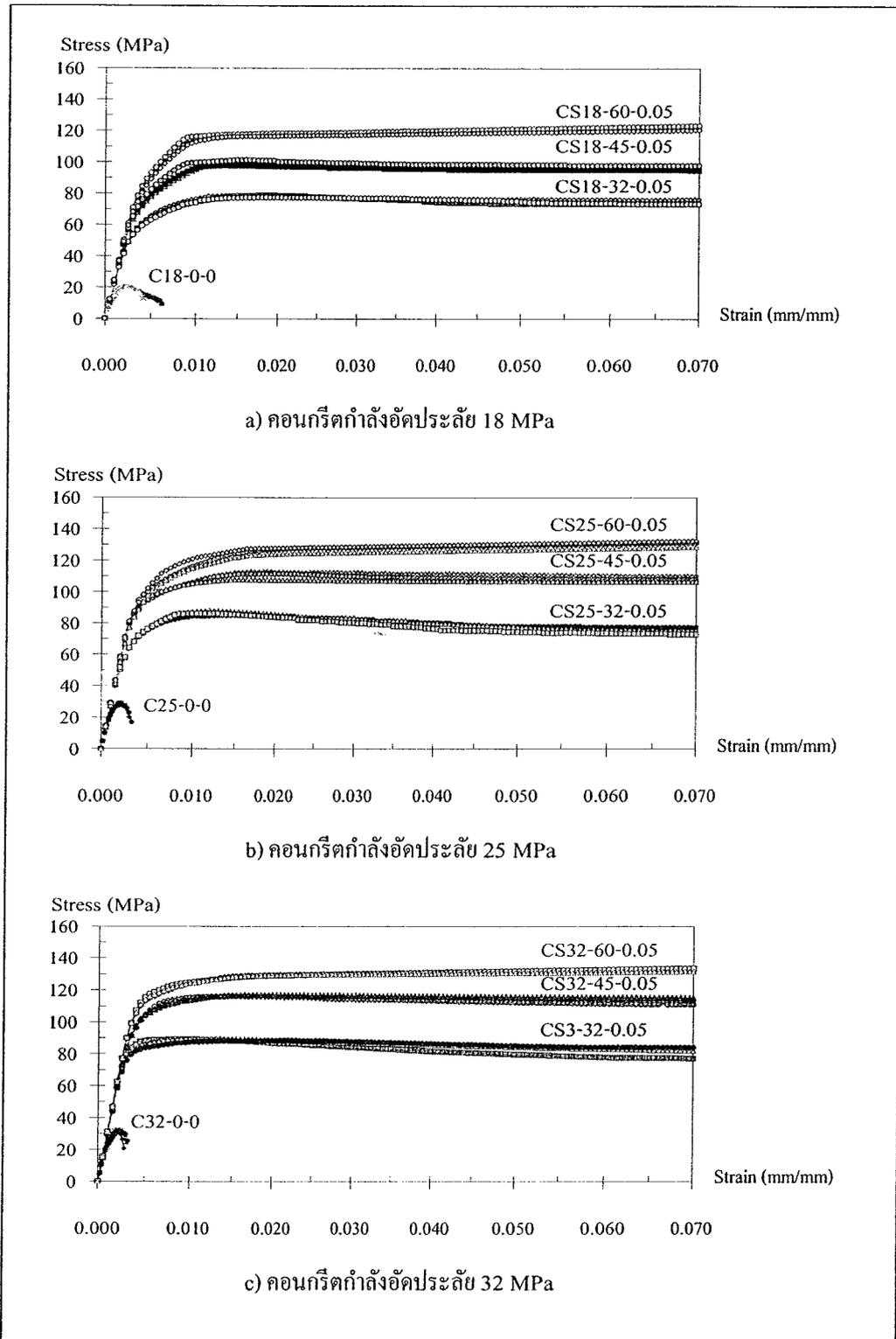
หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ค่าความชันของกราฟจะ เริ่มลดลงเรื่อย ๆ เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวในอัตราที่เร็วขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านข้างและแรงคั้นทางด้านขวางกระทำตั้งฉากต่อผนังของปลอกเหล็ก ทำให้เกิดการรับแรงกระทำร่วมกันระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง ด้วยปลอก เหล็กจะทำหน้าที่ช่วยจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าว เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรง กระทำได้สูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนได้สูงขึ้นก่อนการวิบัติ จากการศึกษา พบว่าพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้ ซึ่ง แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16-4.18

แบบที่ 1 พฤติกรรมแบบ Strain hardening เกิดขึ้นจากการที่ตัวอย่างทดสอบ สามารถรับแรงกระทำในแนวแกนได้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบริค ด้วยปลอกเหล็กความหนาสูง (6.0 มิลลิเมตร) เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแกร่งมากเพียงพอ สามารถจำกัดการขยายตัวทางด้านของแกนคอนกรีตหลังจากรับกระทำได้เป็นอย่างดี โดย พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ CS18-60-0

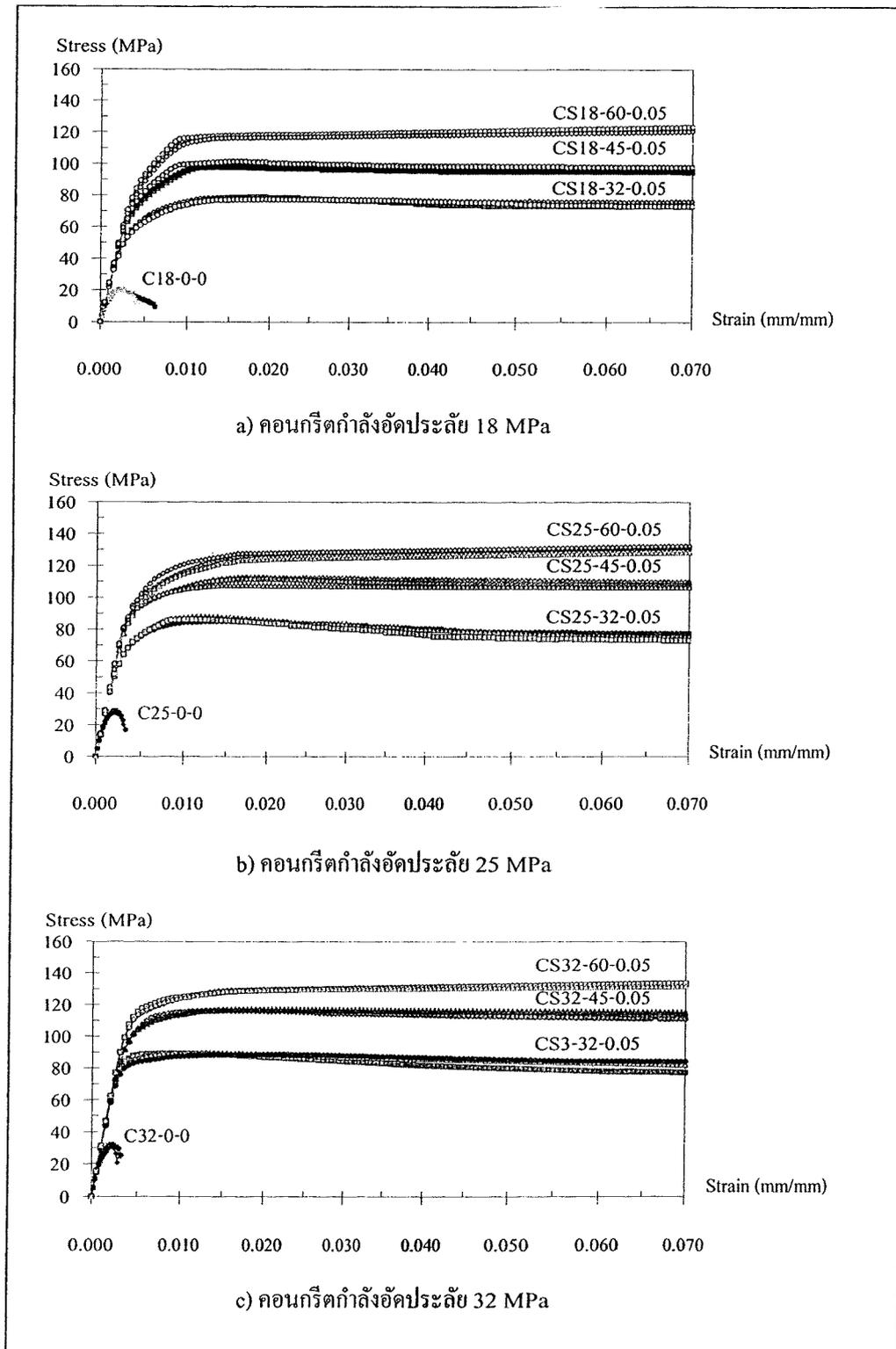
แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ Elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่ง โดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์ เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแกร่งในการต้านทานการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ โดยส่วนใหญ่พฤติกรรมเช่นนี้จะเกิดกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 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 เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแกร่งไม่เพียงพอที่จะจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต ดังนั้นหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดสูงสุด จึงไม่สามารถต้านทานแรงได้อีก และเกิดการโป่งออกทางด้านข้างที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร โดยการโป่งออกทางด้านข้างเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางสูงของตัวอย่างทดสอบ ดังในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26

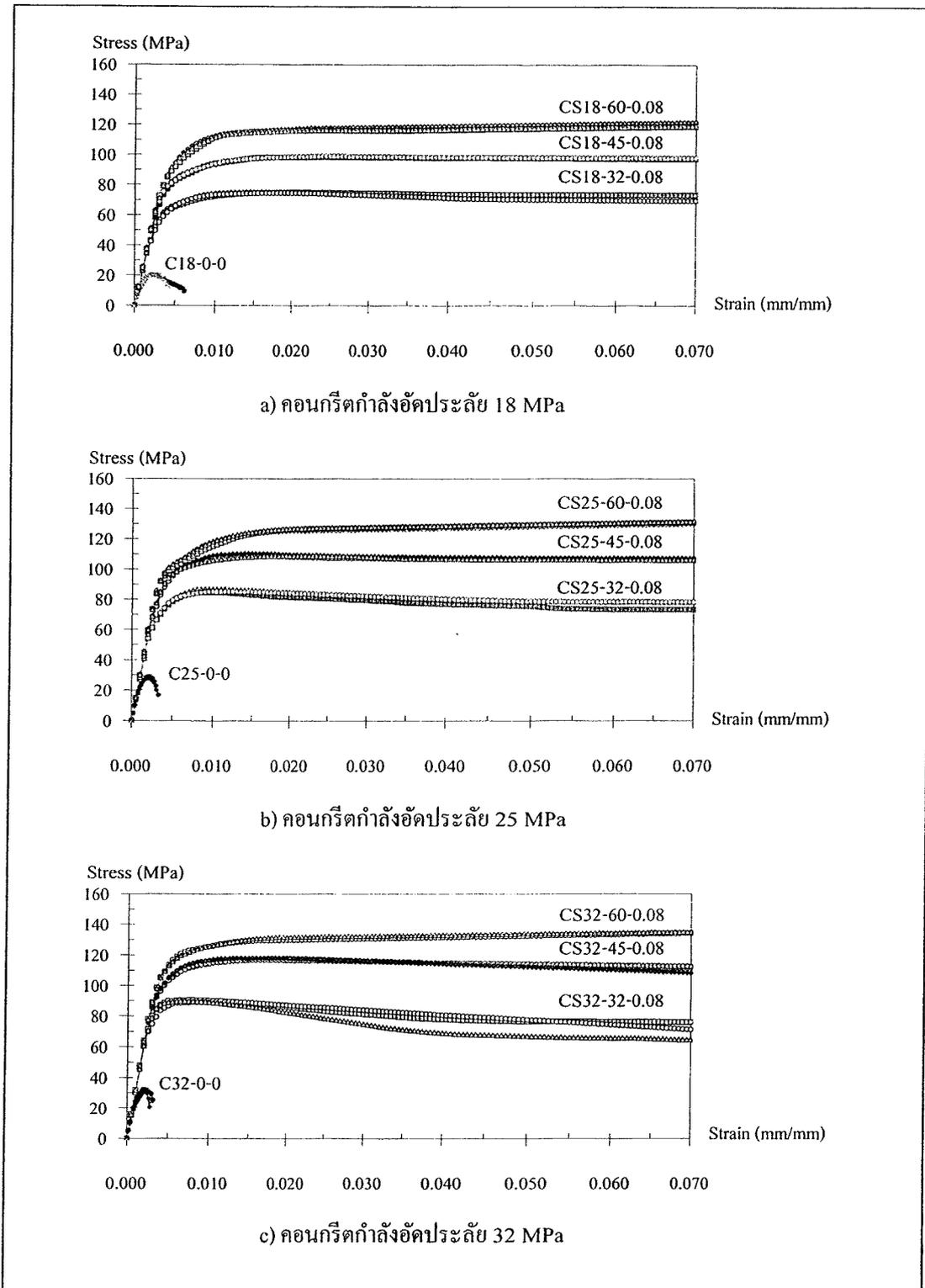
โดยสรุปพบว่า การให้แรงโอบรัดทางด้านข้างต่อตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น แต่ความหนาของปลอกเหล็กจะมีผลทำให้พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น โดยตัวอย่างทดสอบที่มีปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร จะมีพฤติกรรมเกิดขึ้น 2 รูปแบบ คือ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic ซึ่งเหมาะนำไปใช้งาน เพราะตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม
ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)



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



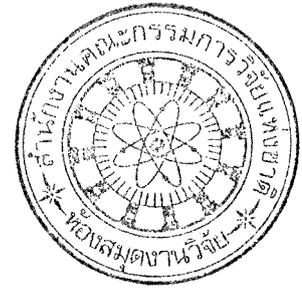
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม
 ที่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ขนาด $0.08 f'_{co}$ (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทดสอบหน้าตัดกลมที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ							พฤติกรรมการรับแรง
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)			
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						พฤติกรรมการรับแรง
		f'_{max} (MPa)	$\frac{f'_{max}}{f'_{co}}$	ϵ'_{max} (%Strain)	$\frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon_u}$	ความแข็งแรง (GPa)		
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

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

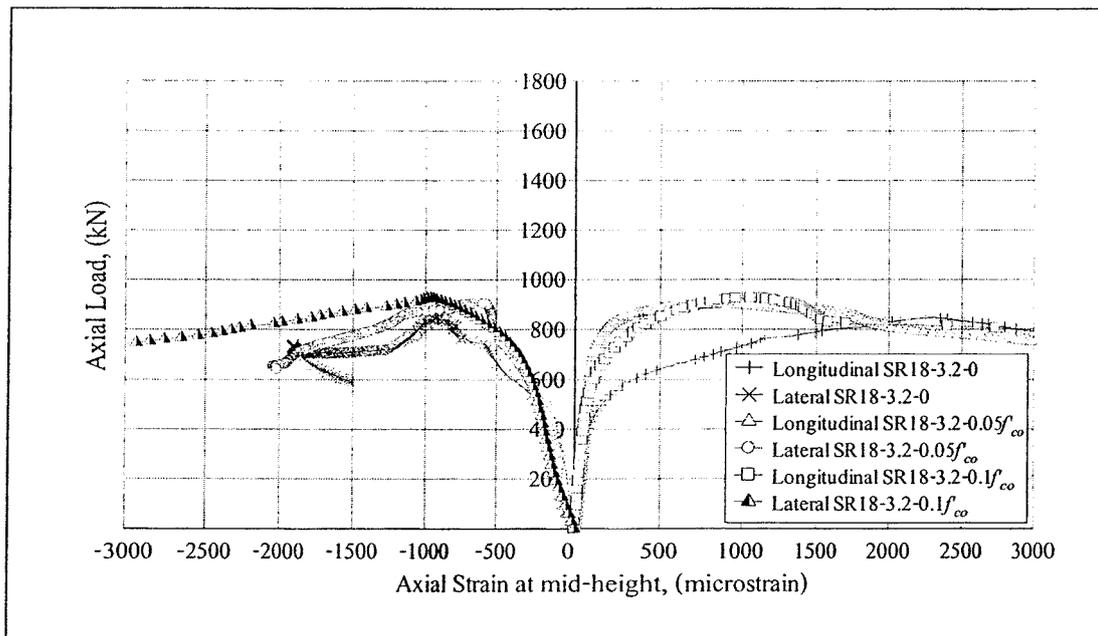
โดยที่ σ คือ หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็กซึ่งได้จากสมการ 4.1
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก

(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) จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตที่ปลายของตัวอย่างทดสอบบางส่วนได้ถูกถ่ายไปยังปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบอย่างต่อเนื่องจากจุดที่แรงเริ่มกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก Interaction ระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็ก โดยอาศัย Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตเป็นระบบถ่ายแรงหลัก (Johansson, M., 2000) โดยในส่วนช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนแนวโน้มเป็น

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

ในช่วงที่สองความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกดอัดที่กระทำต่อแกนคอนกรีตได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับอัตราที่เพิ่มขึ้นของแรงกระทำซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าปลอกเหล็กยังช่วยรับแรงกดอัดในสัดส่วนที่เพิ่มสูงมากขึ้น 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 จึงทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต 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

จากการศึกษาวิจัยของเสา Tubed Concrete column หน้าตัดกลมที่ถูกกระทำ โดยแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตของเสาเช่นเดียวกับที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งสามารถคำนวณ โดยใช้ Nonlinear finite element analysis (Johansson, M., 2000) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัด ในแนวแกนที่ถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กนั้นจะมีค่าไม่เกิน 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 โกงเคาะเฉพาะที่และไม่สามารถที่จะพัฒนาการ 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	-	-	-	-
	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
2	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 เปรอ์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปดอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ความเครียดใน ปดอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปดอกเหล็ก (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 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปดอกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

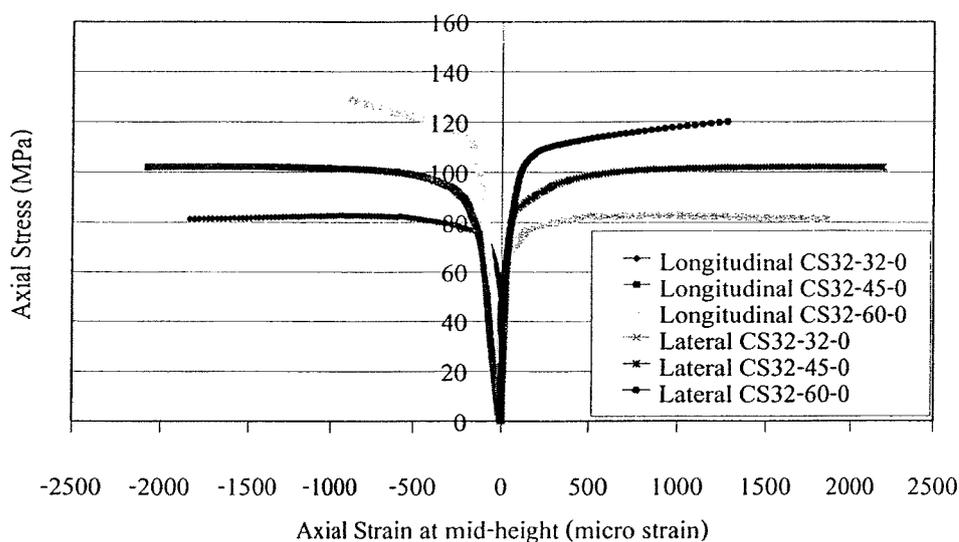
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อ)

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) ของบล็อกเหล็กที่ใช้โอบรัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังรูปที่ 4.20 โดยใช้ Strain gauge ในการวัดค่าความเครียด บริเวณกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ ในช่วงแรกแกนคอนกรีตจะทำหน้าที่หลักในการรับแรงกระทำในแนวแกน หลังจากนั้นจะเกิดการถ่ายแรงกระทำบางส่วนไปยังบล็อกเหล็ก ซึ่งบล็อกเหล็กมีส่วนช่วยรับแรงกระทำร่วมกับคอนกรีตจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ สำหรับการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างแกนคอนกรีตกับบล็อกเหล็กโดยอาศัย Micro interlocking และความเสียดทานของผิวสัมผัสด้านในระหว่างบล็อกเหล็กและแกนคอนกรีต (Johansson, 2000)

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



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางเกิดขึ้นที่บล็อกเหล็กที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ 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 ทำให้ผนังปลอกเหล็กเกิดการ โกงตัวเฉพาะที่ไม่สามารถพัฒนาการ โอบรัดต่อแกนคอนกรีตได้

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)

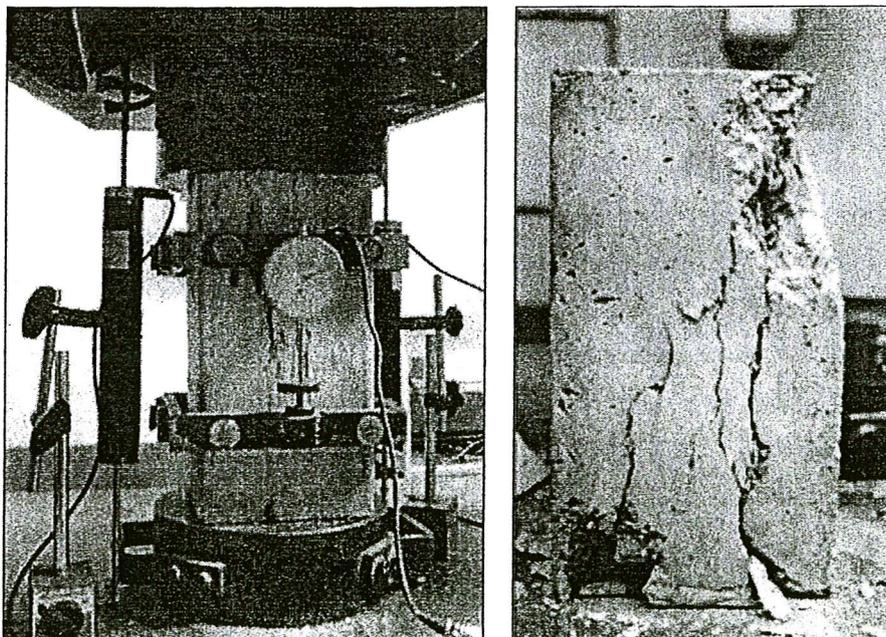
กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	P'_{max} (kN)	f'_{max} (MPa)	ความเครียดใน ปลอกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปลอกเหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดอัด (%)
4	CS18-32-0.08	1031.4	67.0	117	23.6	36.3	3.5
	CS25-32-0.08	1177.6	76.5	175	35.3	54.3	4.6
	CS32-32-0.08	1360.8	88.4	576.6	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 คือ (1) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

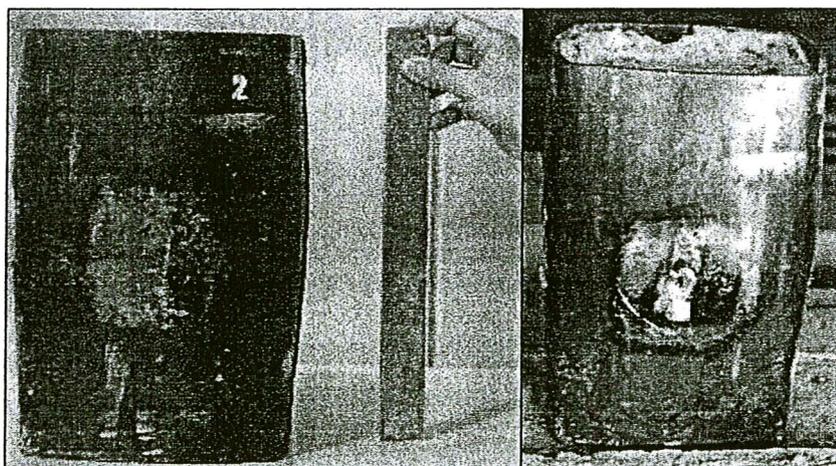
(1) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

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

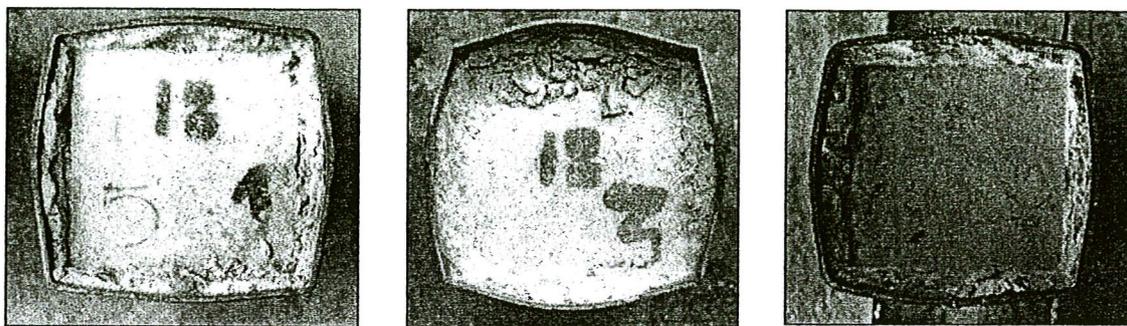


รูปที่ 4.21 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง

สำหรับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 นั้นพบว่า มีลักษณะคล้ายกันเมื่อทำการทดสอบให้แรงกดอัดในแนวแกน โดยควบคุมการให้แรงกระทำอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอเริ่มต้นจากการอัดแตก (Crushing) ของคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำ (ซึ่งเป็นการวิบัติเฉพาะส่วน (Local failure) และเกิดจากหน่วยแรงรวมศูนย์ (Stress concentration)) ช่วงแรกลักษณะการหดตัวในแนวแกนมีค่าน้อยมากและไม่แสดงอาการภายนอกให้เห็น ในช่วงต้นเมื่อการหดตัวลงในแนวแกนและการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก Poisson's effect โดยการขยายตัวทางด้านข้างจะก่อให้เกิดแรงดัดกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กประกอบกับปลอกเหล็กอยู่ในรูปของแผ่น (Plate) และความแกร่งต่อการดัดไม่สูงมากนักกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกน เนื่องจาก Micro - interlocking และแรงเสียดทานที่ถ่ายมาจากแรงกดอัดของคอนกรีต ส่งผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กอยู่ในสภาพ Beam - column และเป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็ก จะเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำอย่างรวดเร็ว โดยการ โกงเดาะของผนังของปลอกเหล็กดังกล่าวจะเกิดขึ้นมากที่สุดในบริเวณที่กึ่งกลางความสูง ช่วงความสูง 100 - 150 mm ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ดังนั้นปลอกเหล็ก จึงไม่มีความสามารถในการโอบรัดคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามปลอกเหล็ก ดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าด้วยกันและทำให้การอัดแตก (Crushing) ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงมีความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่องและทำให้แรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็ก ตามกลไก (Mechanism) เมื่อการ โกงเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่าสูงมากขึ้นแล้วนั้น ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบมีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติโดยรวม



รูปที่ 4.22 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างลักษณะหน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีความหนา 3.2 4.5 6.0 mm

(2) ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม

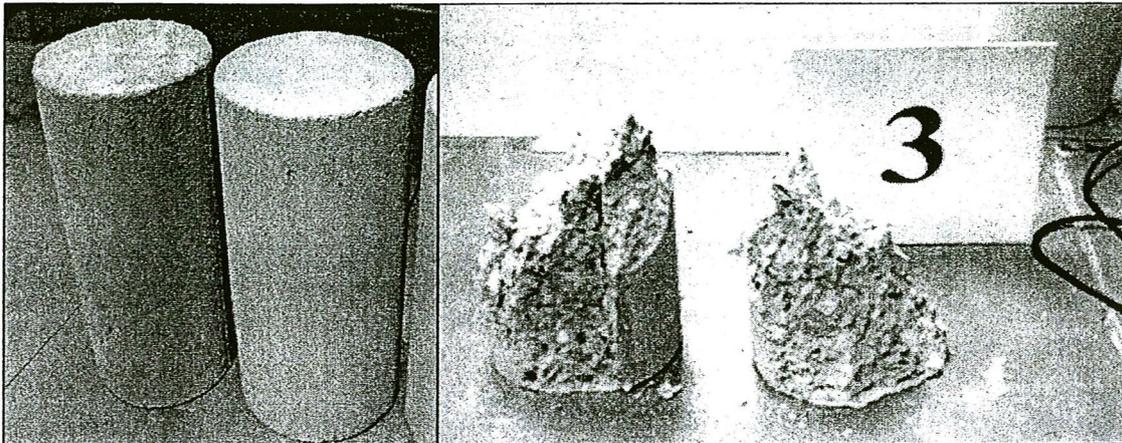
จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive failure) โดยจะหยุดการทดสอบที่ระยะการหดตัวที่ 25 มิลลิเมตร เทียบเท่ากับค่าความเครียดประมาณ 0.080 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเครียดปลายของคอนกรีตประมาณ 30 เท่า และตัวอย่างทดสอบจะยังไม่เกิดการวิบัติที่สมบูรณ์ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ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

การวิบัติของตัวอย่างอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) หลังจากตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงเริ่มรับแรงกระทำอย่างช้า ๆ และตัวอย่างทดสอบเริ่มมีการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ ซึ่งรูปแบบของการวิบัตินั้นมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติคอนกรีตกำลังอัดปกติทั่วไป ตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงกดอัดร่วมกัน โดยทำมุมประมาณ 50 องศา และลักษณะการวิบัติเป็นรอยแตกแบบเฉือนหรือรูปกรวยคังแสดงในรูปที่ 4.24

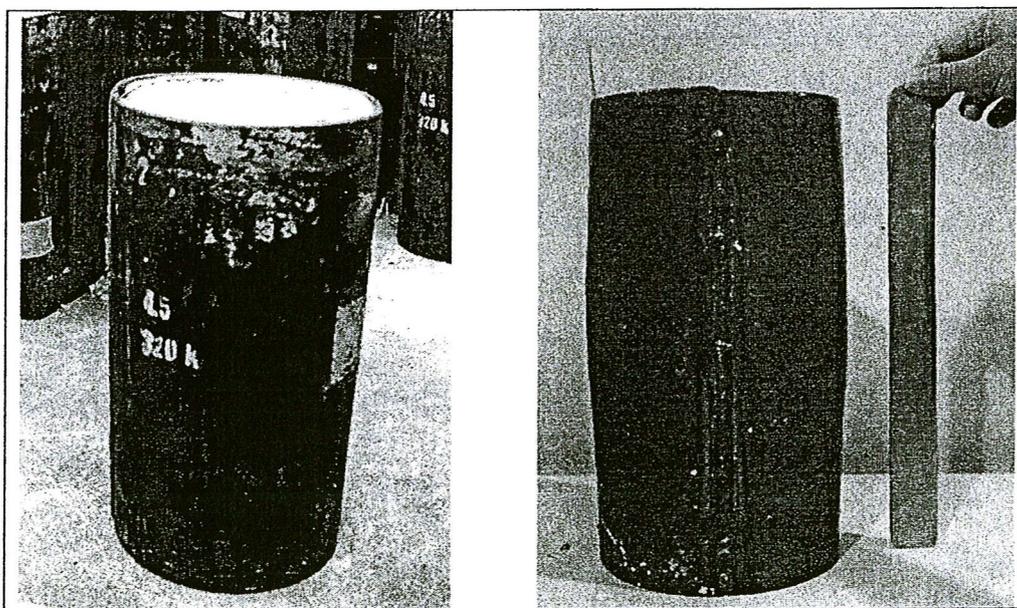
สำหรับการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน โดยเกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีตซึ่งดันผนังปลอกเหล็กให้เกิดการโป่งตัวออกทางด้านข้าง โดยเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26

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

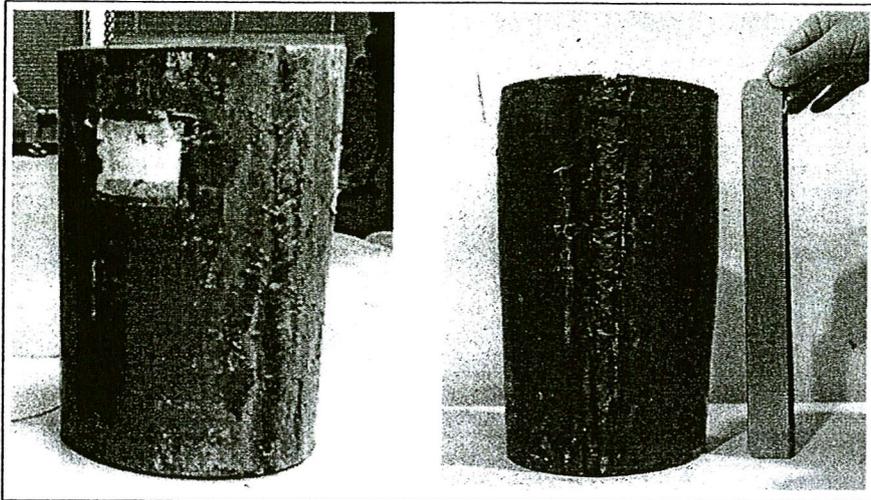
มาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของ ว.ส.ท. 1008-38 และ AISC/LRFD โดยที่ความหนา
ปลอกเหล็กทั้ง 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร



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 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนจากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4.23 - 18.76% และ 7.25 - 27.00% ที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.05 f'_{co}$ และ $0.1 f'_{co}$ ตามลำดับ เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} เท่ากัน 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} สูงขึ้นจาก 18 MPa เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก) - (ค) และอัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมี

แนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้นในปลอกเหล็กที่มีความหนา 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 $0.1 f'_{co}$ แต่มีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่มากขึ้น อีกทั้งอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มน้ำเพิ่มสูงขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังอัดประลัย (f'_{co}) ที่ต่ำ (18 MPa) และปลอกเหล็กที่มีค่าความหนา 6.0 mm นั่นคือ SR18-6.0-0.1 f'_{co}

ตารางที่ 4.10 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส
เมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปลูกเหล็ก

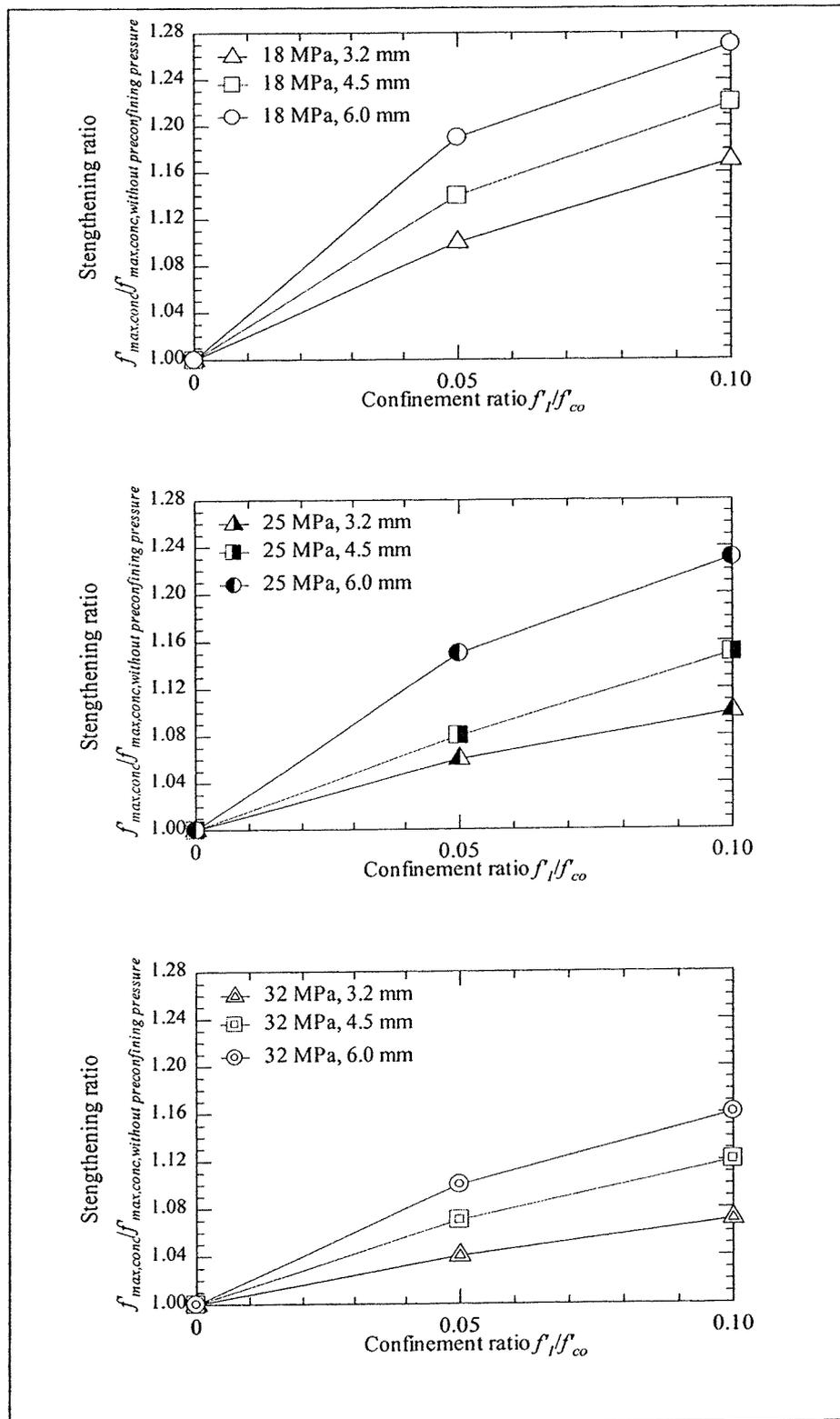
กลุ่ม	ตัวอย่าง	f'_{max} (MPa)	P'_{max} (kN)	แรงกดอัดในแนวแกน ของคอนกรีต $P'_{max,conc}$ (kN)	หน่วยแรงกดอัด ในแนวแกนของ คอนกรีต $f'_{max,conc}$ (MPa)
2	SR18-3.2-0	35.50	798.64	501.05	22.27
	SR25-3.2-0	39.90	897.84	624.58	27.76
	SR32-3.2-0	44.72	1006.26	717.45	31.89
	SR18-4.5-0	40.48	910.70	622.13	27.65
	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
เมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปดกเหล็ก (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 นอกจากนั้นการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนจากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ไปยังมีการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างเพิ่มขึ้นเป็น $0.05 f'_{co}$ นั้นทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้นจาก $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ ซึ่งการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ นั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะ

ช่วยทำให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นยังช่วยให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

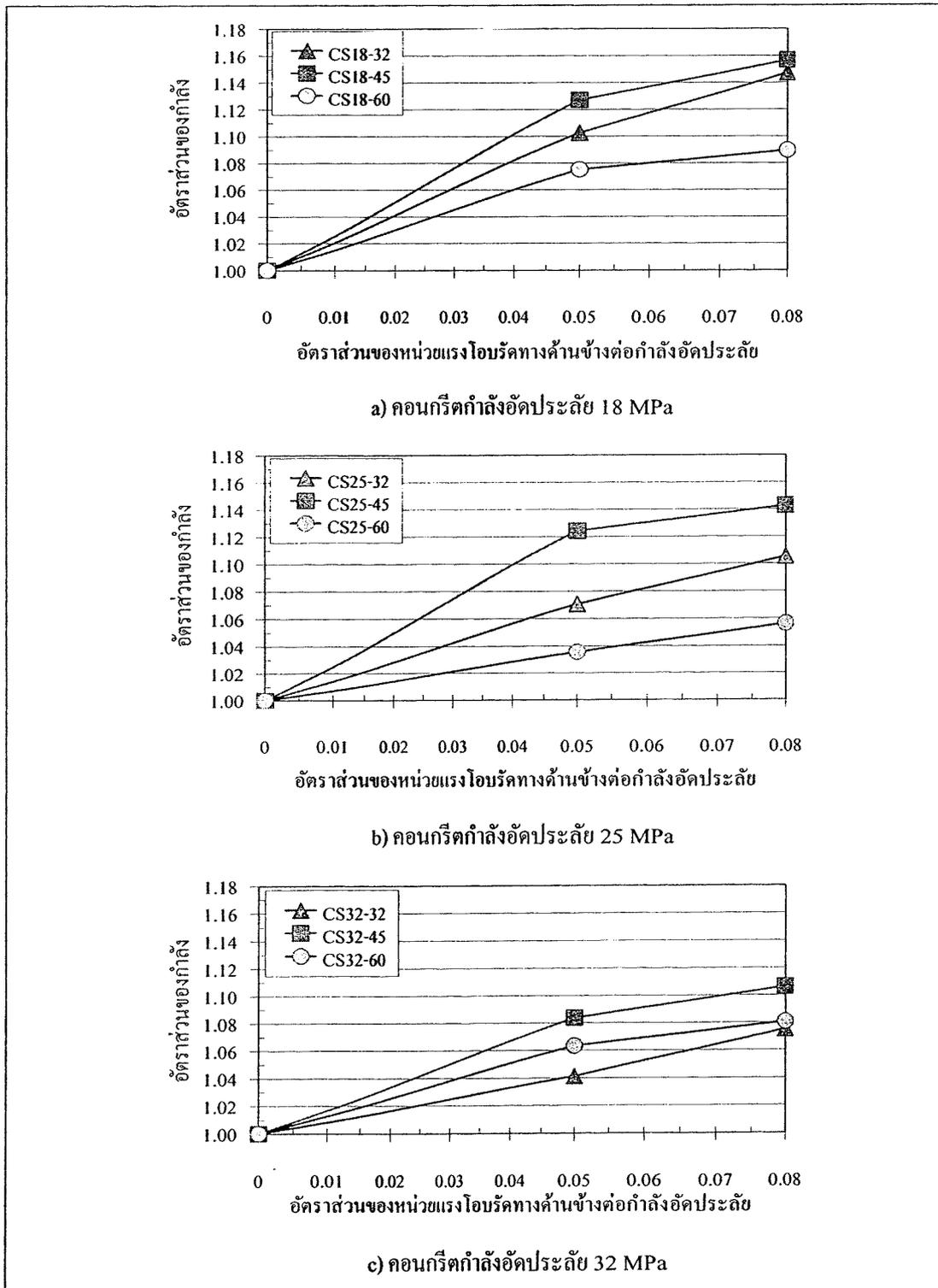
จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ($f'_{\max} / f'_{\max,0} f'_{co}$) และอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดก่อนต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยของคอนกรีตและความหนาที่เท่ากันพบว่า 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 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงไอบริคก่อนเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการให้หน่วยแรงไอบริคก่อนและอัตราส่วนของหน่วยแรงไอบริคก่อนต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

4.2.5 ผลของหน่วยแรงโอบรัดก่อนต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาถึงผลของการเพิ่มหน่วยแรงโอบรัดก่อนให้แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตจากสมการในการทำนํายกําลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้นข้าง (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 และเมื่อพิจารณาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตขอนิยามให้ $f'_{max,conc}$ คือ หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นของคอนกรีต สามารถคำนวณได้จากการนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ปลดออกเหลือหักออกจากค่า 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 จะขึ้นอยู่กับความแรงแรงของปลดออกเหลือที่นำมาโอบรัดตัวอย่างทดสอบ และผลของ Active confinement เกิดจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลดออกเหลือ ดังนั้นจากคํานิยามข้างต้นได้แสดงไว้ในสมการที่ 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 หน่วยแรงของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลดออกเหลือและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (หน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)

นิยามให้ ค่า $f'_{max,ac}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement สามารถหาค่าดังกล่าวได้จาก ค่าหน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลดออกเหลือและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด $0.05 f'_{co}$ 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}) และค่าหน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลดออกเหลือและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (หน่วยแรง

กคธคของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 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%

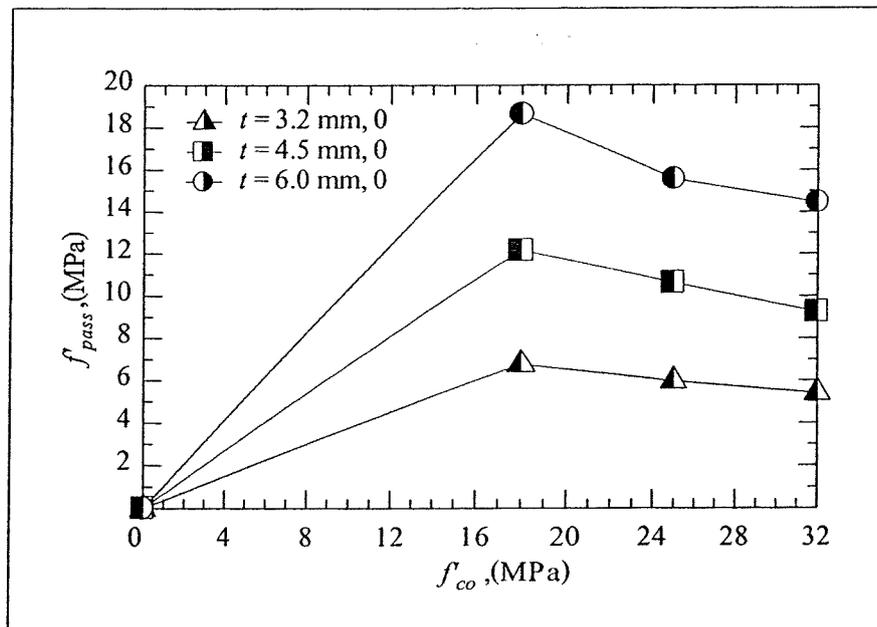
เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรง Passive confinement ที่ f'_{co} เท่ากันค่าหน่วยแรง ดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น พบมากสุดในความหนา 6.0 mm (เช่น จาก 6.77 เป็น 18.64 MPa ใน f'_{pass} ที่ $f'_{co} = 18$ MPa เมื่อปลอกเหล็กหนาเพิ่มขึ้นจาก 3.2 mm เป็น 6.0 mm) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และความหนาเท่ากัน 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

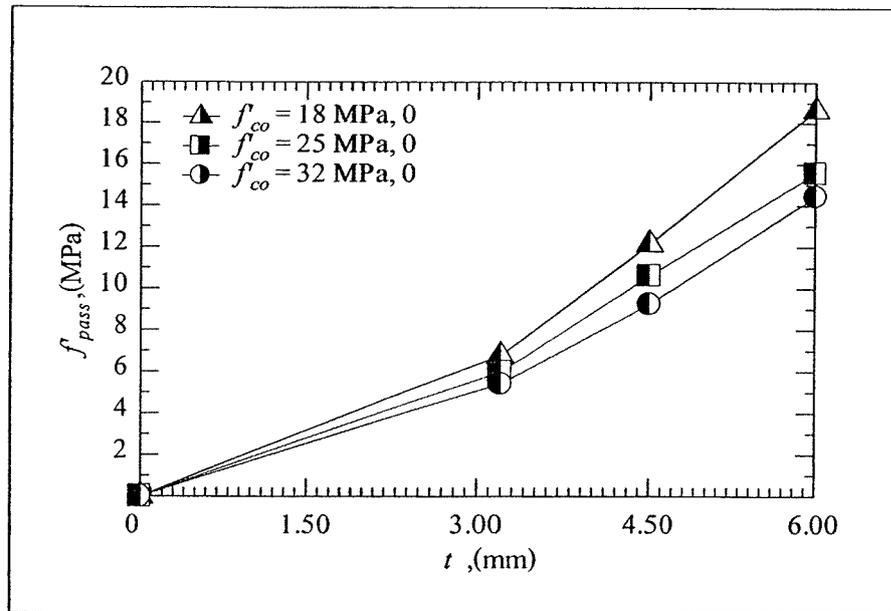
กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการคำนวณตามแบบจำลอง $f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$						
		f_1 (MPa)	k_s	f'_1 (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	f'_{pass} (MPa)	f'_{act} (MPa)
1	CR18-0-0	-	-	-	15.50	-	-	-
	CR25-0-0	-	-	-	21.79	-	-	-
	CR32-0-0	-	-	-	26.47	-	-	-
2	SR18-3.2-0	13.88	0.41	5.69	22.27	15.50	6.77	-
	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



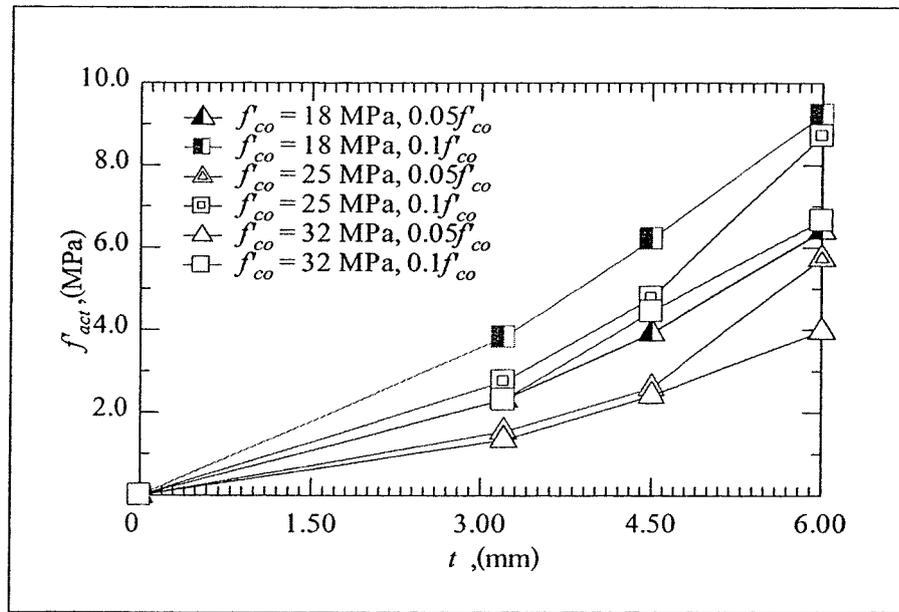
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



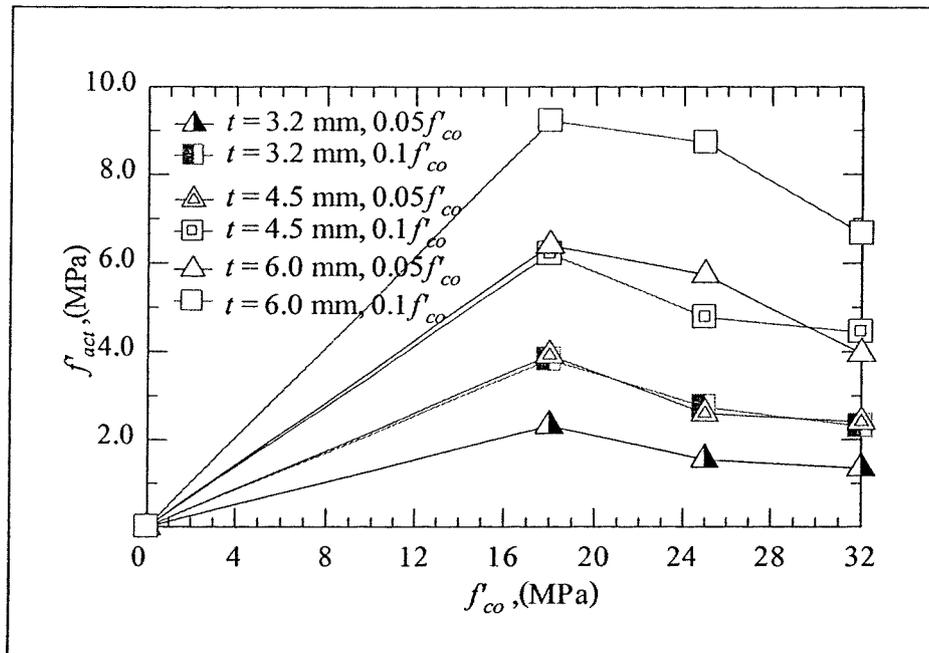
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Passive confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

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

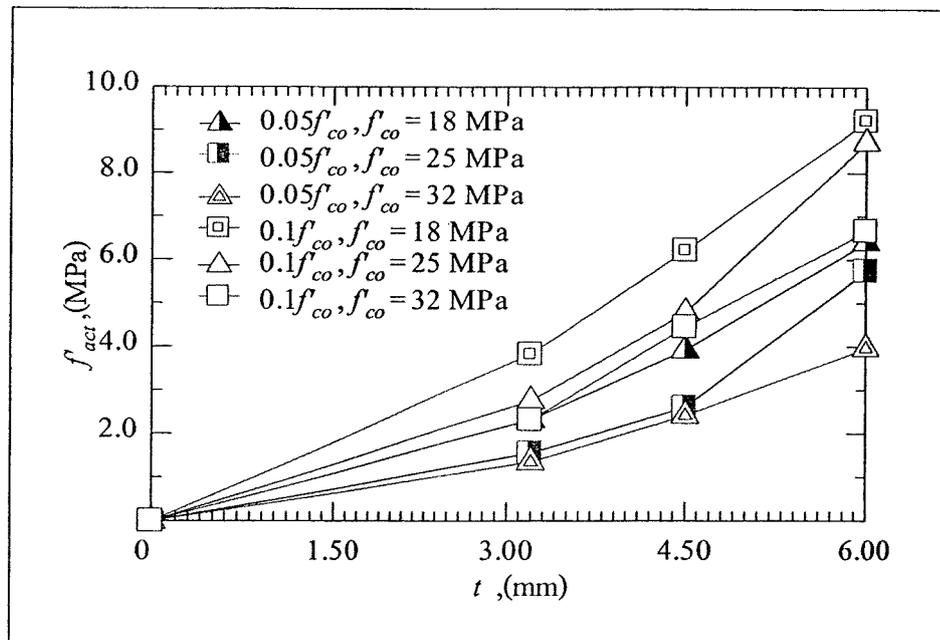
การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ค่าการอัดแรงต่างกัน พบว่าลักษณะกราฟในรูปที่ 4.31 มีรูปร่างแบบโค้งหงายเช่นเดียวกับรูปที่ 4.26 โดยหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement นั้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาที่มากขึ้น และมีค่ามากขึ้นใน f'_{co} ที่ต่ำ (18 MPa) และค่าลดลงเมื่อกำลังปานกลาง (25 MPa) และสูง (32 MPa) ค่า f'_{act} ของตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ ไปยัง $0.1 f'_{co}$ พบว่าค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 43.95 - 84.70% และเมื่อพิจารณาถึงค่า f'_{act} ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เท่ากันพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า 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 มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาที่มากขึ้น (6 mm) และมีมากใน f'_{co} ที่ต่ำ (18 MPa) ซึ่งพบมากที่สุดที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f'_{co}$

นอกเหนือจากนั้นยังได้พิจารณาด้านราคาในการตัดสินใจเพื่อเลือกความหนาและการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาในลำดับต่อไปในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งจำนำเสนอในหัวข้อถัดไป จากตารางที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างราคาค่าก่อสร้างต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน สำหรับการดำเนินงานก่อสร้างตัวอย่างทดสอบคอนกรีต 1 ตัวอย่าง ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วนกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนภายใต้การให้แรงกดอัดในแนวแกนที่เท่ากันโดยคำนึงราคาวัสดุในส่วนกลาง 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 อีกทั้งยังพบว่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อย 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 โดยเมื่อพิจารณาค่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมในการศึกษา นี้พบว่าความหนา 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อน $0.1 f'_{co}$ เป็นตัวแปรที่เหมาะสมในการศึกษา

ต่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (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 เมื่อเปรียบเทียบความหนาที่ 3.2 และ 4.5 mm เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 6.0 mm มีความแกร่งเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านทั้งสองมาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของเสาเชิงประกอบคือ AISC/LRFD และ ว.ส.ท.

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างราคาก่อสร้างต่อกำลังที่สภาวะใช้งานของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตัวอย่าง	ราคาต่อหน่วย (Bant)			กำลังอัดที่สภาวะใช้งาน, $f'_{max,conc}$ (MPa)					ราคา/กำลัง			
	คอนกรีตล้วน	คอนกรีตล้วน +ขี้เถ้า	คอนกรีตล้วน +ขี้เถ้าเหล็ก +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)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	$f'_{max,pass}$ (MPa)	$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ac}$	$f'_{max,ac}$ (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	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	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	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	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	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	85.8	31.9	53.9	0.0	
2	CS18-60-0	1390.1	90.3	120.4	69.9	1320.1	85.8	19.9	65.9	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	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	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)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc}$ (MPa)	$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ec}$						
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	

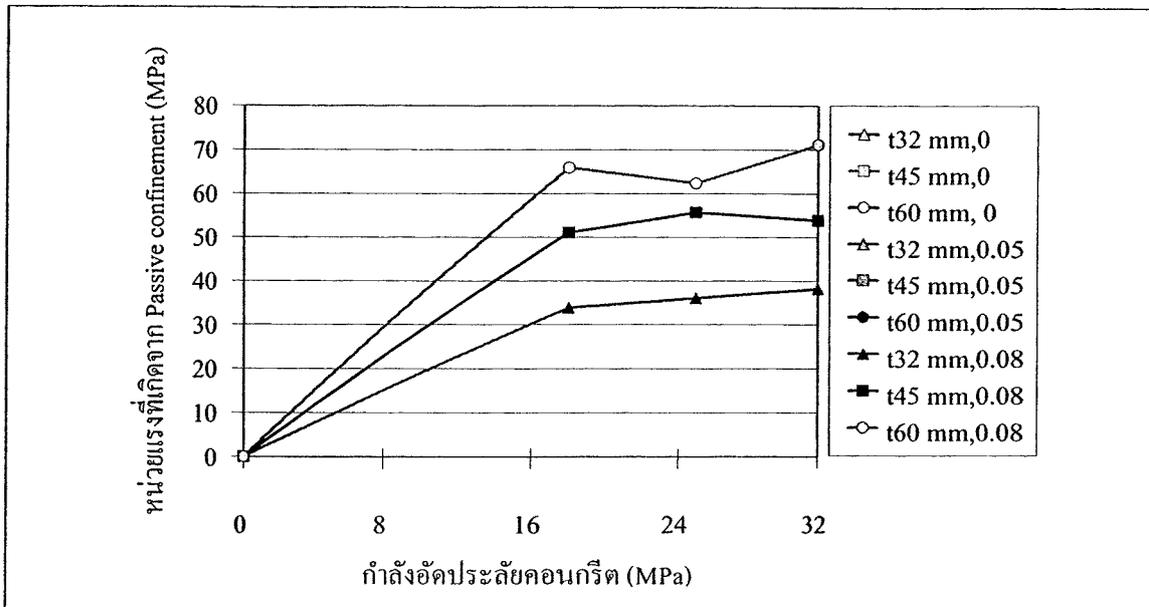
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ									
		P'_{max} (kN)	$f'_{max,conc} = f'_{co} + f'_{max,pass} + f'_{max,ac}$								
		P'_{max} (kN)	$f'_{max,conc}$ (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		

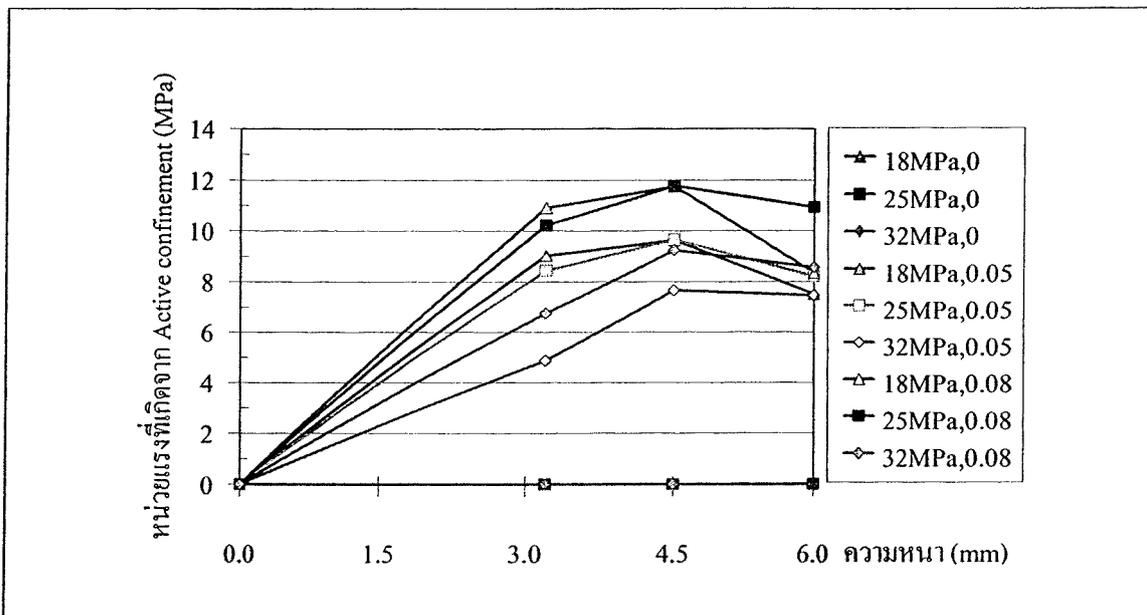
จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบกับค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดจากผล Passive confinement และเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากันพบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความหนาเท่ากันพบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น 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)

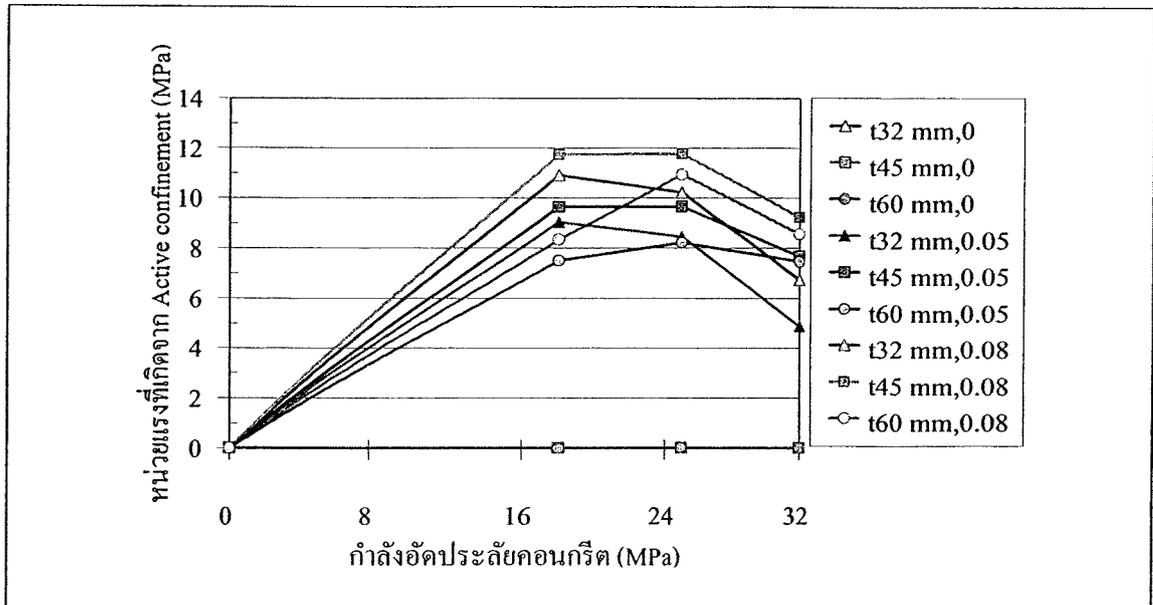
จากรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement โดยที่ลักษณะกราฟมีรูปร่างแบบโค้งคว่ำเช่นเดียวกับรูปที่ 4.33 พบว่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจากกำลังต่ำ (18 MPa) ไปยังกำลังปานกลาง (25 MPa) 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 นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบดังกล่าว ยังมีพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นแบบ Elastic-perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น ลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน เมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบนี้ พบว่าเกิดการโป่งออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตรนี้มีความแกร่งเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านมาตรฐานการออกแบบความหนาดำสุดทั้ง 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 $0.05 f'_{co}$ ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปศึกษาในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 750 มิลลิเมตร ในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูง 750 มิลลิเมตร ในหน้าตัดกลม โดยได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัด ลักษณะการวิบัติ พร้อมทั้งหาสมการการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างทั้งหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดกลม

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 เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการรับแรงของ 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

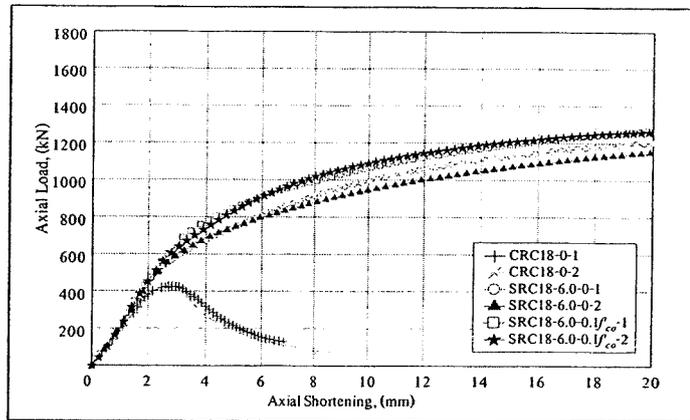
จากรูปในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงและ Tubed RC column มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่เสา คอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมีค่าแรงกดอัดสูงสุด (เหล็กเสริมมีความเครียดถึงจุดคราก) อยู่ช่วงประมาณ 60 - 80% ของแรงกดอัดสูงสุดช่วงที่พิจารณา Tubed RC column (ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเล็กน้อยเนื่องจากมีเหล็กเสริมช่วยรับแรงกดอัด) จากนั้นในช่วงที่สอง เมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกอย่างต่อเนื่องนั้น เหล็กเสริมจะเกิดการครากและในแกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นเนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้นความชัน (Slope) ของเส้นความสัมพันธ์เริ่มลดลงและพฤติกรรมค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรงมากขึ้น ในขณะที่ช่วงเวลานั้นเมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นนั้นและก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำต่อผนังของปลอกเหล็กมากขึ้น 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} ทำให้เหล็กเสริมและคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำเกิดการครากและเกิดแตกร้าว โดยแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะทำการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้อย่างเพียงพอ จากนั้นเมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังปลอกเหล็กจะเกิดการ โกงเคาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตดังกล่าวโดยสามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นปลอกเหล็กจะเกิดพฤติกรรม Strain hardening ทำให้ปลอกเหล็กกลับมามีความสามารถในการจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่งซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งเป็นผลทำให้เสามีค่าแรงสูงสุดเกิดขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา โดยแรงกดอัด

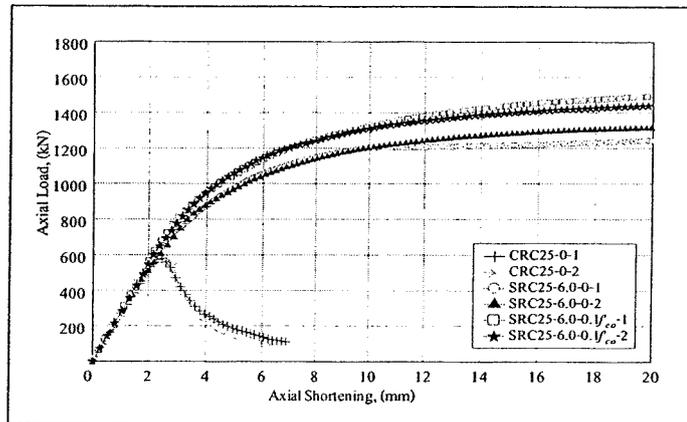
เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจาก โกงเดาะเฉพาะที่ผนังของปลอกเหล็กถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนของเสาตั้งที่แสดงในภาคผนวก ก.

แบบที่ 2 เสารองรับแรงกระทำได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ Strain hardening ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบเสา SRC18 - 6.0 และ SRC25 - 6.0 เป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำและปานกลางในกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดทำให้เหล็กเสริมและแกนคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำ จึงเกิดการแตกร้าวเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้วผนังของปลอกเหล็กจะสามารถต้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างได้เป็นอย่างดีแล้วและปลอกเหล็กทำหน้าที่จำกัด (Contain) แกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกร้าวให้รับแรงกดอัดเพิ่มได้ต่อเนื่องแรงกดอัดในแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ผนังของปลอกเหล็กมีการ โกงเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กในบริเวณกึ่งกลางความสูงของเสา โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีตและผิวด้านในของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางของความสูงของเสานั้น ซึ่งค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางความสูงของเสาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นหลังจากที่แรงกระทำมีค่ามากกว่า P'_{max}

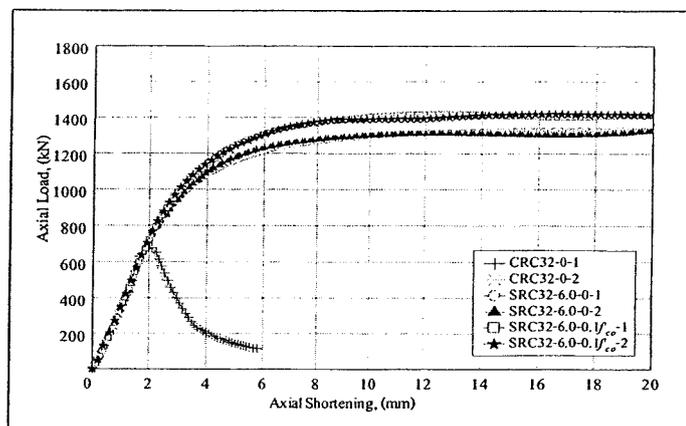
ขอให้สังเกตด้วยว่าการที่ Tubed RC column มีเหล็กเสริมในแนวแกนของเสาทำให้เสามีกำลังและความแกร่งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต อย่างไรก็ตามพบว่าพฤติกรรมในช่วงที่สองของ Tubed RC column มีพฤติกรรมคล้ายกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตในเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงและมีพฤติกรรมที่ต่างไปในเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำและปานกลางอาจเนื่องจากเหตุผลข้างต้นที่กล่าวไปแล้ว



a). คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



b). คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

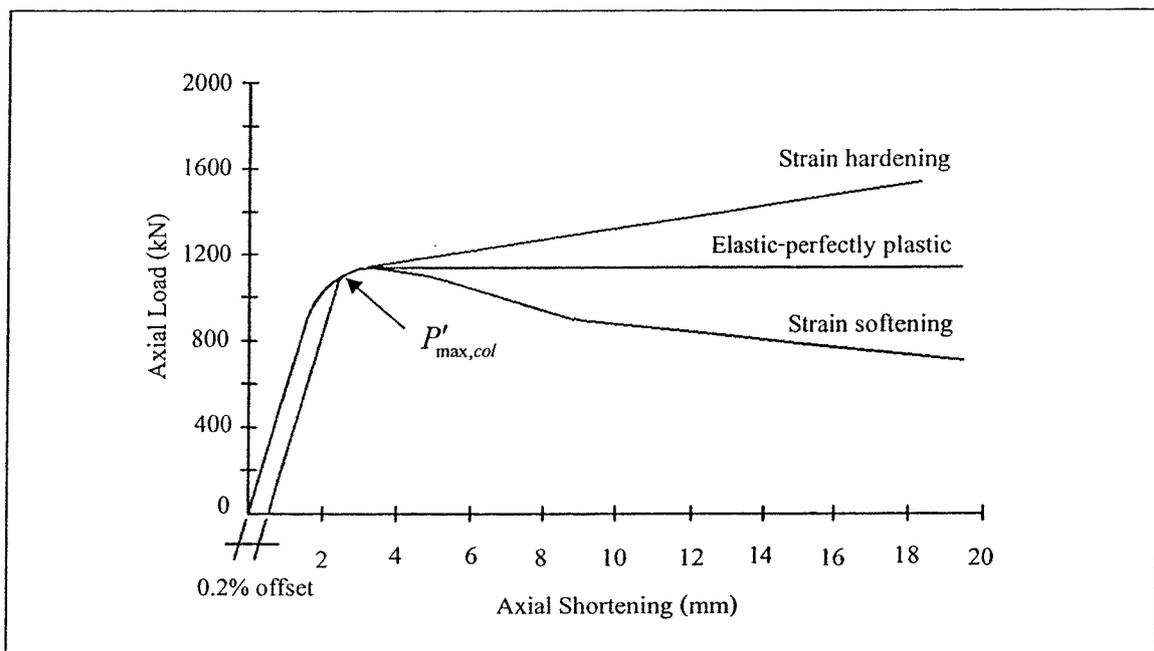


c). คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

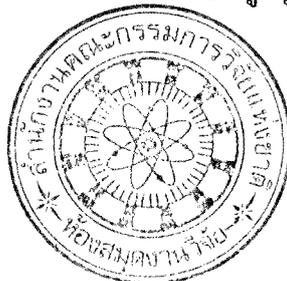
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

(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 $0.05 f'_{co}$ โดยมีตัวแปรที่แตกต่างกัน คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตจำนวน 3 ค่า คือ กำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ 18 25 และ 32 MPa



รูปที่ 4.38 แผนภาพแสดงการหาค่าแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column



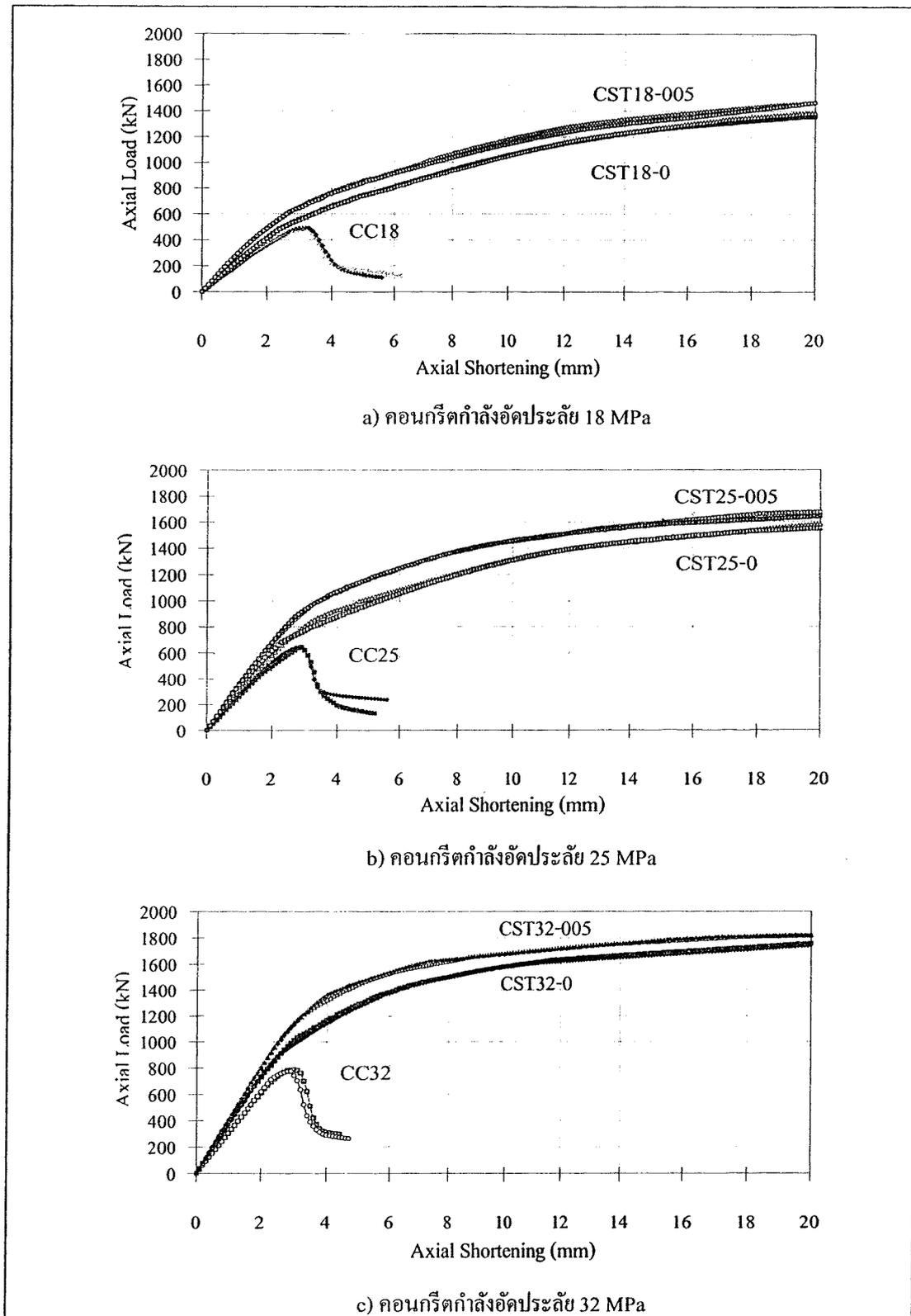
นิยามให้ค่า $P'_{max,col}$ เป็นแรงกดอัดสูงสุด เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร (หรือเกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ระยะการหดตัว 1.5 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และจากรูปที่ 4.37 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial shortening) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ในการศึกษาได้แสดงผลการทดสอบที่ระยะค่าการหดตัว 20 มิลลิเมตร (ประมาณค่าความเครียด 0.0267 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตประมาณ 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 จนกระทั่งเหล็กเสริมคอนกรีตเกิดการคราก และแกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าวมากขึ้นจนเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างสูงขึ้น ส่งผลให้เส้นกราฟจะมีค่าความชันลดลงเรื่อย ๆ จนมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงที่ 2 คือพฤติกรรมแบบ ไร้เชิงเส้นสำหรับเสา Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้ 2 แบบ ดังนี้

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

แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ Elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุดจากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่ง โดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์ เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแข็งแรง ด้านทานขยายตัวออกทางด้านของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ CST18-0 และ CST18-0.05





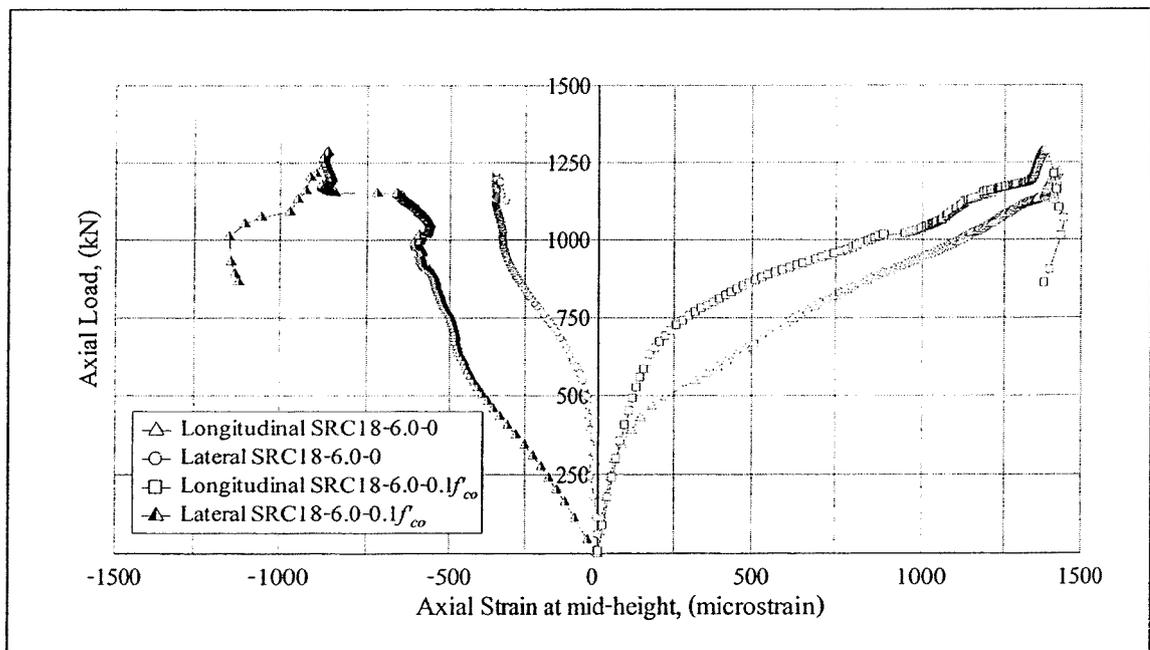
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของ Tubed RC column
หน้าตัดกลม

4.3.2 การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

สำหรับการถ่ายแรงของ Tubed RC Column สามารถแบ่งการศึกษาออกได้ 2 ส่วน
คือในส่วนแรกจะศึกษาในเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และในส่วนที่สอง จะศึกษาในเสาน้ำตัดกลม

(1) น้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

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 โดยแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายเสาบางส่วนถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กโดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.40 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา SRC18-6.0

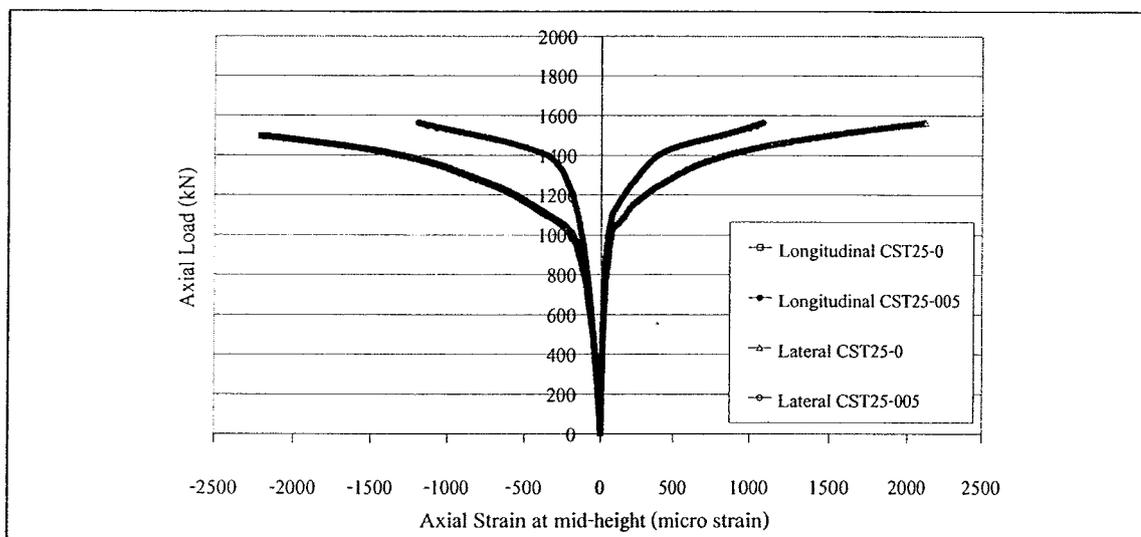
ในลักษณะเช่นเดียวกับในตัวอย่างทดสอบคอนกรีต การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก Interaction ระหว่างแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็กนั้น โดยอาศัย Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและผิวของแกนคอนกรีต ในช่วงแรกความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงจนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 50 - 60% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P'_{max} แสดงว่าการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กไปยังปลอกเหล็กมีค่าที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ในช่วงที่สองความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ ซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าปลอกเหล็กช่วยรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้นกว่าที่แกนคอนกรีตเสริมเหล็กรับ อย่างไรก็ตามการถ่ายแรงในเสา Tubed RC column ซึ่งเกิดขึ้นได้มากกว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตดังจะเห็นจากที่ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กในหลายกรณีมีค่าถึงค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็ก (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 ทำให้เส้นกราฟมีความชันลดลงจนมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น เมื่อเสาทดสอบมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงนี้ จะเกิดการถ่ายแรงกระทำจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กสูงมากขึ้น เนื่องจากแกนคอนกรีตเกิดจากการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มสูงมากขึ้น เมื่อเสาทดสอบรับแรงกระทำสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปลอกเหล็กจะเกิดการต้านทานการขยายตัวของแกนเสาคอนกรีต ทำให้ปลอกเหล็กมีส่วนช่วยรองรับแรงกระทำร่วมกับแกนเสาคอนกรีต และจากการคำนวณ ในตารางที่ 4.16 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัด

ในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปโลกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $P'_{max,col}$ 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 เปรี่เซินต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปดลกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรง P'_{max} ของ Tubed RC column หน้าตัดกลม

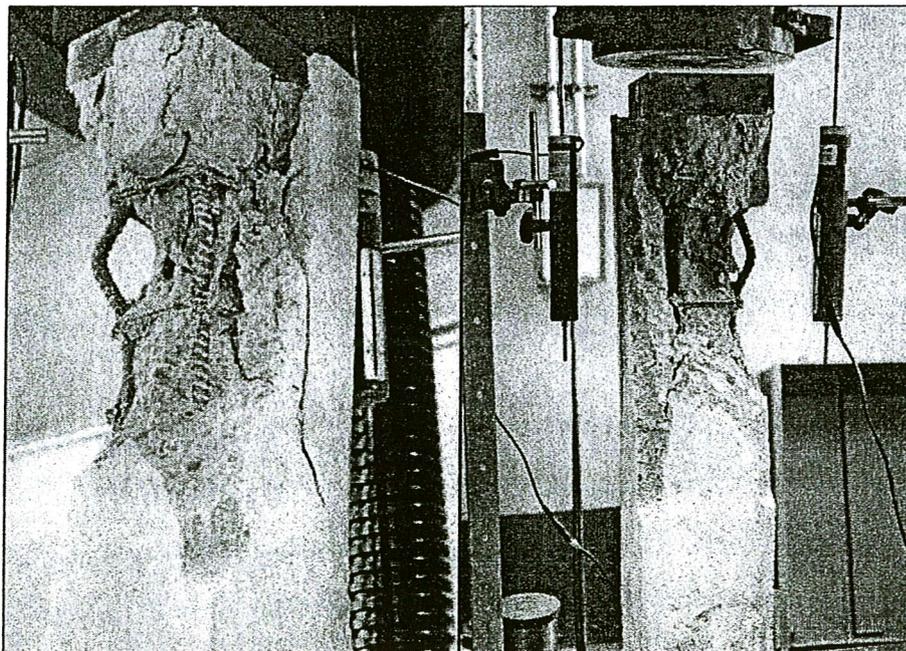
กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{max, col}$ (kN)	$f'_{max, col}$ (MPa)	ความเครียดใน ปดลกเหล็ก (microstrain)	หน่วยแรงเนื่อง จากความเครียด (MPa)	แรงกดอัดในแนว แกนของปดลกเหล็ก (kN)	เปอร์เซินต์ ของแรงกดอัด (%)
1	CC18	485.2	31.5	-	-	-	-
	CC25	643.3	41.8	-	-	-	-
	CC32	752.6	45.6	-	-	-	-
2	CST18-0	773	50.2	75.8	15.5	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 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงอัดก่อน

สำหรับการวิบัติของ Tubed RC Column สามารถแบ่งการศึกษาออกได้ 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกจะศึกษาในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และในส่วนที่สอง จะศึกษาในเสาหน้าตัดกลม

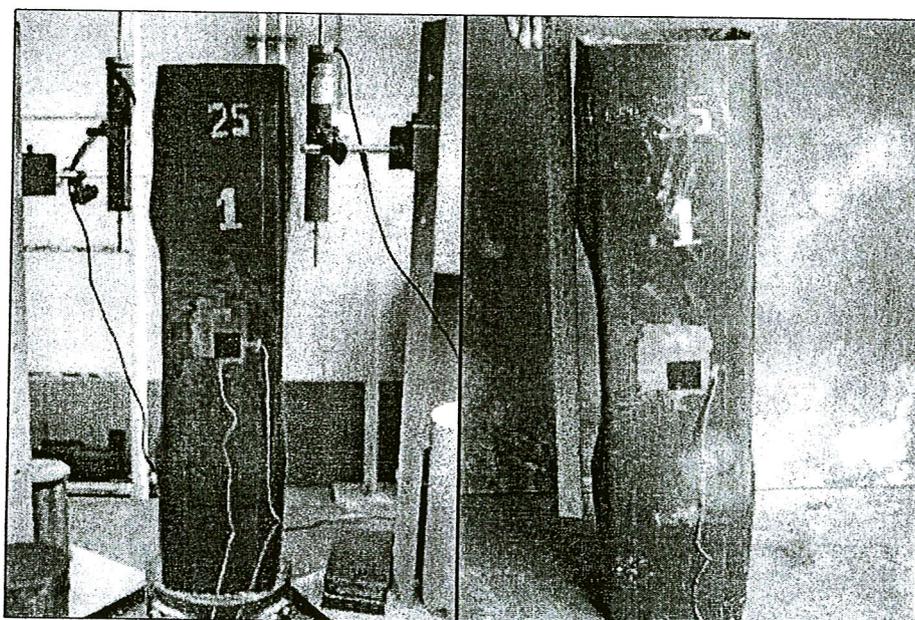
(1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

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 โดยที่ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นโดยเริ่มจากการครากของเหล็กตามด้วยการแตกร้าว (Crushing) ของคอนกรีต เช่นเดียวกับในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 โดยยังคงสามารถรับแรงกดอัดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นและค่าการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก แสดงว่า Tubed RC column มีความเหนียวในแนวแกนที่สูง



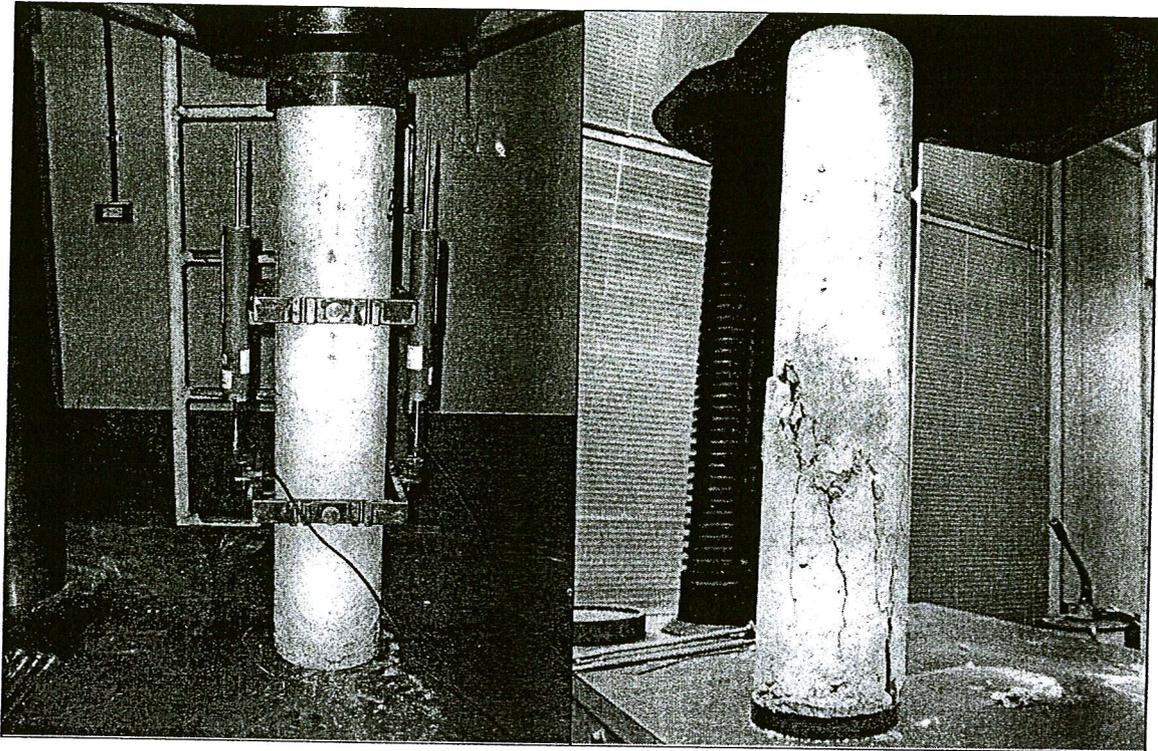
รูปที่ 4.43 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC columns หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

โดยสรุปแล้วจากผลการทดสอบ พบว่าเสา Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษา จะเกิดการวิบัติเฉพาะที่ อันเนื่องมาจากปลอกเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอในการป้องกันการ โกงเดาะเฉพาะที่ ดังนั้นวิธีการที่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column ที่อัตราส่วน B/t ตามที่ศึกษาคือการป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติเฉพาะที่ดังกล่าว โดยเสริมความหนาของปลอกเหล็กในบริเวณดังกล่าวให้มีค่าความแกร่งต่อการคดที่เพียงพอและทำให้การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าสู่ปลอกเหล็กได้มากขึ้นอีกด้วย

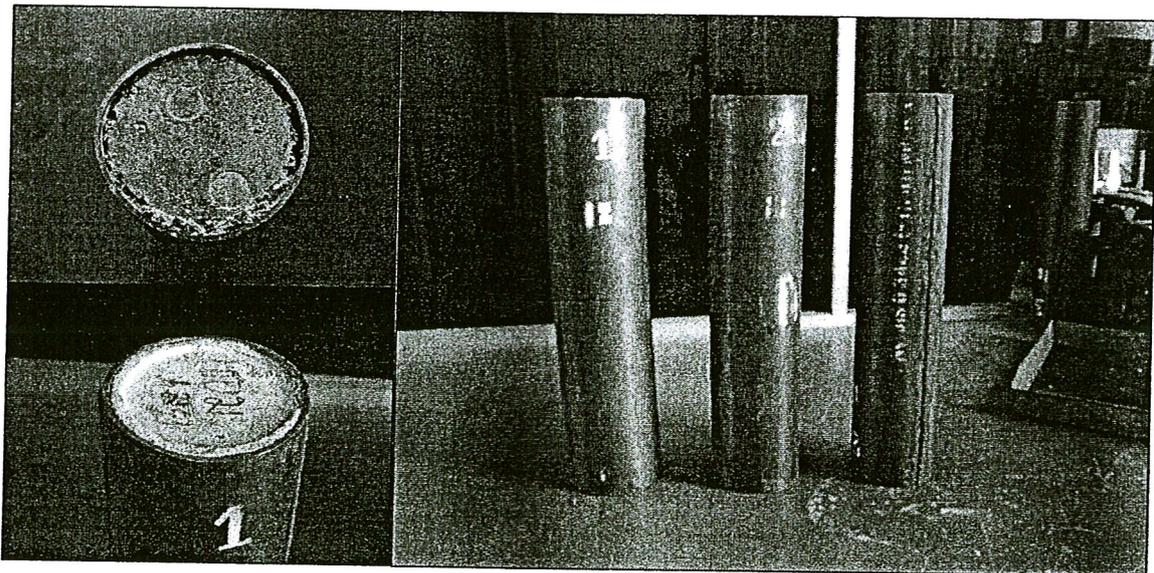
(2) หน้าตัดกลม

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 โดยเสาดังกล่าวจะรับแรงกระทำในแนวแกนสูงสุดที่ค่าการหดตัวประมาณ 2.8-3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ซึ่งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของเสาทดสอบอ้างอิงดังกล่าวเป็นพฤติกรรมแบบ Degrading ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.3

ในการทดสอบ Tubed RC column จำกัดการทดสอบที่ระยะการหดตัว 30 มิลลิเมตรหรือแรงกระทำในแนวแกนไม่เกิน 1800 kN เท่านั้นเนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือทดสอบดังนั้น Tubed RC column ยังไม่เกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ และการ โกงตัวทางด้านข้างมีค่าน้อยมากและการ โกงตัวออกทางด้านข้างปรากฏไม่ชัดเจนนัก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การวิบัติของ Tubed RC column เกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป และมีความเหนียวสูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเป็นอย่างมาก และเมื่อพิจารณา ระยะการหดตัวดังกล่าว 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 นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าอัตราส่วน 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 เป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 4.17 กำลังแรงกอดัดสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

กลุ่ม ที่	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ					พฤติกรรมการรับแรง
		P'_{max} (kN)	P'_{max} / P_c	ϵ_{max} (% strain)	$\epsilon_{max} / \epsilon_{u,RC}$		
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	Strain hardening
	SRC25-6.0-0	953.17	1.64	0.634	1.86	Strain hardening	Strain hardening
	SRC32-6.0-0	1075.50	1.59	0.522	1.92	Elastic - perfectly plastic	Elastic - perfectly plastic
3	SRC18-6.0-0-0.1 f'_{co}	887.50	2.06	0.758	2.04	Strain hardening	Strain hardening
	SRC25-6.0-0-0.1 f'_{co}	1059.00	1.82	0.671	1.97	Strain hardening	Strain hardening
	SRC32-6.0-0-0.1 f'_{co}	1158.50	1.71	0.555	2.04	Elastic - perfectly plastic	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 นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราส่วน $\epsilon'_{max,col} / \epsilon'_{con,ref}$ 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 ที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีกาให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

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	1.56	Elastic perfectly plastic	
	CST25-0	925.8	1.44	0.56	1.47	1.47	Strain hardening	
	CST32-0	1072.1	1.42	0.51	1.31	1.31	Strain hardening	
3	CST18-0.05	837.9	1.73	0.65	1.58	1.58	Elastic perfectly plastic	
	CST25-0.05	1006.4	1.56	0.58	1.53	1.53	Strain hardening	
	CST32-0.05	1139.2	1.51	0.55	1.41	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 จักษดา ชำรงวุฒิ, (2550) ได้นำเสนอสมการ การ ออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ AISC/LRFD ทำนายกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกน ของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูก โอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่มีขนาดความหนา ปลอกเหล็กที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนที่ได้จากการทดสอบ กับการทำนายโดยใช้สมการออกแบบของ AISC/LRFD ($P'_{max,col} / P_{AISC/LRFD}$) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1.0 คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.88 และ 0.60-0.94 ซึ่งกำลังรับแรงกดอัดที่คำนวณได้จากสมการออกแบบ เสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD มีค่ามากกว่า กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column เป็นอย่างมาก 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 เปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนที่ได้จากการทดสอบ ($P'_{max,col}$) 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 ซึ่งการทำนายกำลังรับแรงกดอัดใน แนวแกนของ Tubed RC column ตามสมการออกแบบของ AISC/LRFD มีค่าใกล้เคียงกับ 1.0 ดังนั้นการนำสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD มาทำนายกำลังรับแรงกดอัดในเสา 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 จักรกานา ชำรงวุฒิ (2550) ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยใช้สมการออกแบบเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตของ ACI Committee 318 (ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. 1008-38) ดังแสดงไว้ในสมการ 2.2 ในบทที่ 2 โดยสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column (P'_{max}) ได้แยกออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ (1) ได้รวมพจน์ของกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก ($A_s^{tube} f_y^{tube}$) เข้าไว้ในสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัด ซึ่งพจน์ของกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กนี้ เป็นหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนที่เกิดผลของการโอบรัดของปลอกเหล็กแก่แกนคอนกรีต ดังแสดงในสมการ 4.6

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

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}^2 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 ที่ให้ทำการคำนวณหาลำตัวของเสาเชิงประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปนั้นและให้กำลังในการรับแรง

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

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

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 (รวมพจน์กำลังของปลอกเหล็กเข้าไว้ในสมการทำนายกำลังรับแรงกดอัด) โดยอัตราส่วนของ P'_{max} / P'_{EIT} 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_{EIT}^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 จักรดา 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

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

และจากแนวความคิดของ Seangatith and Thumrongvuth (2009) ซึ่งได้นำเสนอสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ที่ดัดแปลงมาจากสมการออกแบบของ ACI Committee 318 ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ดังนั้นสำหรับงานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการลดกำลังรับแรงกดอัดปลอกเหล็ก (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 ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่แล้วและโดยได้พิจารณาารวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P'_{ACI}) เข้ากับสมการที่ 2.2 ดังแสดงในสมการที่ 4.10

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

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 ($A_s^{tube} f_y^{tube}$) โดยพบว่ามีย่ออัตราส่วนอยู่ในช่วงระหว่าง 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 ที่นำเสนอ ดังแสดงในสมการที่ 4.12 เมื่อนำค่า P'_{max} ที่ได้จากผลการทดสอบนำมาลองคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่าแรง $P_{ACI}^{Modified}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าค่า $P'_{max} / P_{ACI}^{Modified}$ ที่ได้ อยู่ในช่วง 1.02 - 1.24 โดยที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวทำนายกำลัง Tubed RC column มีค่าที่ต่ำกว่าผลการทดสอบที่ได้ (Underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งานและสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามการใช้สมการข้างต้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ต้องอยู่ในขอบเขตของการวิจัยนี้และใช้พิจารณาในการนำไปใช้งานเป็นหลัก

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ทำการทำนายกำลังโดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee318

และสมการออกแบบใหม่ที่ได้เปลี่ยนแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee318

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{max,col}$ (kN)	P'_{ACI} (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P'_{ACI}}$	$P'_{max,tube}$ (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 $0.05 f'_c$ ซึ่งเสาดังกล่าวเป็นเสาสั้น และมีอัตราส่วนของ L/B มีค่าอยู่ในช่วง 5-9 นอกจากนี้ในการหาอัตราส่วนความหนา น้อยสุด (B/t) สามารถหาได้จากอัตราส่วน $\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}}$ ซึ่งได้อ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบ เสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD

ตารางที่ 4.24 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column ของหน้าตัดกลม กับการทำนาค้างโดยใช้สมการออกแบบของ ACI Committee318

และสมการออกแบบใหม่ที่ดัดแปลงจากสมการออกแบบของ ACI Committee318

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	$P'_{max,col}$ (kN)	P'_{ACI} (kN)	$\frac{P'_{max,col}}{P'_{ACI}}$	$P'_{max,tube}$ (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