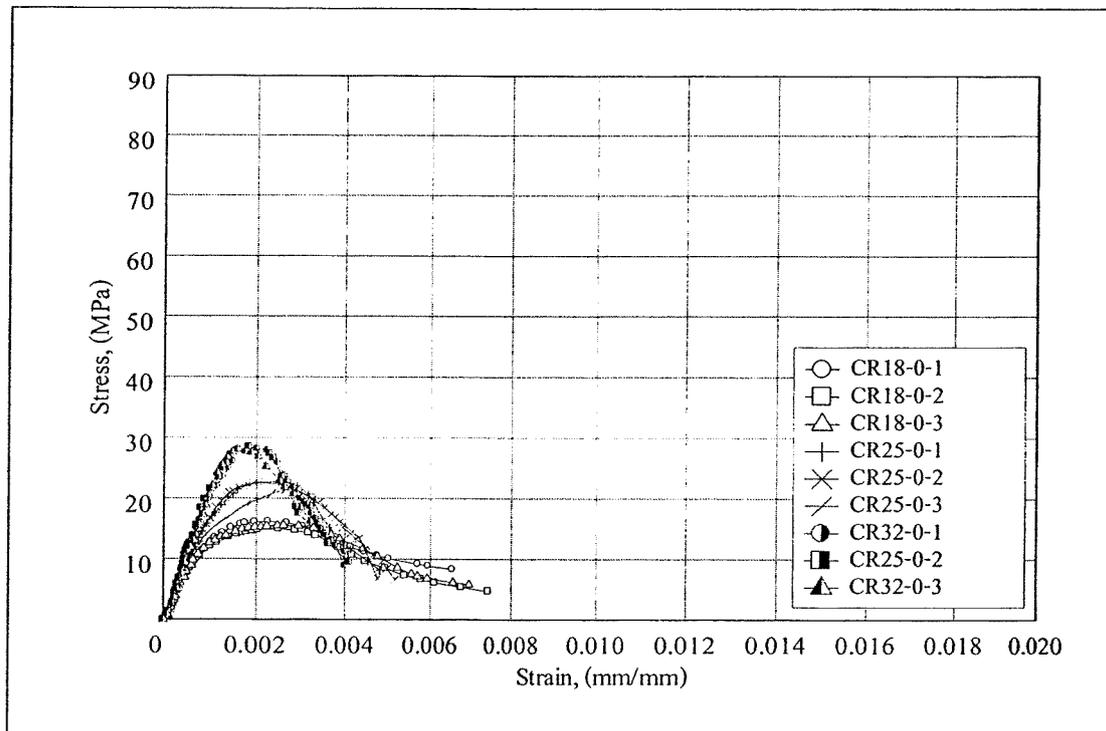
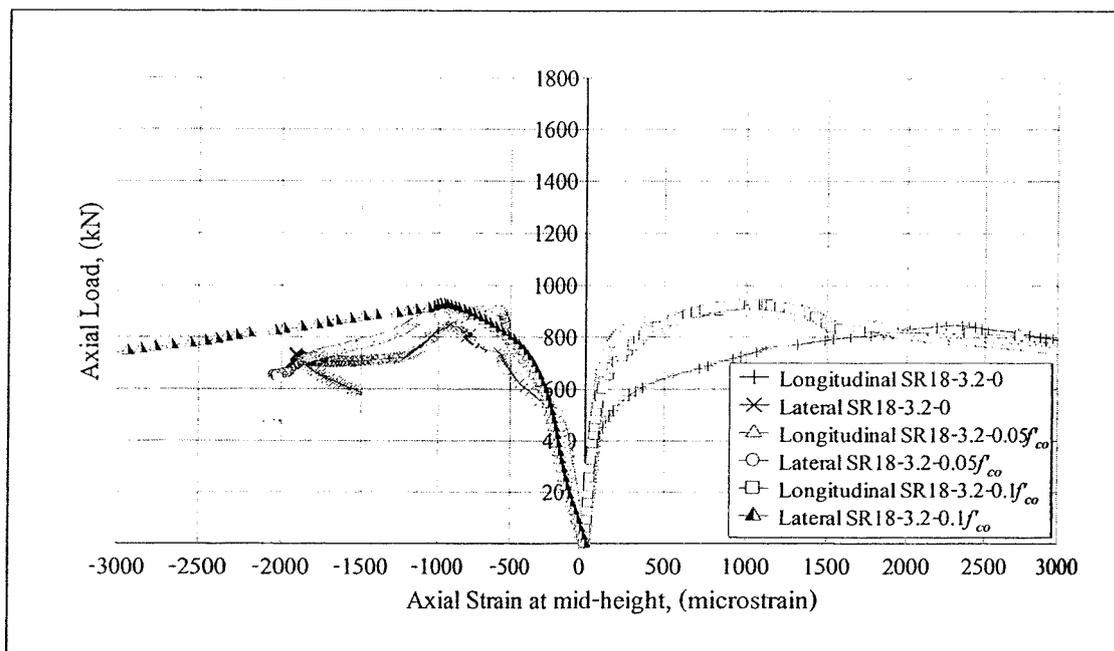


ภาคผนวก ก

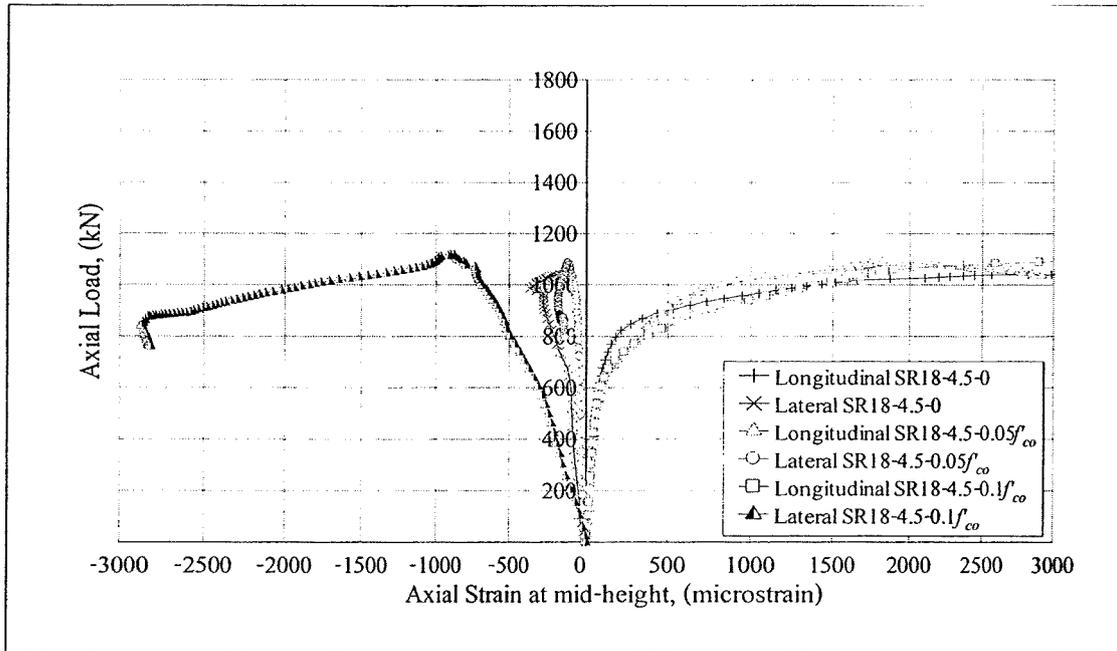
กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ในหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส



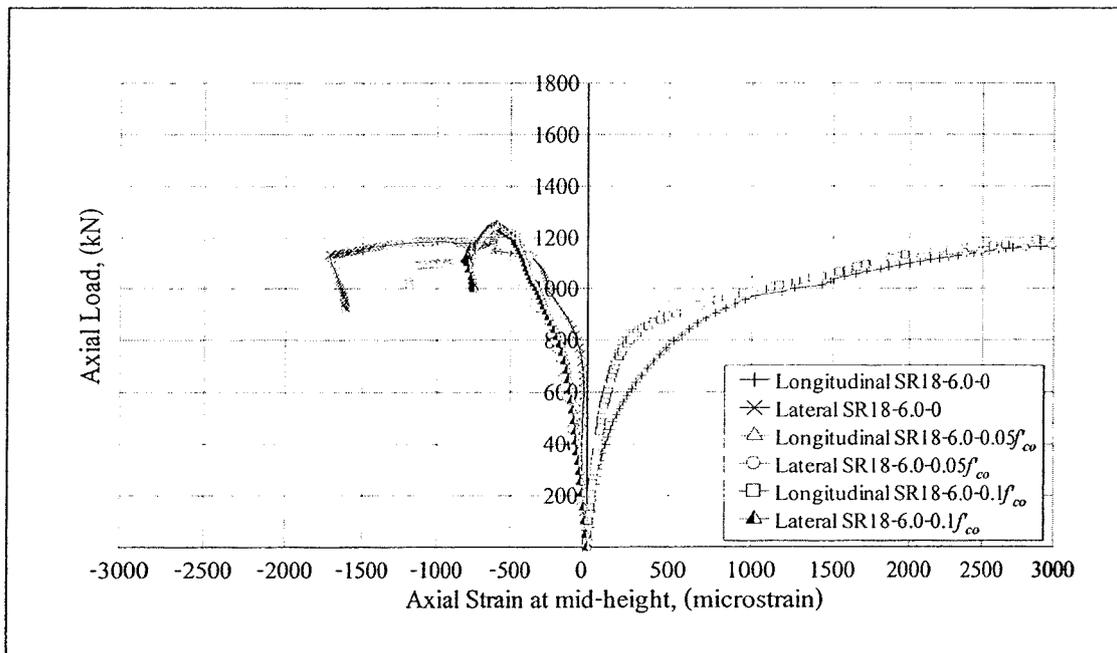
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง



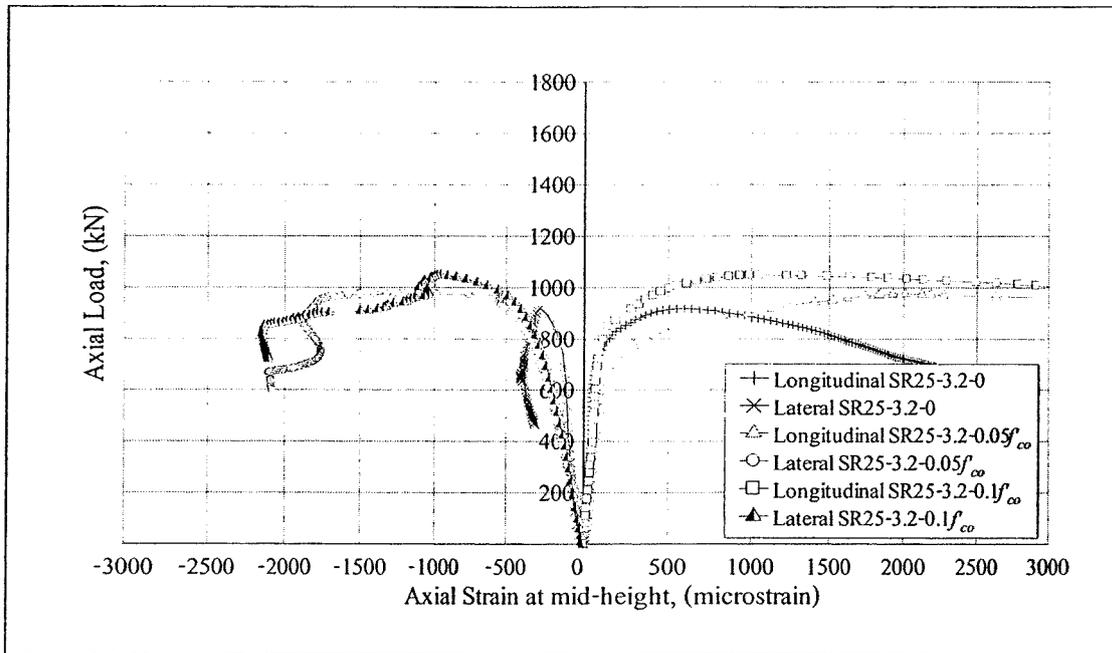
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 3.2



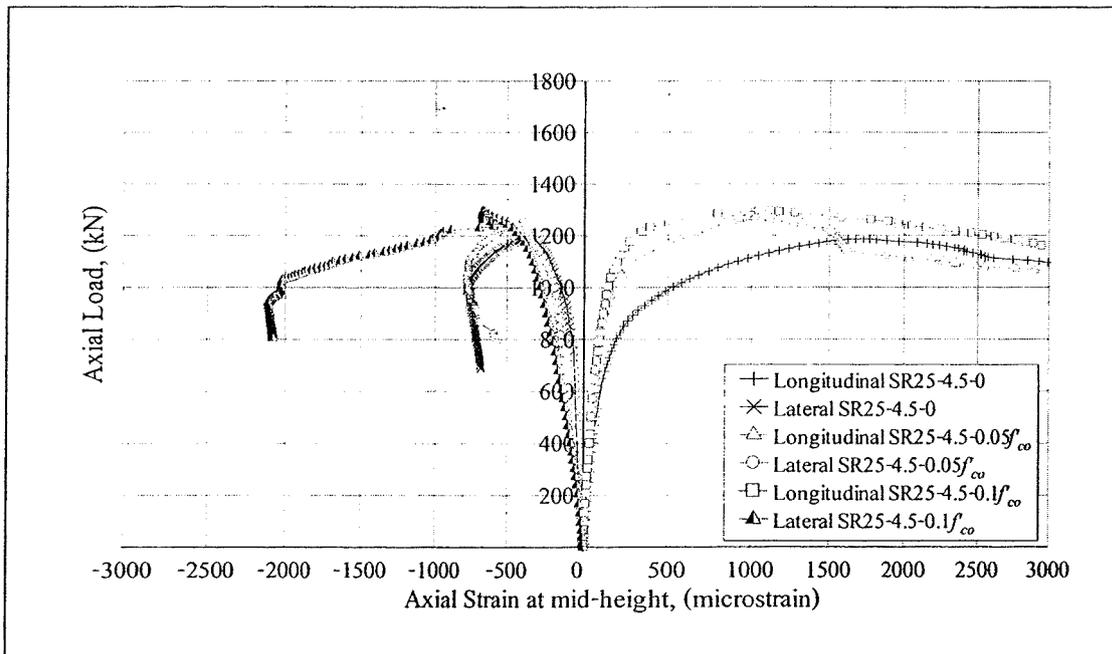
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 4.5



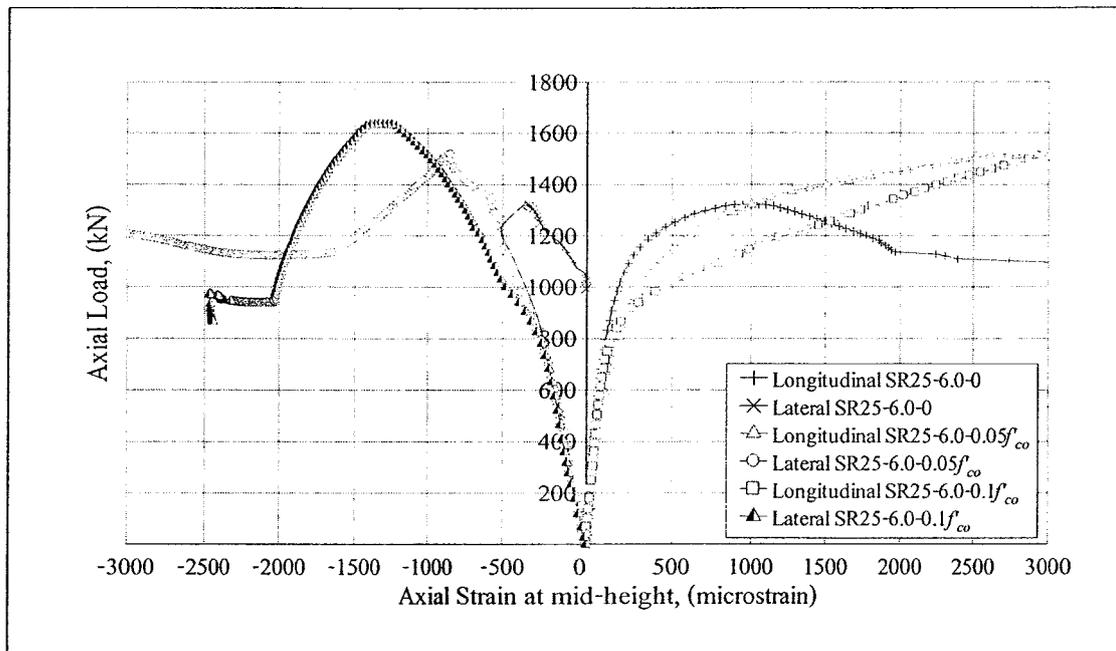
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 6.0



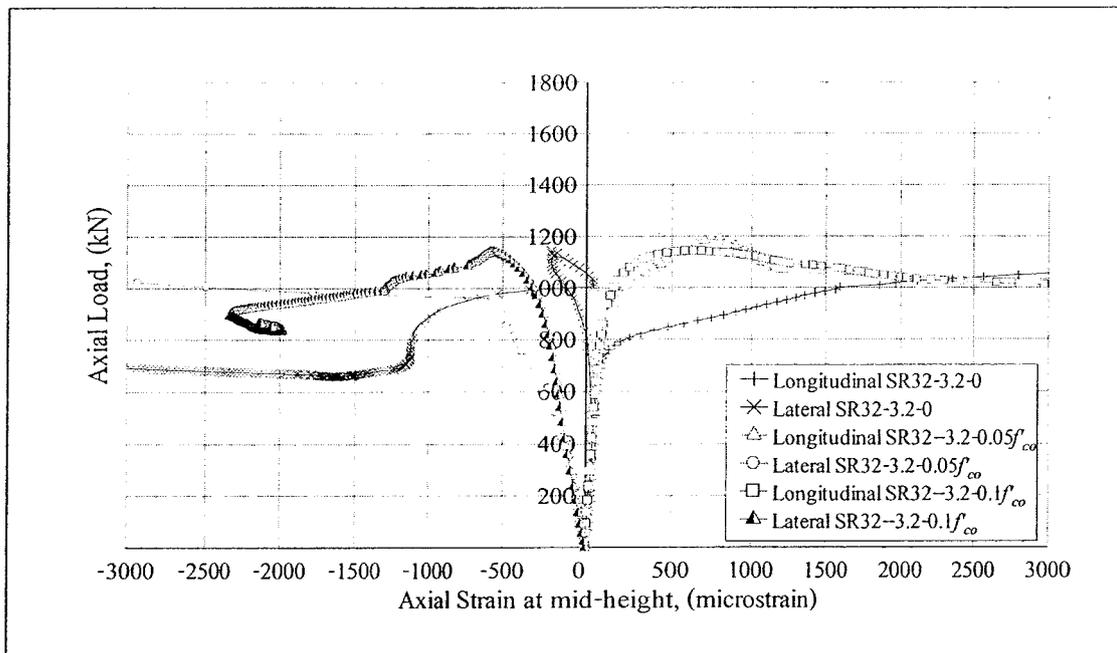
รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 3.2



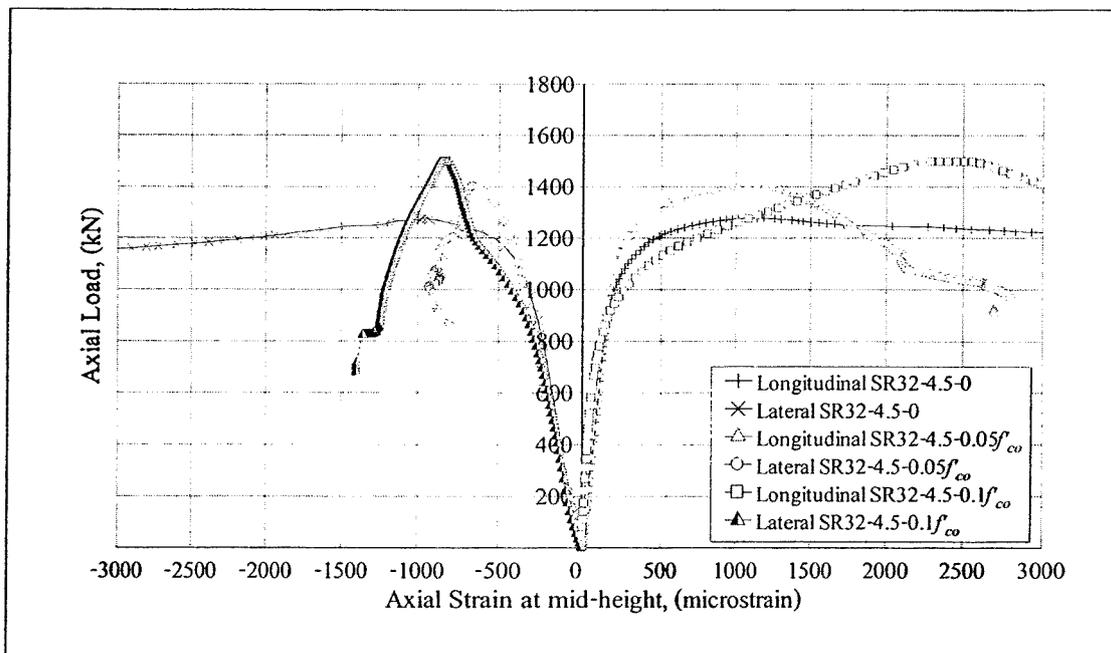
รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 4.5



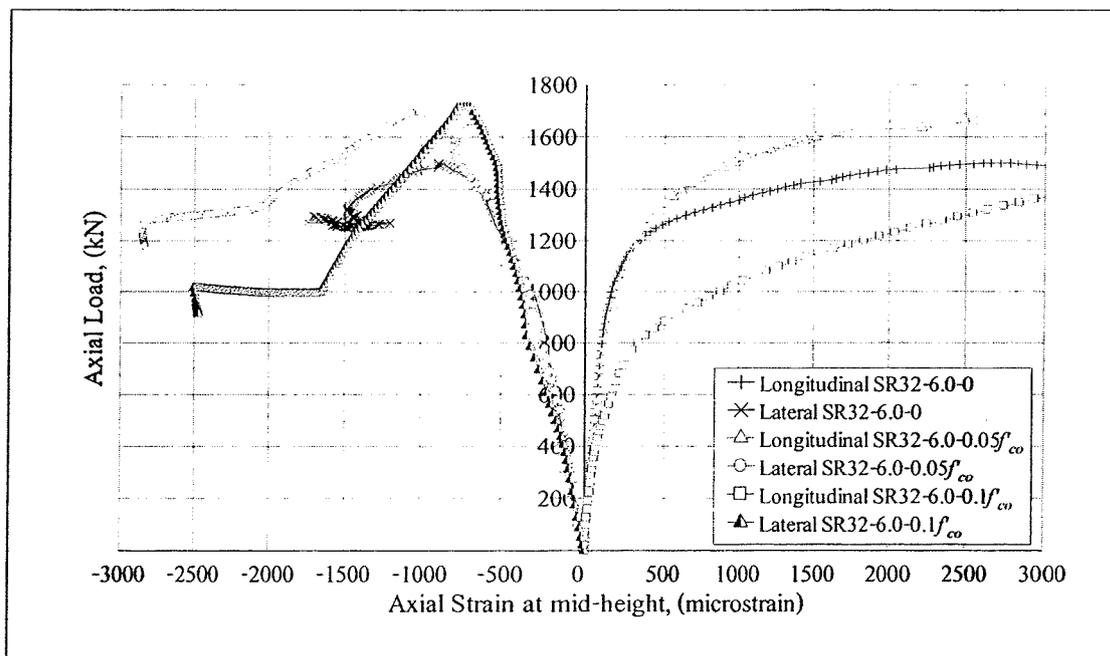
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 6.0



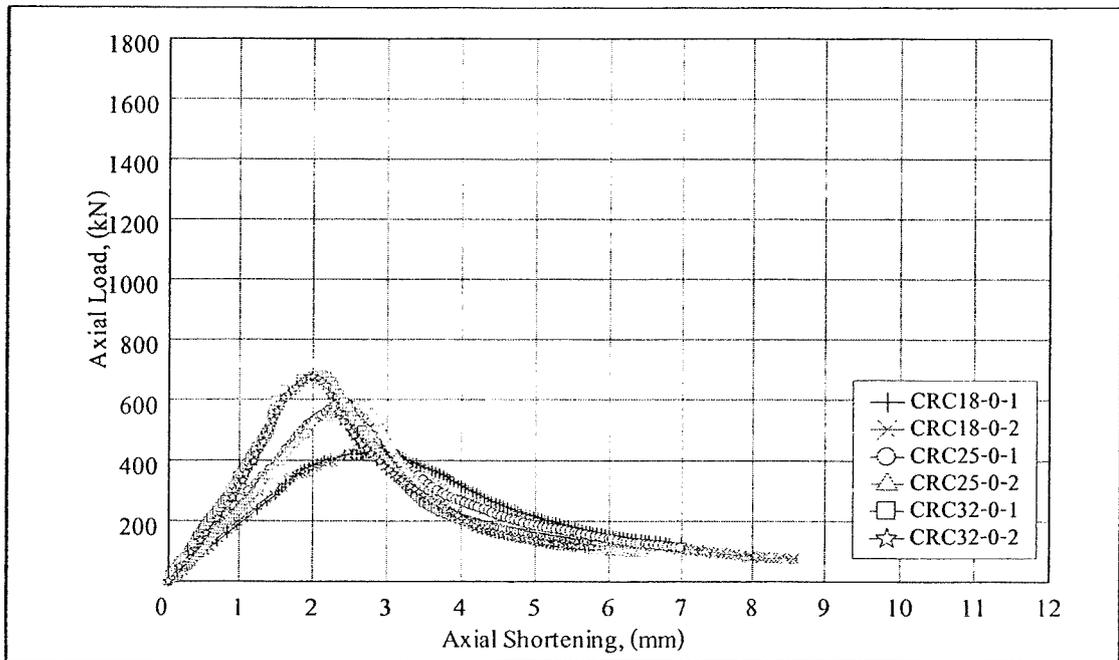
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 3.2



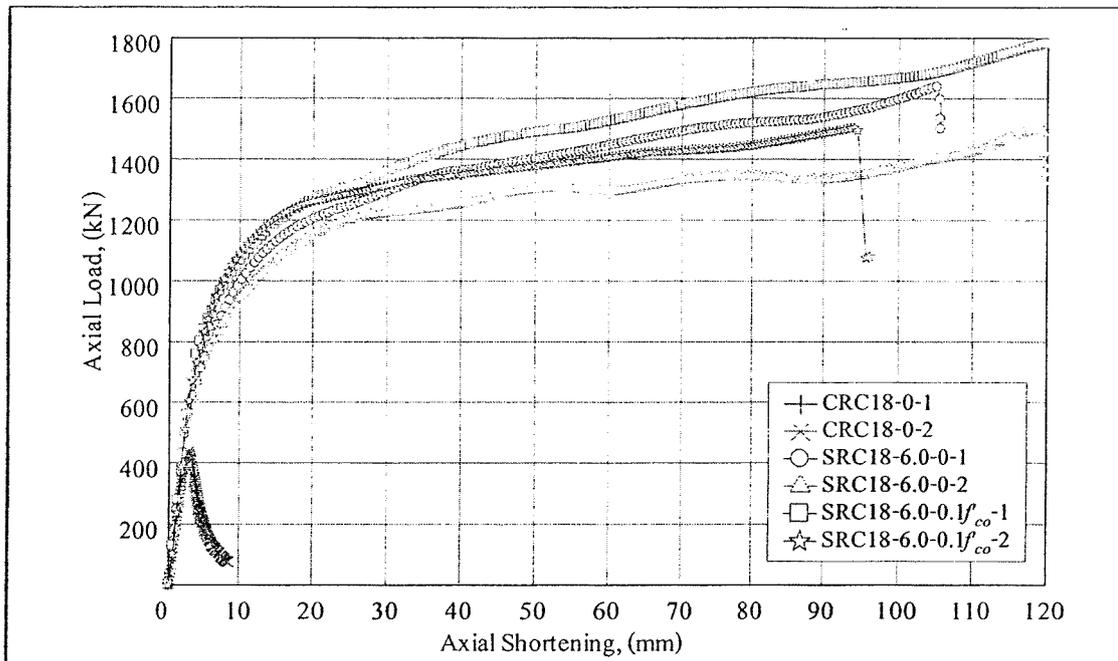
รูปที่ ๙ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 4.5



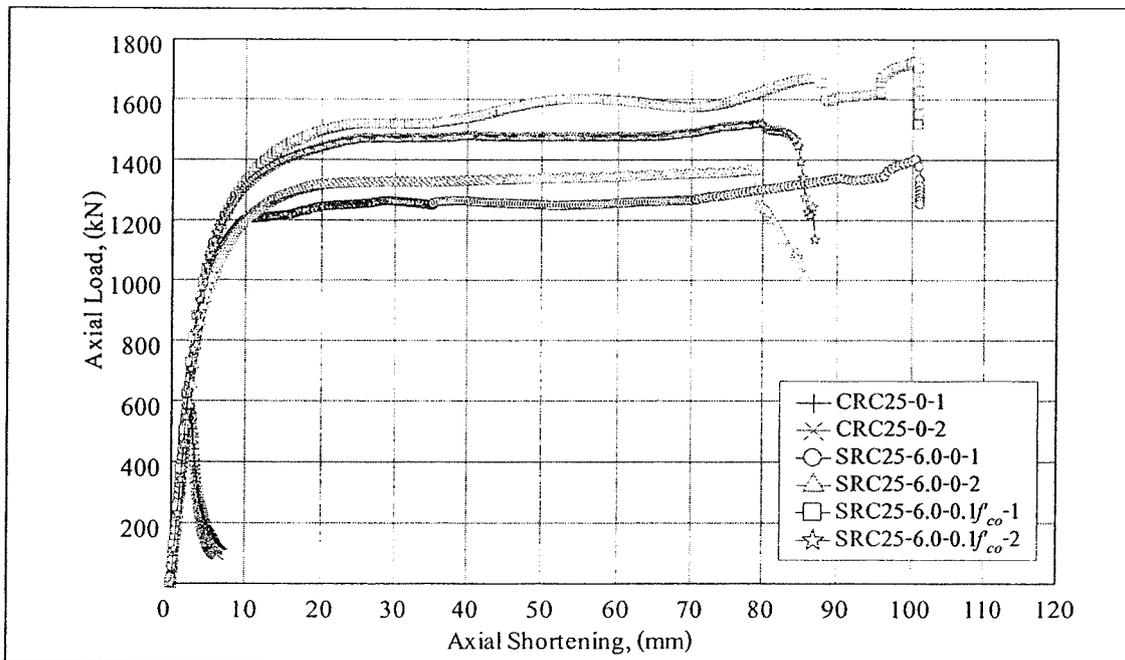
รูปที่ ๑๐ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 6.0



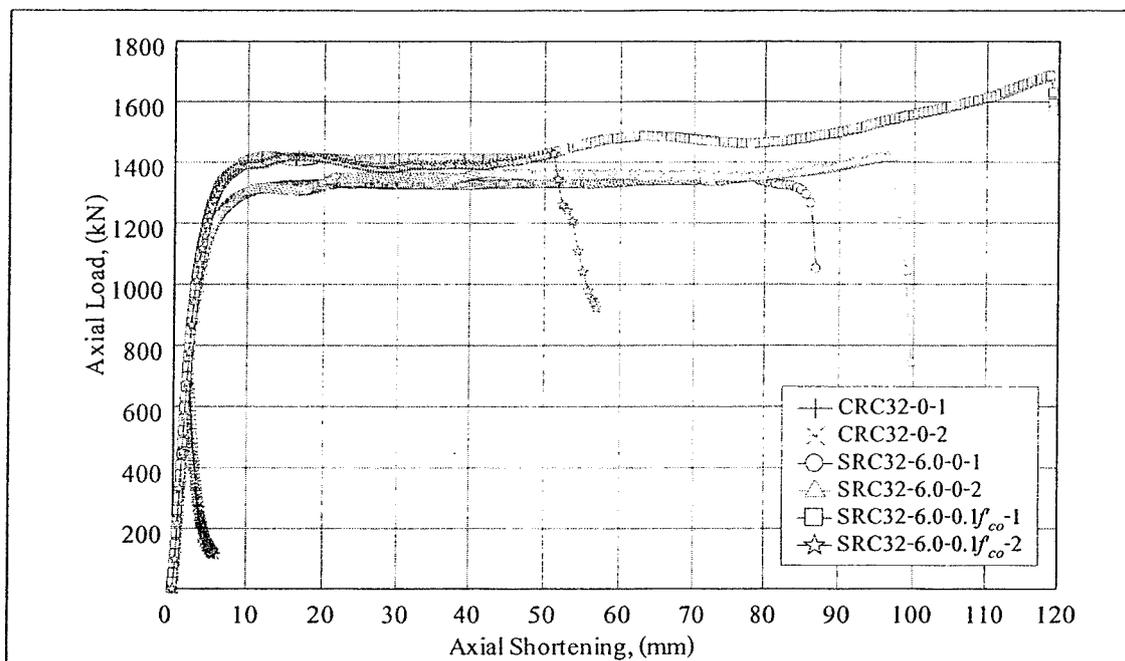
รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน  
ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง



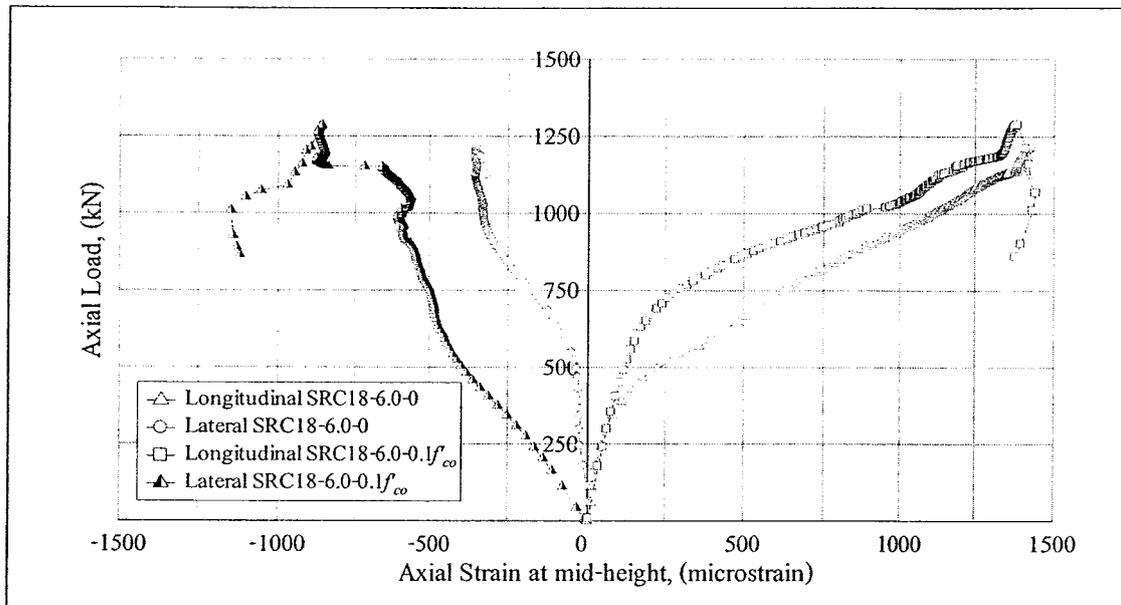
รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน  
ของเสา Tubed RC column ที่มี  $f'_{co} = 18 \text{ MPa}$



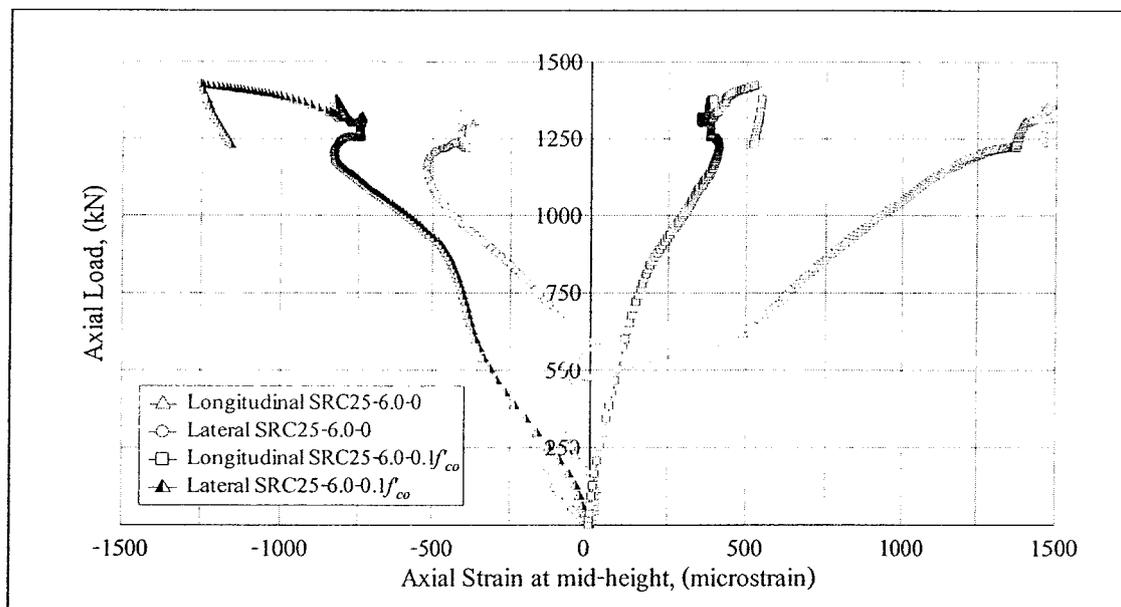
รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน  
ของเสา Tubed RC column ที่มี  $f'_{co} = 25$  MPa



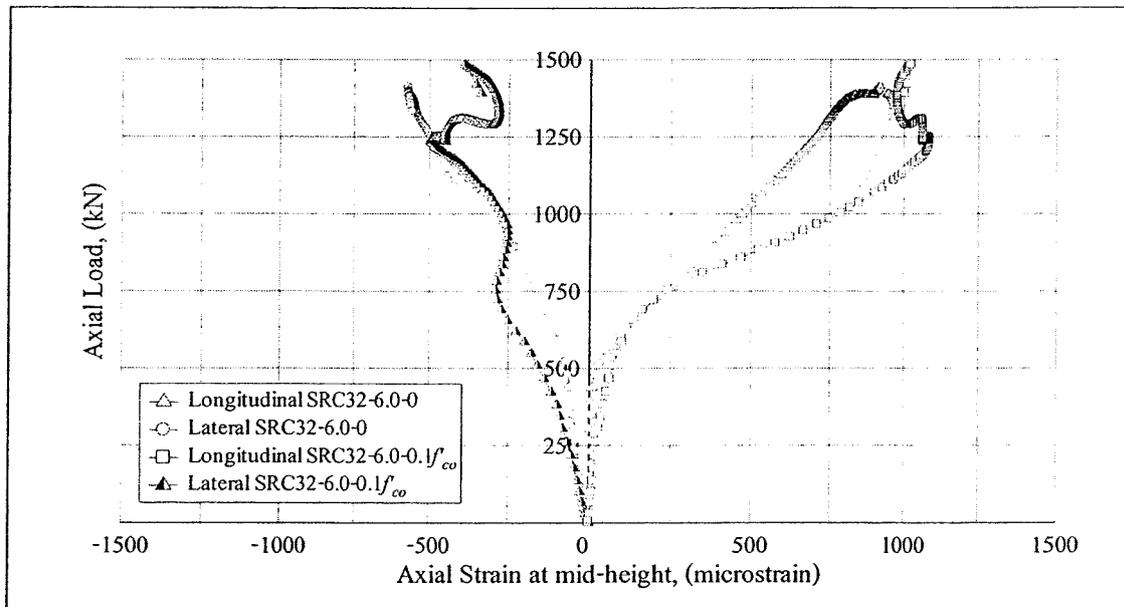
รูปที่ ก.14 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน  
ของเสา Tubed RC column ที่มี  $f'_{co} = 32$  MPa



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



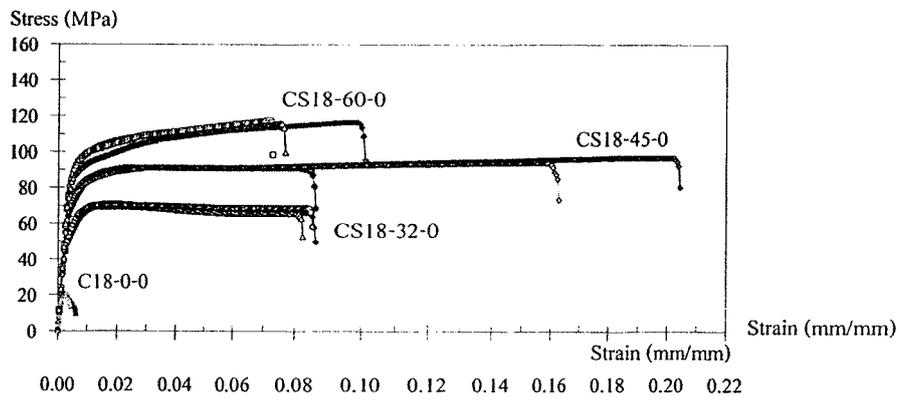
รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี  $f'_{co} = 25$  MPa



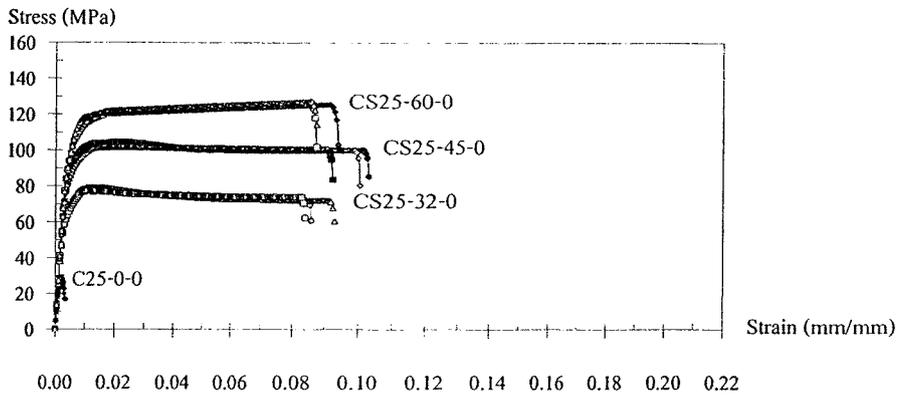
รูปที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน  
และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง  
ของเสา Tubed RC column ที่มี  $f'_{co} = 32$  MPa

**ภาคผนวก ข**

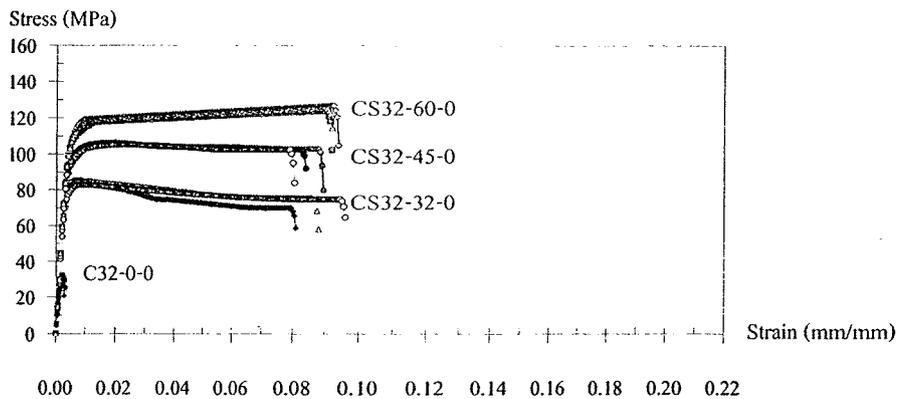
**กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ในหน้าตัดกลม**



a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa

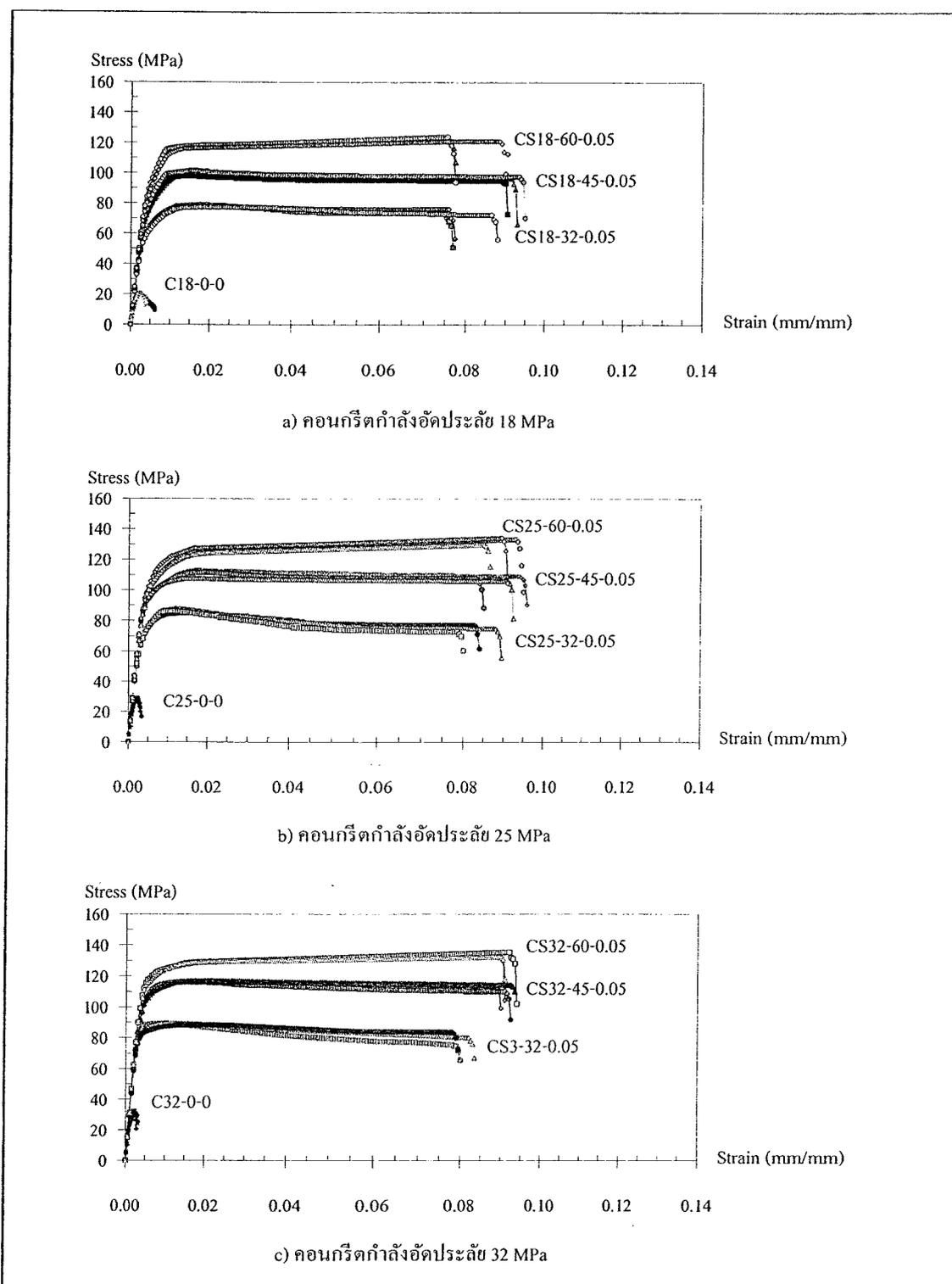


b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

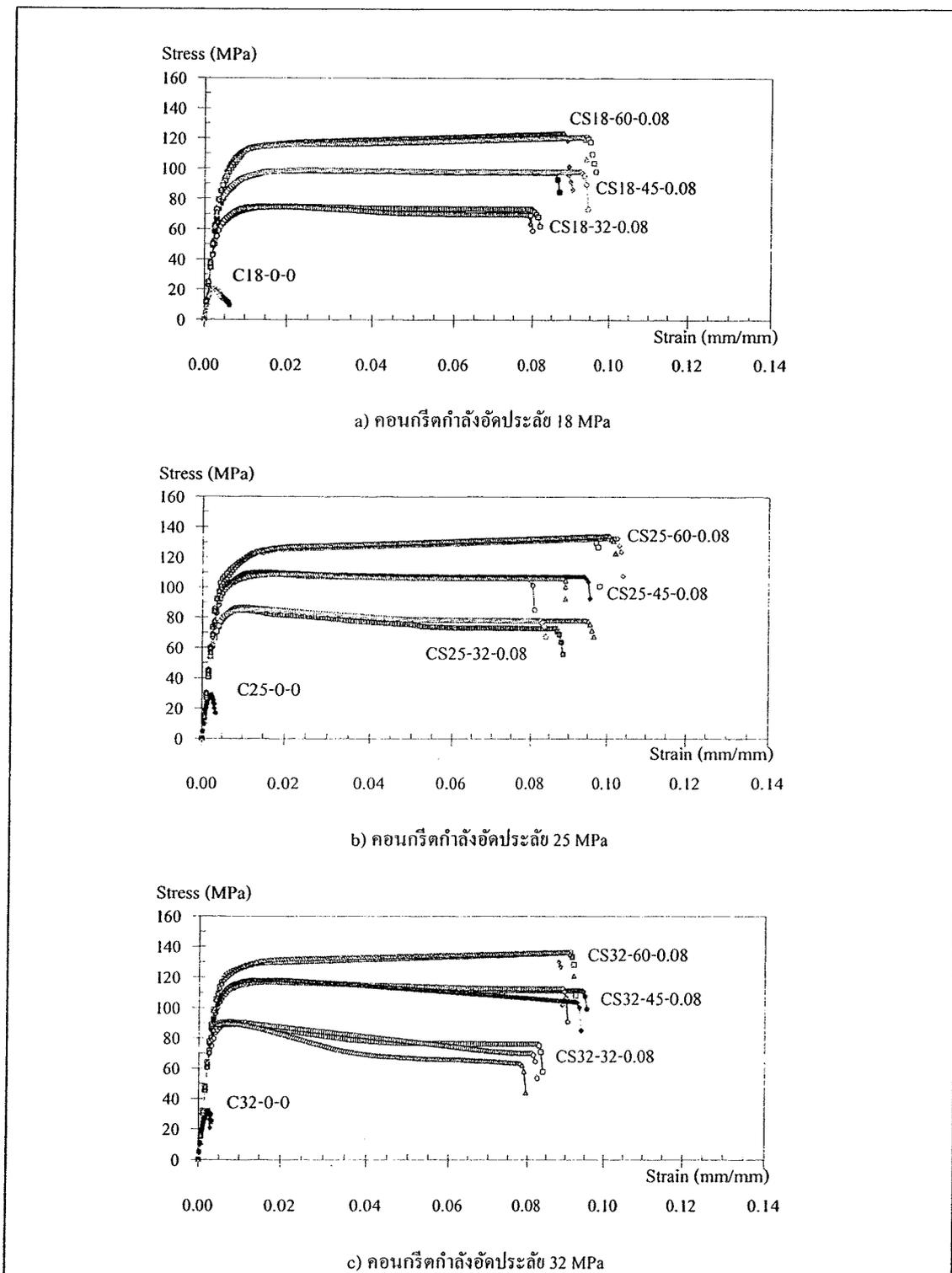


c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

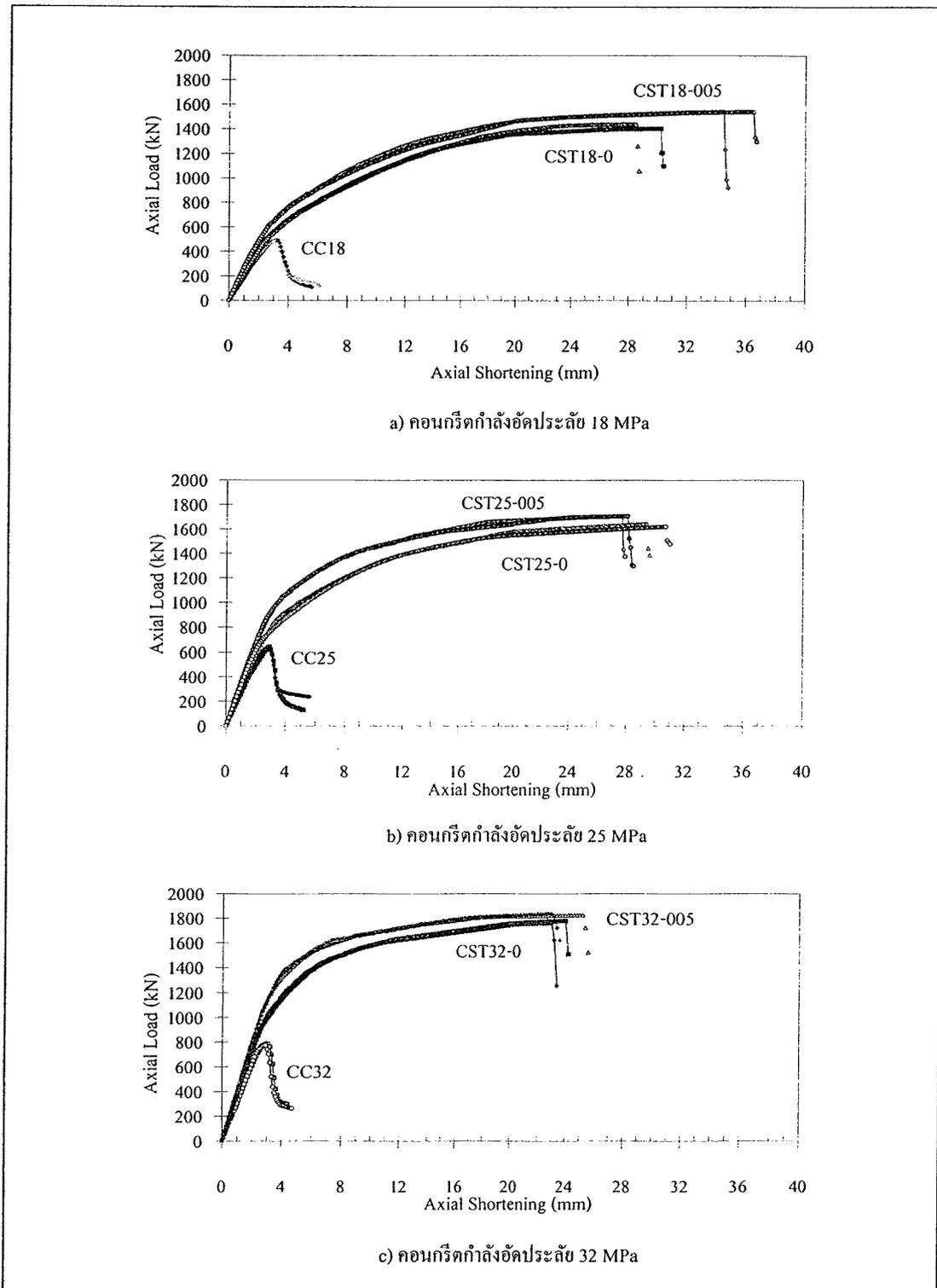
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ  
ที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)



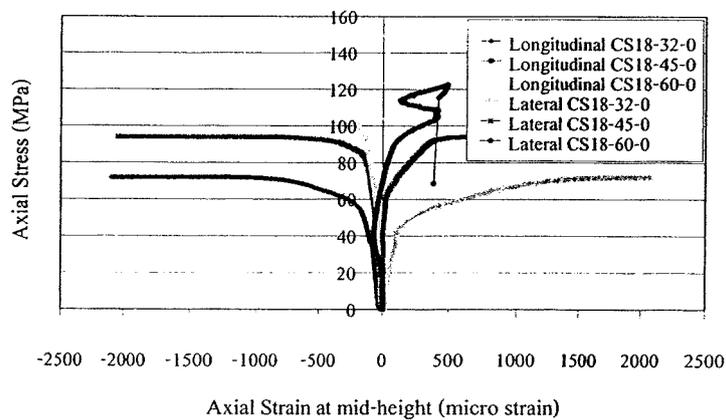
รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ  
 ที่มีกรให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด  $0.05 f'_{co}$  (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



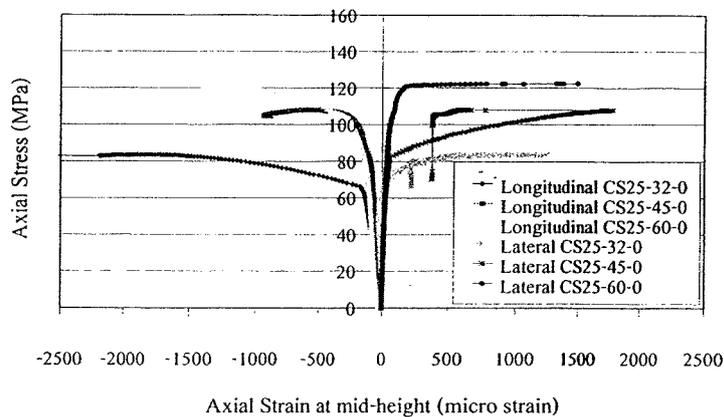
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ  
ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด  $0.08 f'_c$  (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)



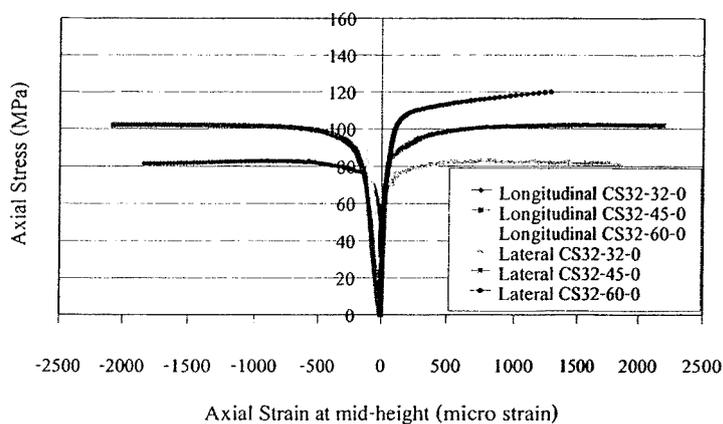
รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของ Tubed RC column ด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตรและมีการให้หน่วยแรงไอบริดก่อน



a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa

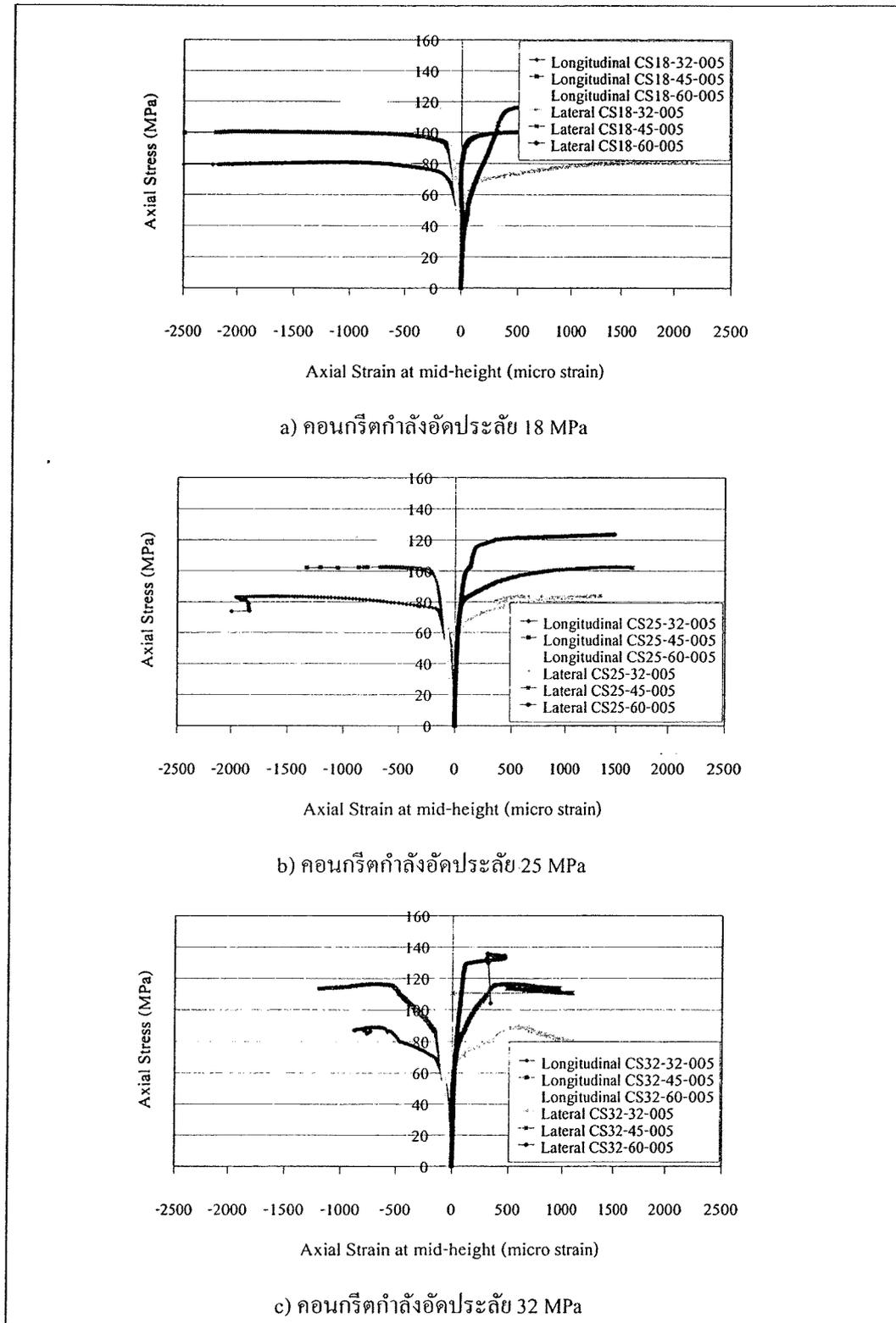


b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

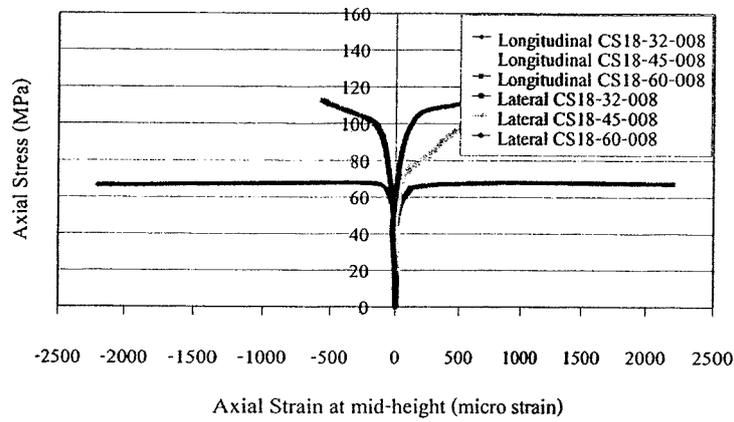


c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

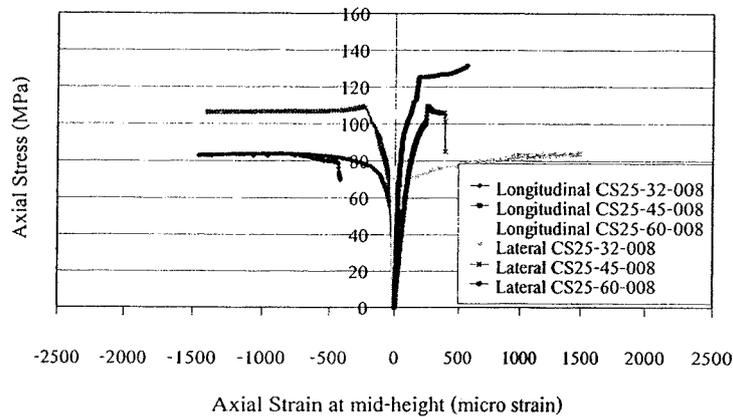
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงไอบอร์ดก่อน



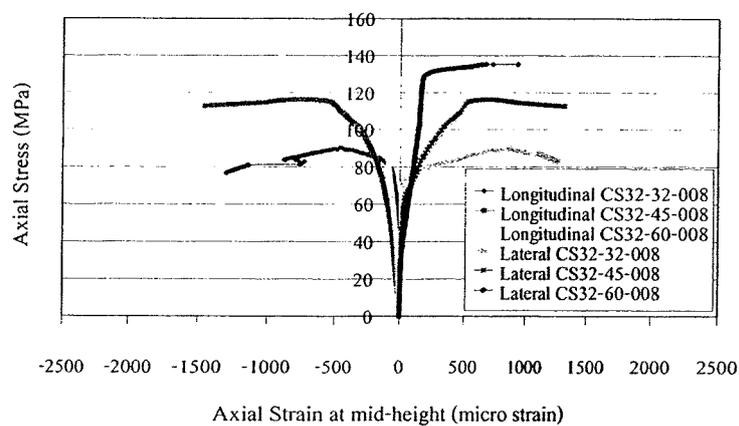
รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด  $0.05 f'_{cc}$



a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa

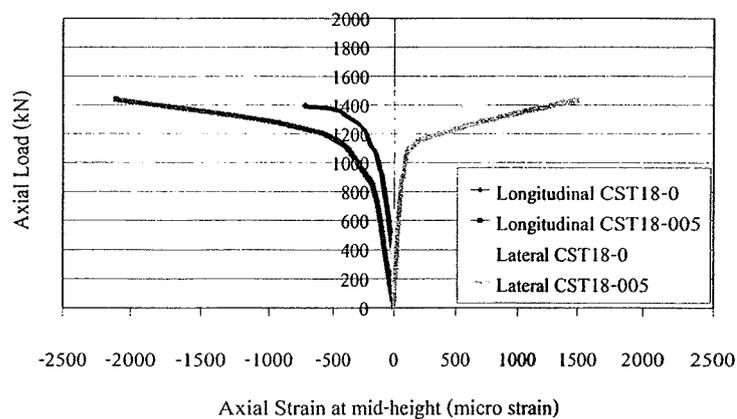


b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

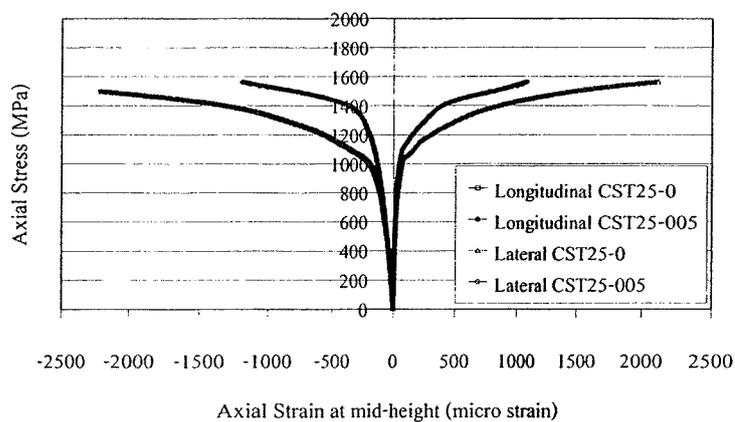


c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

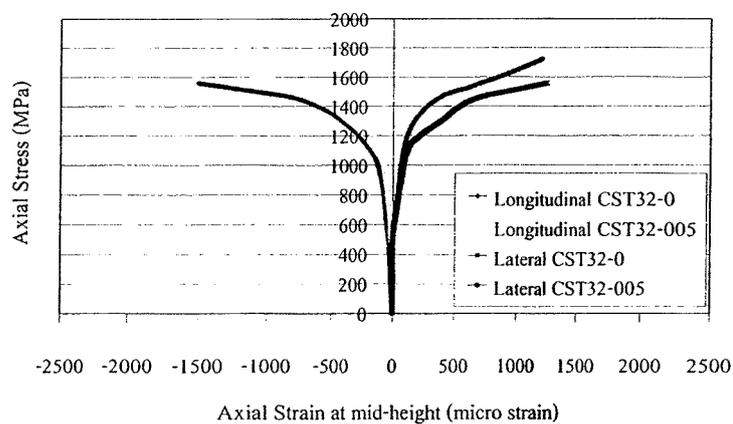
รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และแนวขวางของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนขนาด  $0.08 f'_{co}$



a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa



c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน  
และแนวขวางของ Tubed RC Column

ภาคผนวก ค

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

## ค.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### ค.1.1 ท่อผนังบาง

สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่ใช้โอบรัดแกน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ถูกประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงในทิศทางของเส้นรอบวงในท่อรับความดันผนังบาง ( $\sigma_1$ ) โดยความดันภายในที่เกิดขึ้นนั้น ( $\rho$ ) เกิดการขยายตัวของแกนคอนกรีตที่รับแรงกดอัดในแนวแกน กระทำในแนวตั้งฉากแก่ผนังของท่อปลอกเหล็กทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงในปลอกเหล็กหรือเรียกว่าหน่วยแรงโอบรัดที่เกิดขึ้น โดยที่มีอัตราส่วนของรัศมีภายในของท่อรับความดันต่อความหนาของผนังท่อ มากกว่าหรือเท่ากับ 10 หรือ  $\frac{r}{t} \geq 10$  สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ ค.1

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

โดยที่  $\rho$  คือ ความดันภายในท่อรับความดัน  
 $r$  คือ รัศมีภายในท่อรับความดัน  
 $t$  คือ ความหนาของท่อรับความดัน

### ค.1.2 แรงบิด

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบกระทำโดยการใช้อุปกรณ์สำหรับโอบรัดแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กหน่วยแรงโอบรัดที่เกิดจากการขันอุปกรณ์ด้วยสลักเกลียวโดยใช้ประแจปอนด์ (Torque wrench) ซึ่งสามารถที่จะระบุขนาดของโมเมนต์ในการบิดที่ต้องการได้ โดยสามารถคำนวณ โมเมนต์บิดดังแสดงในสมการที่ ค.2

$$T = CdF_t \quad (\text{ค.2})$$

โดยที่  $T$  คือ โมเมนต์การบิด  
 $C$  คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะและคุณภาพของเกลียว ซึ่งค่าที่แนะนำให้ใช้งานคือ  
 $C = 0.15$  เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น  
 $C = 0.2$  เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น  
 $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของสลักเกลียว  
 $F_t$  คือ แรงดึงขั้นต้นในแนวแกนของสลักเกลียว

## ค.2 การคำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดก่อน

### ค.2.1 สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

#### ค.2.1.1 การคำนวณขนาดสลักเกลียว

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

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

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

- คำนวณหาแรงดึงที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงโอบรัดก่อน โดยใช้

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

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

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

- คำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว

เนื่องจากการใช้สลักเกลียวทั้งหมดจำนวน 10 ตัว ดังนั้น  $n$  จึงมีค่าจำนวนสลักเกลียวเท่ากับ 10 แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว โดยใช้

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

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

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

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

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

โดยที่  $A_{ss}$  คือ พื้นที่รับความเค้นของสลักเกลียว

ดังนั้น  $A_{ss} = \frac{14.4 \times 10^3}{108} = 133.33 \text{ mm}^2$

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

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว หมุดเกลียวและสตั๊ด

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

ตารางที่ ค.2 เกลียวเมตรแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ		ระยะพิคซ์ $p$	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางพิคซ์ $d_2, D_2$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย		พื้นที่รับหน่วยแรง $A_s, \text{mm}^2$
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2			$d_1$	$D_1$	
1.00		0.25	0.838	0.693	0.729	0.456
1.20		0.25	1.038	0.893	0.929	0.730
1.60		0.35	1.373	1.170	1.221	1.270
2.00		0.40	1.740	1.509	1.567	2.070
2.50		0.45	2.208	1.948	2.013	3.390
3.00		0.50	2.675	2.387	2.459	5.030
4.00	3.50	0.60	3.110	2.764	2.850	6.780
		0.70	3.545	3.141	3.242	8.780
	4.50	0.75	4.013	3.580	3.688	11.300
5.00		0.80	4.480	4.019	4.134	14.200
6.00		1.00	5.350	4.773	4.917	20.100
8.00		1.25	7.183	6.466	6.647	36.600
10.00	(9)	1.25	8.188	7.466	7.647	48.100
		1.50	9.026	8.160	8.376	58.000
	(11)	1.50	10.026	9.160	9.376	72.300
12.00		1.75	10.863	9.853	10.106	84.300
16.00	14.00	2.00	12.701	11.546	11.835	115.000
		2.00	14.701	13.546	13.835	157.000
20.00	18.00	2.50	16.376	14.933	15.294	192.000
		2.50	18.376	16.933	17.294	245.000
	22.00	2.50	20.376	18.933	19.294	303.000
24.00		3.00	22.051	20.319	20.752	353.000
30.00	27.00	3.00	25.051	23.319	23.752	459.000
		3.50	27.727	25.706	26.211	561.000
36.00	33.00	3.50	30.727	28.706	29.211	694.000
		4.00	33.402	31.093	31.670	817.000
	39.00	4.00	36.402	34.093	34.670	976.000
42.00		4.50	39.077	36.479	37.129	1120.00
48.00	45.00	4.50	42.077	39.479	40.129	1300.00
		5.00	44.752	41.866	42.587	1470.00
56.00	52.00	5.00	48.752	45.866	46.587	1760.00
		5.50	52.428	49.252	50.046	2030.00
64.00	60.00	5.50	56.428	53.252	54.046	2360.00
		6.00	60.103	56.639	57.505	2680.00
	68.00	6.00	64.103	60.639	61.505	3060.00

### ค.2.1.2 ขั้นตอนการคำนวณการหาโมเมนต์บิดสำหรับการชันสลักเกลียว

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

■ กำหนดหาหน่วยแรงโอบริคที่ต้องการให้เกิดขึ้นจากการชันสลักเกลียวคือ  $0.05 f'_{co}$  หน่วยแรงโอบริคที่ต้องการคือ

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

■ กำหนดหาแรงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กและสลักเกลียว โดยใช้

$$P = \sigma_1 A$$

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

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

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

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

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

■ กำหนดหาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปชันในสลักเกลียว โดยใช้สมการ

$$T = CdP_i$$

โดยที่  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเกลียว M16 เท่ากับ 14.701 mm

$P_i$  คือ แรงดึงในแนวแกนของสลักเกลียว

$C$  คือ สัมประสิทธิ์โมเมนต์บิด

$C = 0.15$  เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น

$C = 0.20$  เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น

เนื่องจากการทดสอบนี้ไม่มีการหล่อสลักเกลียว ดังนั้น  $C$  เท่ากับ 0.2

ดังนั้น

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

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

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

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

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

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

## ค.2.2 สำหรับหน้าตัดกลม

### ค.2.2.1 ขั้นตอนการคำนวณการหาหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง

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

ตารางที่ ค.5 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

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

### วิธีแสดงการคำนวณ

#### 1. หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต

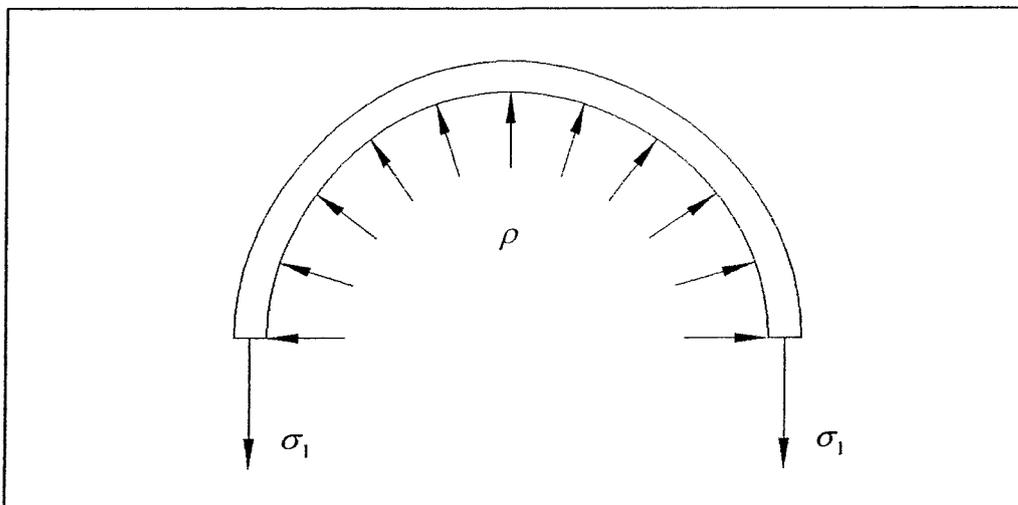
$$\text{หน่วยแรงโอบรัด } 0.05 f'_{co} = 0.05 \times 18 \text{ MPa} = 0.9 \text{ MPa}$$

#### 2. คำนวณหาหน่วยแรงตามแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) ที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก

$$\text{สมการ} \quad \sigma_1 = \frac{\rho r}{t}$$

$$\sigma_1 = (0.9 \text{ MPa}) \times (75 \text{ mm.}) / (4.5 \text{ mm})$$

$$\sigma_1 = 15 \text{ MPa}$$



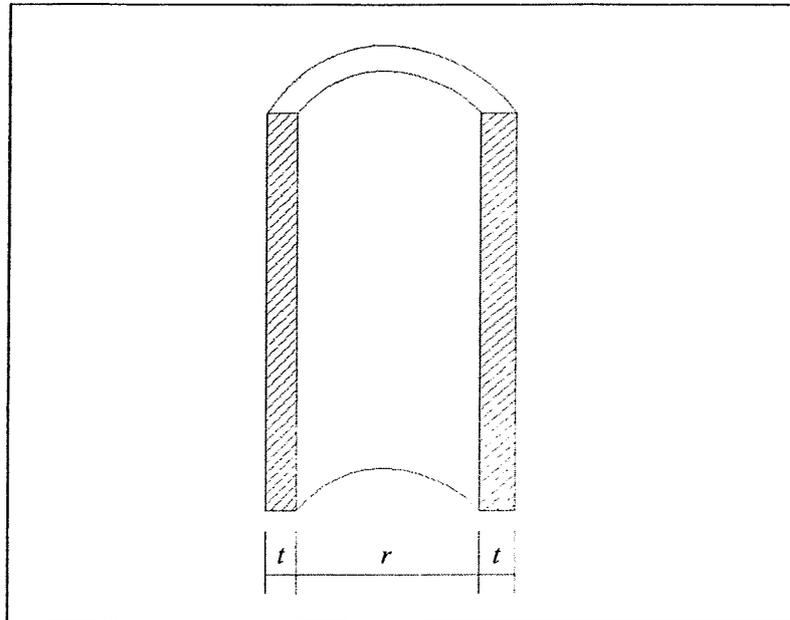
รูปที่ ค.1 Free-body diagram ของปลอกเหล็ก

3. คำนวณหาแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็ก

สมการ  $P = \sigma_1 A$

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

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



รูปที่ ค.2 ภาพตัดของปลอกเหล็ก

4. คำนวณหา โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในสลักเกลียว

สมการ  $T = CdF_i = CdP$

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

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

ตารางที่ ค.6 ตารางสรุปผลโมเมนต์บิดที่นำไปปิดสลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

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

ตารางที่ ค.7 ตารางสรุปผลโมเมนต์บิดที่นำไปบิดสลักเกลียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

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

ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

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

ชวลีพร อุษยีนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ ศาสตราจารย์ สุขประเสริฐ. (2553). การศึกษากำลัังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering), หน้า 272, STR041.

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

ชวลีพร อุษยีนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ ศาสตราจารย์ สุขประเสริฐ. (2554). พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (The 16<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering), หน้า 251, STR053.



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

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

### Abstract

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

### 1. Introduction

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

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

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

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

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

### 2. Test specimens and Test setup

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

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

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

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

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

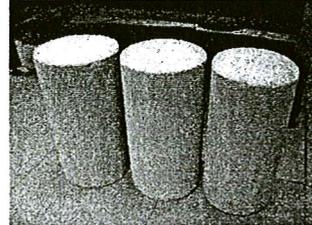


Figure 1. Concrete specimens in group 1 (Reference concrete specimens)

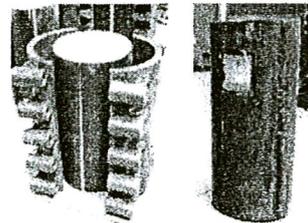


Figure 2. Concrete specimens in group 2 and 3

Table 1. The properties of specimens in this study.

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

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

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

uniform compression was imposed on the test specimens.

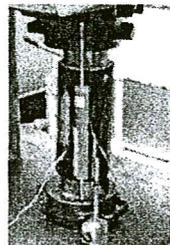


Figure 3. A picture of the test setup.

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

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

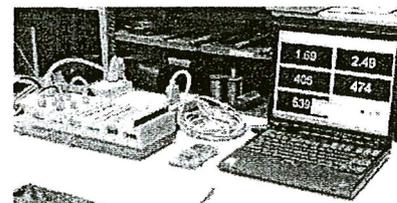


Figure 4. Data Acquisition System (DAQ)

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

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

### 3. Result

#### 3.1 Specimen Behaviors

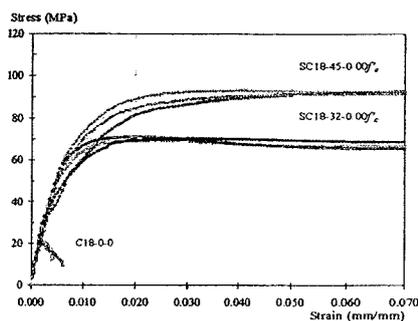
In this paper, the maximum axial shortening was limited to 20 mm without a complete failure, or equivalent to the compressive strain of 0.070 mm/mm, which is about 20 times larger than the strain at the ultimate compressive strength of the concrete ( $\epsilon_{c,ub}$ ). Also, the "axial compressive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

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

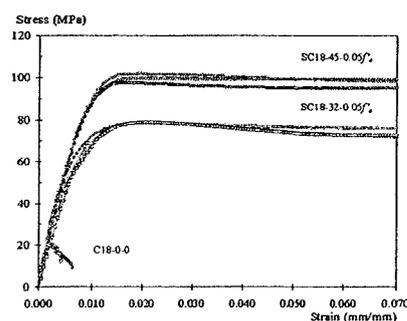
Figure 5 and 6 show the stress-strain diagrams obtained from the tests for the specimens, having  $f'_{cc} = 18$  and 25 MPa respectively. It was observed that the initial slope of the specimen group 2 (confined specimen without preconfining pressure) are similar to that of the reference concrete specimens. At this stage, the Poisson's ratio in concrete specimen is less

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

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

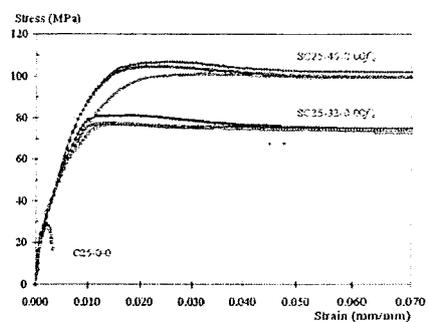


a). Specimen without preconfining pressure

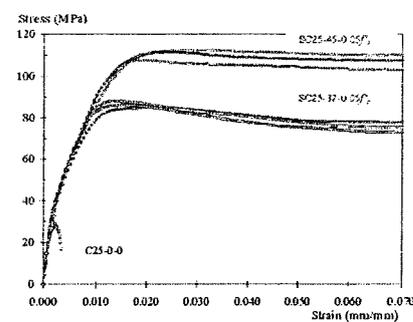


b). Specimen with preconfining pressure at 0.05  $f'_{co}$

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



a). Specimen without preconfining pressure



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

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

3.2 Modes of failure

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

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

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

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

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

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

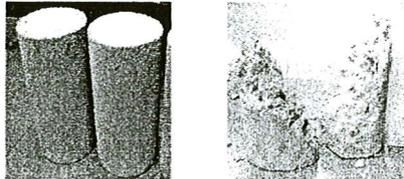


Figure 7. Failure mode of specimen group 1

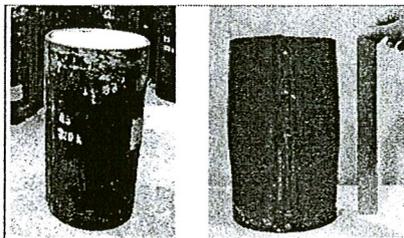


Figure 8. Failure mode of specimen group 2

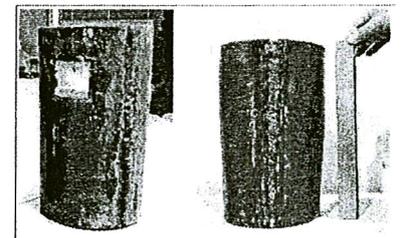


Figure 9. Failure mode of specimen group 3

### 3.3 Axial Compressive Capacity and the Corresponding Axial Shortening

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

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

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

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

### 4. Conclusions

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

1. The confined concrete specimens with preconfining pressure have a linear elastic behavior up to the ultimate compressive strength of reference specimen or approximately 50-70% of their compressive strength. Then, the behavior of the specimens is gradually becoming nonlinear with strain softening behavior and a larger axial deformation before failure.

2. The preconfining pressure has negligible effect on the nonlinear behavior of the specimen. However, the thicker the steel jacket and the larger the preconfining pressure produce a significant increase in the axial compressive capacity and ductility of the concrete core.

### Acknowledgments

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

### Notation

The following symbols are used in this paper

$A_c$  = concrete cross-section area

$A_t$  = gross area of specimen

$A_s$  = steel jacket cross-section area

$B$  = diameter of concrete specimen

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

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

#### References

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



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

ชุลีพร อวยยืนยงค์ (Chuleeporn Auyyuenyong)<sup>1</sup>

ฉัตรชัย แสงอาทิตย์ (Sittichai Seangatith)<sup>2</sup>

ศานต์ สุขประเสริฐ (Sart Sukprasert)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (aom\_ce\_su@hotmail.com)

<sup>2</sup>รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sittichai@su.ac.th)

<sup>3</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sart@su.ac.th)

**บทคัดย่อ :** บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดในแนวแกนของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก ตัวอย่างทดสอบจะถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กโดยการให้แรงกระทำทางด้านข้างเพื่อก่อให้เกิด pre-confining pressure แก่ตัวอย่างคอนกรีต โดยทดสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อคอนกรีตโดยตรง จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมรับแรงแบบเชิงเส้นในช่วงแรกสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงถึงประมาณ 50-70% ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้น มีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมาก โดยเกิดการหดตัวในแนวแกนและการขยายตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปลอกเหล็กที่โอบรัดเกิดการโค้งตัวออกด้านข้าง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นแล้ว ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนมีกำลังและความเหนียวในการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่สูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคอนกรีตอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และแรงที่ใช้กระทำทางด้านข้าง

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

**KEYWORDS:** Axial compression, Concrete, Steel jacket, Preconfinement



## 1. บทนำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นโครงสร้างซึ่งเกิดจากการบรรจุคอนกรีตส่วนลงในท่อเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดกลมกลวงหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นแกนของเสา เป็นการทำงานร่วมกันของท่อเหล็กและคอนกรีตในลักษณะเสาคอมโพสิต (composite column) โดยท่อเหล็กอาจจะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่หลักในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกน (axial stress) ที่เกิดจากแรงกดอัดและโมเมนต์คด และ/หรืออาจจะถูกออกแบบรองรับแรงดัดเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ซึ่งทำให้เกิดการโอบรัด (confining effect) ต่อแกนคอนกรีตในขณะเดียวกันแกนคอนกรีตทำหน้าที่ในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วนและยังช่วยให้ท่อเหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดการโก่งคดเฉพาะที่ (local buckling) เพิ่มขึ้นซึ่งผลของ composite action ข้างต้นทำให้เสา CFT มีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็ก โครงสร้าง ทั้งในด้านความแกร่ง (stiffness) กำลัง (strength) ความเหนียว (ductility) และการดูดซับพลังงาน (energy absorption) เหมาะสำหรับ โครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหว และเป็นผลส่งต่อให้เสา CFT เป็นเสาที่ใช้ปริมาณเหล็กลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็ก โครงสร้าง และท่อเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยัน ซึ่งทำให้การก่อสร้างค่าเงินการได้จ้างและช่วยทำให้ราคาก่อสร้าง โครงสร้างลดลง ดังนั้นจากข้อดีข้างต้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเสา CFT จึงได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ดังตัวอย่างของงานวิจัยที่ได้นำเสนอ โดย Xiao *et. al.* ในปี 2005 [1]

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

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

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่ารูปแบบการใช้ปลอกเหล็กในการหุ้มเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่และปรับปรุงและ/หรือซ่อมแซม โครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว แต่การศึกษามีค่อนข้างน้อยและมุ่งประเด็นในกรณีการเสริมกำลังให้กับ โครงสร้างใหม่ในเสาน้ำหนักกลมและถูกกระทำเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบการให้แรงโอบรัดก่อน (pre-confinement) แก่เสาคอนกรีตโดยใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) แบบใหม่ในช่วงที่มีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคาร โดยไม่ต้องทำการรื้อถอนแล้วก่อสร้างขึ้นใหม่เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลัง ความเหนียวและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตที่ถูกหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกให้แรงโอบรัดก่อนพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลของการรับแรงที่เกิดขึ้นของเสาคอนกรีตล้วน เสาคอนกรีตที่มีการให้หน่วยแรงและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (pre-confinement) ทางด้านข้าง นอกจากนั้นแล้วองค์ความรู้ที่ได้ยัง



สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอาคารต่างๆที่มีความเสี่ยงต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยอีกด้วย

## 2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

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

### 2.1 ตัวอย่างทดสอบ

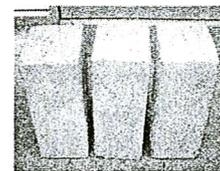
ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยเป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตจำนวน 42 ตัวอย่าง โดยถูกจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม โดย กลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วนที่ไม่มีวัสดุโอบรัด จำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 1(a) ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (control columns), กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้ม

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

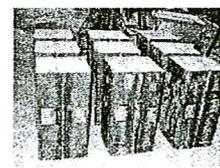
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm และมีรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 2 และตารางที่ 1 โดยชื่อตัวอย่างทดสอบที่ระบุถูกกำหนดในรูปแบบ WX-Y-Z ซึ่ง W หมายถึง ประเภทของตัวอย่างทดสอบ (CR หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส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

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

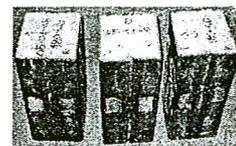
กลุ่มที่	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัดประลัย (MPa)	ความหนาปลอกเหล็ก (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ในการโอบรัดก่อน (MPa)	จำนวน
1	CR18-0-0	18	-	-	3
	CR25-0-0	25	-	-	3
2	SR18-3.2-0 $f'_{co}$	18	3.2	0	3
	SR18-4.5-0 $f'_{co}$	18	4.5	0	3
	SR18-6.0-0 $f'_{co}$	18	6.0	0	3
	SR25-3.2-0 $f'_{co}$	25	3.2	0	3
	SR25-4.5-0 $f'_{co}$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



(a)

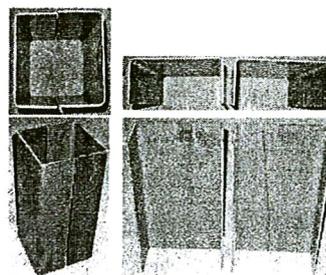
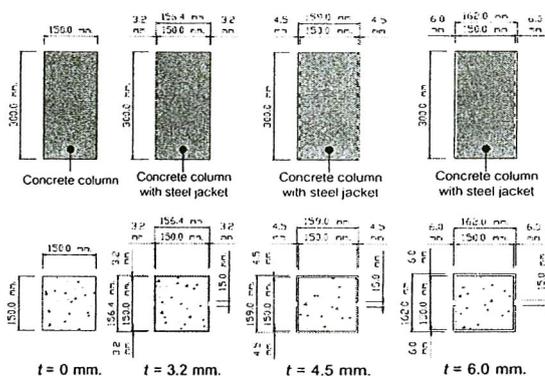


(b)



(c)

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



ภาพที่ 3 ลักษณะปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 2 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

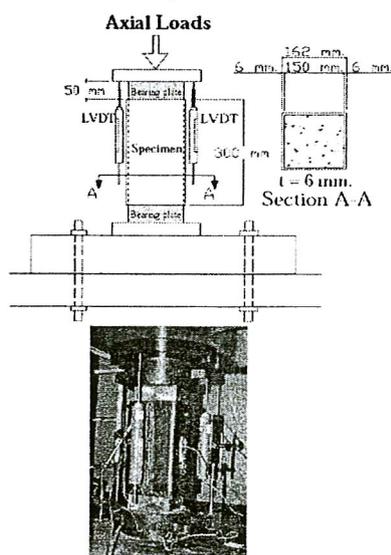
ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาและสมบัติทางกลของวัสดุ

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

2.2 การทดสอบตัวอย่าง

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

เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบจะถูก pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้าๆ โดยใช้ Data Acquisition System (DAQ) ดังแสดงในภาพที่ 5 เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 4 การติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 5 Data Acquisition System (DAQ)

### 3. ผลการทดสอบ

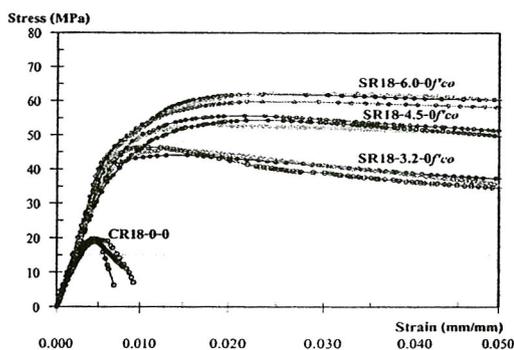
#### 3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัด

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

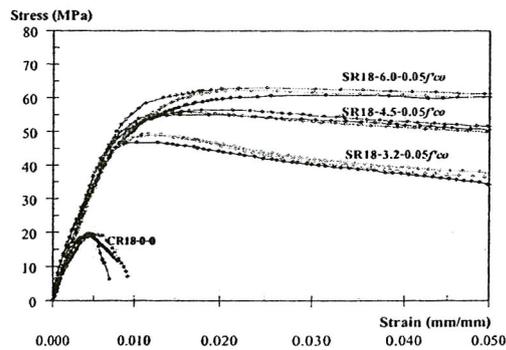
โดยตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ในช่วงแรกจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear elastic) จนถึงค่าของหน่วยแรงประมาณ  $50\%$

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

นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่าปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) ขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ( $f'_{cu}$ ), ความหนาของปลอกเหล็ก ( $t$ ) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยพบว่าตัวอย่างทดสอบเมื่อรองรับแรงกระทำที่สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแข็งแรงลดลงหรือพฤติกรรมแบบ strain-softening ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็ก ไม่มีความแข็งแรงต่อการดัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโค้งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังอัดประลัยที่  $18, 25$  MPa และปลอกเหล็กที่มีความหนา  $3.2, 4.5$  mm ทั้งหมด และความหนา  $6.0$  mm บางตัว ยกเว้น SR18-6.0-0  $f'_{cu}$  และ SR18-6.0-0.05  $f'_{cu}$  ซึ่งมีพฤติกรรมเมื่อรองรับแรงกระทำที่สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว ตัวอย่างทดสอบมีความแข็งแรงประมาณศูนย์หรือพฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอ ผนังของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มมีความแข็งแรงต่อการดัดในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโค้งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัดได้ถึงที่ได้อย่างต่อเนื่อง

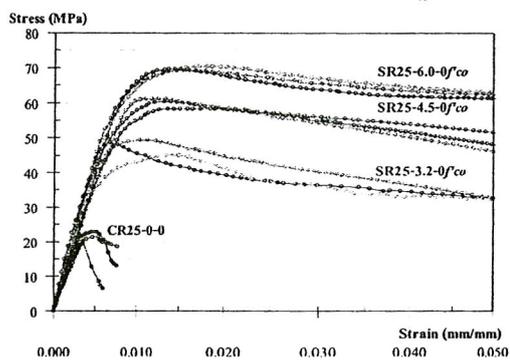


a.) Specimen without preconfining pressure

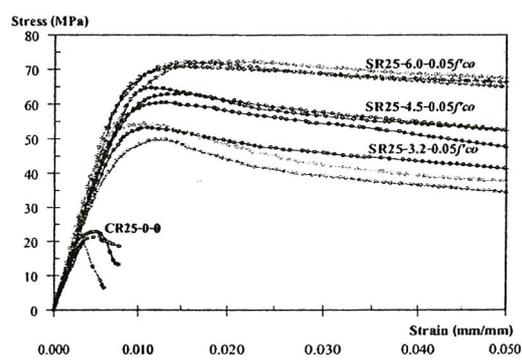


b.) Specimen with preconfining pressure at  $0.05 f'_{co}$

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



a.) Specimen without preconfining pressure



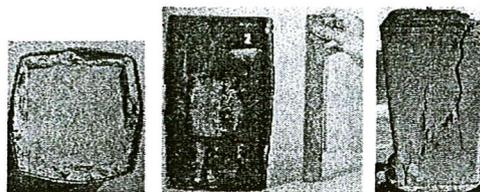
b.) Specimen with preconfining pressure at  $0.05 f'_{co}$

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

### 3.2 ลักษณะการวิบัติ

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

รวดเร็วในแนวทแยงเมื่อแรงกดอัดมีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (abrupt failure) ดังแสดงในภาพที่ 8(c)



(a) (b) (c)

ภาพที่ 8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

(a) หน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 (b) กลุ่มที่ 2 และ 3 (c) กลุ่มที่ 1



ตารางที่ 3 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

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

#### 4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

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

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

อัตราส่วน  $f'_{cc} / f'_{co,ref}$  มีค่าน้อยลงเช่นกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะรับแรงดันจากการขยายตัวของคอนกรีต โดยอาศัยความแตกต่างการคดของผนังปลอกในรูปของ plate ดังนั้นผนังปลอกเหล็กที่หนาจะมีความแข็งแรงต่อการคดมากกว่าผนังที่บาง

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



ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างกับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างไปที 0.05 เท่าของ  $f'_{cc}$

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

## 5. บทสรุป

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ถูก โอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กโดยการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างพบว่า

1. พฤติกรรมในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบพบว่าจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าที่มีกำลังอัด 50-70% ของกำลังอัดประลัยสูงสุดและจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น โดยพบพฤติกรรมอยู่สองลักษณะคือ Strain-softening และ Elastic-perfectly plastic ซึ่งพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในช่วงนี้จะขึ้นกับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ( $f'_{cc}$ ), ความหนาของปลอกเหล็ก ( $t$ ) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ และตัวอย่างทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนเกิดการวิบัติ
2. สำหรับการวิบัติจะมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป การวิบัติเกิดขึ้นโดยการขยายตัวของด้านข้างที่บริเวณคานบนและล่าง เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น ปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติ ทำให้แกนคอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของเสาบริเวณดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ
3. ผลของการ โอบรัดด้วยปลอกเหล็กในกรณีการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างที่ 0.05  $f'_{cc}$  พบว่า ความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้หน่วยแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิด

confining pressure ของเสาน้ำค้ำค้ำที่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง ทำให้การให้หน่วยแรงด้านข้างมีผลน้อยต่อการโอบรัด และมีผลน้อยลงตามความหนาของปลอกเหล็ก แต่ทั้งนี้ก็เป็นการบ่งบอกในเบื้องต้นว่า การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้วยปลอกเหล็ก โดยการให้แรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง มีผลต่อการโอบรัด

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน" ทั้งสถานที่ดำเนินการศึกษาและเครื่องมือในการทดสอบ

## บรรณานุกรม

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

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

นันทิกา นามวิจิตร สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ ศาสน์ สุขประเสริฐ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Nantika Namvijitr Sittichai Seangatith\* Jaksada Thumrongvut Sart Sukprasert

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

**บทคัดย่อ**

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

**คำหลัก** แรงกดอัดในแนวแกน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หน่วยแรงโอบรัดก่อน เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต ปลอกเหล็ก

**Abstract**

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

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

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

### 1. บทนำ

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

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

แนวคิดของเสา CFT ประเภทที่ 2 หรือ Tubed column ได้นำเสนอโดย Tomii [5] โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ปลอกเหล็กรองรับแรงกระทำทางขวางและโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว โดยคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุในการรับแรงกระทำโดยตรงและปลอกเหล็กจะไม่ได้รับแรงกระทำโดยตรงดังนั้นปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ห่อหุ้มแกนคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ และช่วยเพิ่มความสามารถของกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนให้สูงขึ้นและทำให้ความเหนียวของเสาดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้แนวคิดนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังในแก่โครงสร้างอีกด้วย สิทธิชัย และจักษตา [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษา คือ กำลังอัดประลัย และ ความหนาของท่อเหล็ก จากการศึกษาพบว่าเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยที่สูงขึ้นทำให้กำลังของ Tubed column มีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาความหนาของปลอกเหล็กพบว่าความหนาปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร (ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38 ) ให้กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed column สูงเพิ่มขึ้นมากกว่าปลอกเหล็กขนาด 3.2 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กดังกล่าวไม่ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท.) พร้อมทั้งมีความเหนียวเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันและเมื่อเปรียบเทียบกับสมการการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. ไม่ควรมีกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กมาใช้เนื่องจากทำให้สมการออกแบบดังกล่าวมีค่าสูงเกินกว่ากำลังของเสาที่ใช้ในการศึกษา (overestimate) ดังนั้นการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. ควรได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมในการออกแบบ Tubed column

จากการศึกษาถึงผลของการโอบรัดค่อพฤติกรรมของคอนกรีต [7] พบว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างในรูปแบบ active confinement พบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีหน่วยแรง ความเครียดและความแกร่งสูงเพิ่มขึ้นจากเดิม นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการให้หน่วยแรงโอบรัดแบบ passive confinement โดยตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วย continuous steel spiral พบว่าถ้าระยะห่างระหว่าง spiral มีค่าน้อยๆ จะทำให้หน่วยแรงในแนวแกนและค่าความเครียดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจากการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างแบบ active confinement และ passive confinement มีผลการ

ทดสอบในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างคอนกรีตจะมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่าการวิบัติและการวิบัติจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป และ Richart และคณะ [7] ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังการกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างดังสมการ

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

เมื่อ  $f'_{cc}$  คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันรอบข้าง

$f'_{co}$  คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง

$f_1$  คือ ความดันรัวรอบ (confining pressure)

$k_1$  คือ confining effectiveness coefficient

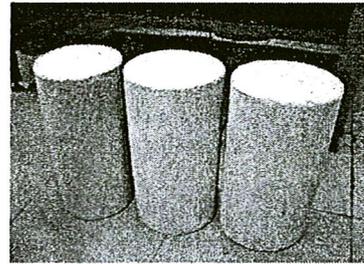
มีค่าเท่ากับ 4.1 สำหรับคอนกรีตกำลังปกติ และ 2.0 สำหรับคอนกรีตกำลังสูง

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

## 2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

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

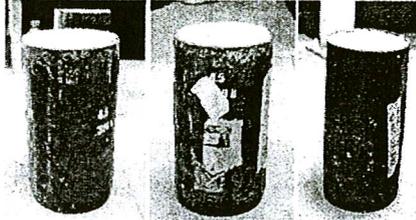
ASTM E8 จากตารางที่ 1 แสดงสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบมีรูปร่างทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โดยมีตัวแปรหลัก 3 ตัวแปร ได้แก่ กำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต (18, 25 และ 32 MPa ที่อายุ 28 วัน) ความหนาของปลอกเหล็ก (3.2, 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ให้แก่ตัวอย่างทดสอบ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



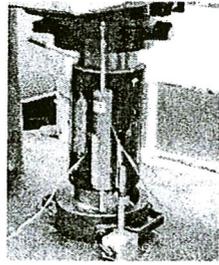
รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

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

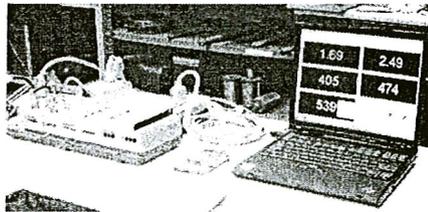
มีค่าตามที่ต้องการแล้ว ปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบจะถูกเชื่อมติดกันโดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญ



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะการหดตัว (LVDT) กับตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 อุปกรณ์ Data acquisition system (DAQ)

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

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

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ

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

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

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

หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าความชันของกราฟจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวในอัตราที่เร็วขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านข้างและแรงดันทางด้านขวางกระทำตั้งฉากต่อผนังของปลอกเหล็กทำให้เกิดการรับแรงกระทำร่วมกันระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง โดยปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ช่วยจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าว เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำที่สูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนได้สูงขึ้นก่อนการวิบัติ จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5-7 และตารางที่ 2

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

แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่ง โดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์

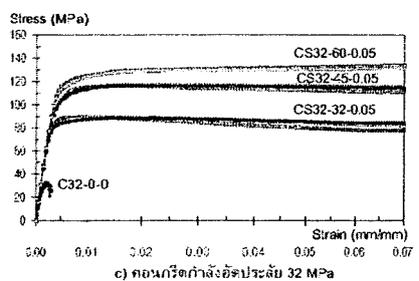
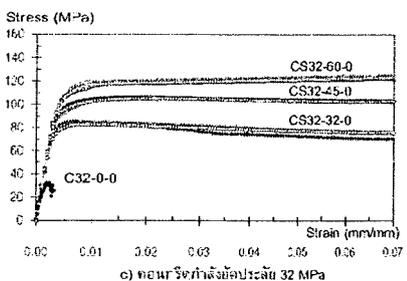
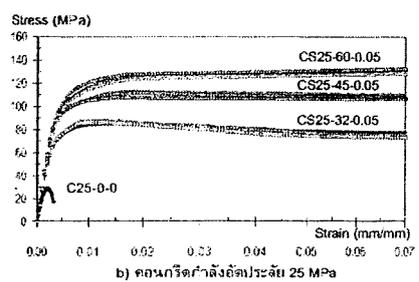
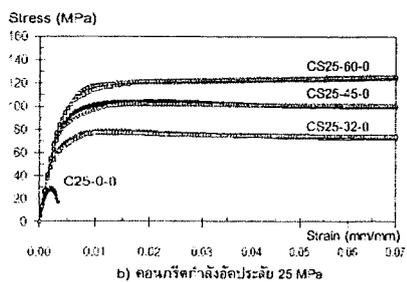
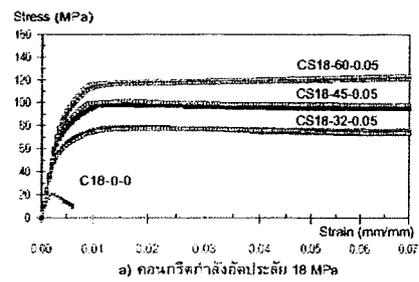
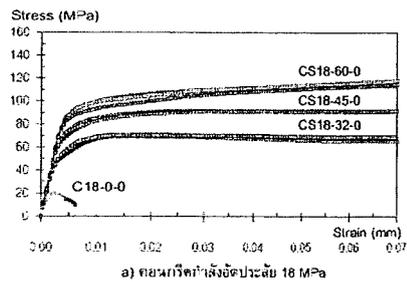
เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแกร่งด้านทานขยายตัวทางด้านของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กำลังอัดประลัย โดยมีปลอกเหล็กขนาดความหนา 4.5 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาปานกลางและความหนาสูง) CS18-45-0, CS18-45-0.05, CS18-45-0.08, CS18-60-0.05, CS18-60-0.08, CS25-45-0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

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

โดยสรุปพบว่า การให้แรงโอบรัดทางด้านข้างต่อตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น แต่ความหนาของปลอกเหล็กจะมีผลทำให้พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น โดยตัวอย่างทดสอบที่มีปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร จะมีพฤติกรรมแบบ strain hardening และ elastic-perfectly plastic ซึ่งเหมาะนำไปใช้งาน เพราะตัวอย่างทดสอบมีสมรรถนะในการรับแรงกระทำที่สูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ

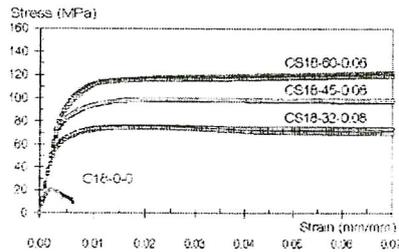
### 3.2 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

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

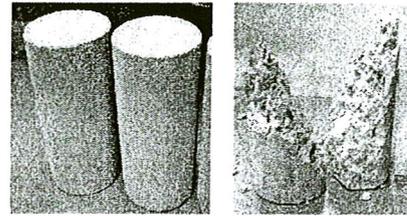


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงไอบีรคทางค้ำข้าง (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)

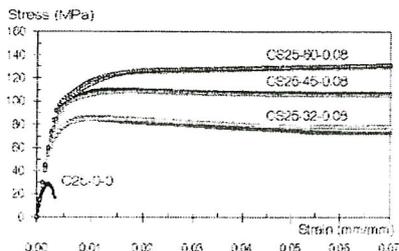
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ ตัวอย่างทดสอบ มีแรงไอบีรคทางค้ำข้าง  $0.05 f'_{co}$  (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



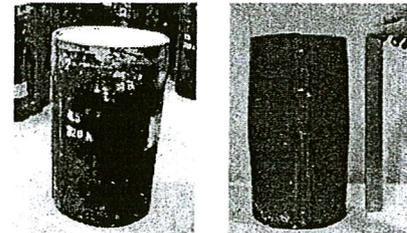
๑) คอมนารีค่ากำลังยัดประยัย 18 MPa



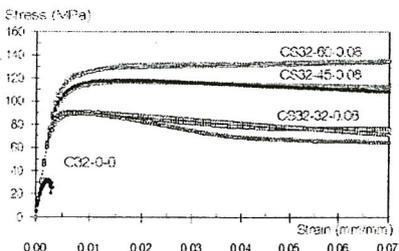
รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1



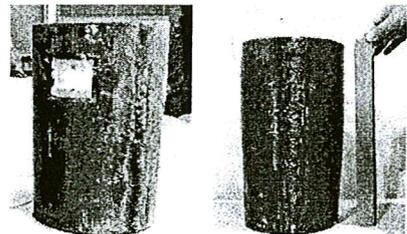
๒) คอมนารีค่ากำลังยัดประยัย 25 MPa



รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2



๓) คอมนารีค่ากำลังยัดประยัย 32 MPa



รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเค้นของตัวอย่างทดสอบ มีแรงไอบริคทางค้ำข้าง  $0.08 f'_{co}$  (ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)

การวิบัติของตัวอย่างอ้างอิง(กลุ่มที่ 1) มีลักษณะคล้ายกับการวิบัติคอนกรีตกำลังอัดปกติทั่วไป ซึ่งเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงคดพร้อมกัน โดยมีรอยแตกห้ามุมประมาณ 50 องศากับแกนของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 8

สำหรับการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน โดยเกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีตซึ่งค้ำผนังปลอกเหล็กให้เกิดการโป่งตัวอย่างทางด้านข้างโดย เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

โดยสรุปพบว่า ตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2-4 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติและมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง และตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา

4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร เกิดการโป่งตัวทางด้านข้างน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กดังกล่าวมีความแข็งแรงเพียงพอในการจำกัดการขยายตัวของแกนคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเพียงพอลดความมาครฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของ ว.ส.ท. และ AISCLRFD โดยที่ความหนาปลอกเหล็กทั้ง 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร

### 3.3 หน่วยแรงกอดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

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

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

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

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

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

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

เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน พบว่าอย่างตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตร มีแนวโน้มของอัตราส่วนกำลังดังก้าวดีกว่าตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 และ 6.0 มิลลิเมตร และอัตราส่วนดังก้าวมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

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

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบของค้ำยันทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางค้ำข้าง

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

หมายเหตุ: พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้น

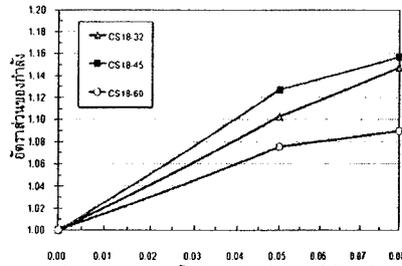
แบบที่ 1 คือ พฤติกรรมแบบ Strain hardening

แบบที่ 2 คือ พฤติกรรมแบบ Elastic perfectly plastic

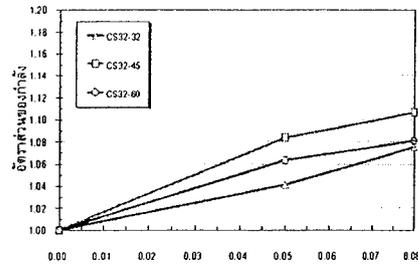
แบบที่ 3 คือ พฤติกรรมแบบ Strain softening

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโบริคทางด้านข้างกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโบริคทางด้านข้าง

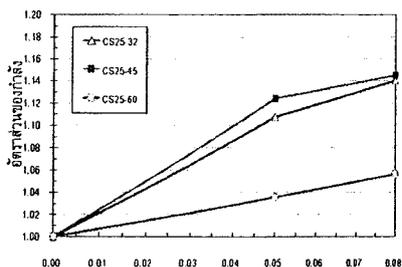
ตัวอย่างทดสอบ	$f'_{max}$			$\frac{f'_{max,0.05 f'_{co}}}{f'_{max,0 f'_{co}}}$	$\frac{f'_{max,0.08 f'_{co}}}{f'_{max,0 f'_{co}}}$
	$f'_{max,0 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{max,0.05 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{max,0.08 f'_{co}}$ (MPa)		
CS18-32	58.4	64.4	67.0	1.10	1.15
CS25-32	69.2	74.1	76.5	1.07	1.10
CS32-32	82.2	85.6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



a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa



b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของก้ำกึ่งของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโบริคเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโบริคและอัตราส่วนของหน่วยแรงโบริคทางด้านข้างต่อก้ำกึ่งอัดประลัยของคอนกรีต

### 3.4 ผลของหน่วยแรงโบริคทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

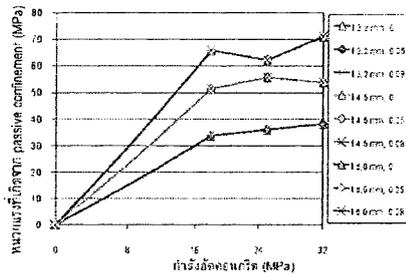
จากสมการทำนายกำลังแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง ที่ถูกนำเสนอโดย Richart และคณะ. ดังนี้

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

ในการศึกษาค้างนี้ได้ศึกษาถึงผลของการเพิ่มหน่วยแรงโบริคทางด้านข้างให้แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4 จากค่า  $f'_{max}$  ที่ได้จากการทดสอบ

นั้นเกิดจากผลรวมของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและผลของ passive confinement และ active confinement ซึ่งจะมีค่าอยู่ในรูปของ  $k_c f_c'$  ดังสมการข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของ passive confinement จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของปลอกเหล็กที่นำมาห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ และผลของ active confinement จะเกิดจากการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสมการหาความเครียดที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กหักออกจากค่า  $f'_{max}$  ดังแสดงในตารางที่ 4

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



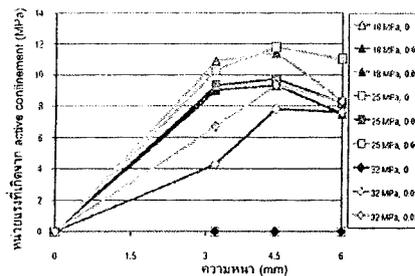
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement

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

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบกับค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดจากผลของ passive confinement และเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากันพบว่า ค่าหน่วยแรง

ดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงความหนาเท่ากัน พบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement นี้ จะขึ้นอยู่กับกำลังของปลอกเหล็กที่นำมาห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ

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



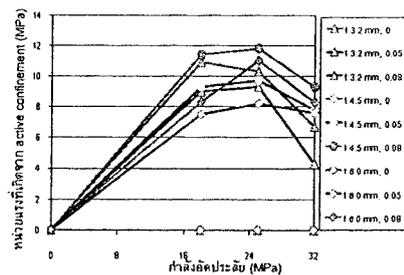
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก passive confinement และ active confinement

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

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

ดังนั้นค่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมในการศึกษานี้คือค่าความหนา 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่  $0.05 f'_{co}$  เพราะว่าตัวแปรดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรงได้เพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวยังมีพฤติกรรมในช่วงให้เชิงเส้นแบบ elastic-perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมในช่วงให้เชิงเส้นลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน เมื่อพิจารณาการวิบัติของตัวอย่างทดสอบนี้ พบว่าจะเกิดการโป่งออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตรนี้ มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD และ ว.ส.ท.



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและมีการให้แรงกระทำทางด้านข้างภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนสามารถสรุปได้ดังนี้

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

2) เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าหนึ่งแล้ว การเพิ่มขึ้นของความหนาของปลอกเหล็กและการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง โดยความหนาของปลอกเหล็กมีอิทธิพลมากกว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่า และภายใต้ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้ ความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเสา Tubed column คือไป ปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรและหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่  $0.05 f'_{co}$

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง "การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน"

### สัญลักษณ์

สัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

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

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Xiao, Y., He, W. and Choi, K. 2005. Confined concrete filled tubular columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 131(3): 488-497.
- [2] Saw, H.S. and Liew, J.Y.R. 2000. Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 53: 121-147.
- [3] American Institute of Steel Construction. 1994. *Manual of steel construction load and resistance factor design (LRFD)*. 2<sup>nd</sup> Ed. Chicago.
- [4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538. มาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานคร.
- [5] Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K. and Xiao, Y. 1985. Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. *Proceeding of International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures*. Harbin, China. 19-26.
- [6] ลิทธิชัย แสงอาทิตย์ย์ และ จักษดา ธีรารังวุฒิ. 2551. การตรวจสอบ TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน. *วิศวกรรมสาร มช.*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, มกราคม-กุมภาพันธ์ 2551: 81-99.
- [7] Richart, F.E, Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. 1928. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. *University of Illinois Engineering Experimental Station Bulletin* 185.



## พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

### Compressive Behaviors of Square Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets

ชวลีพร อูยอินยองค์<sup>1\*</sup>, สิทธิชัย แสงอาทิตย์<sup>2</sup>, จักรกานต์ ช่างวณิช<sup>3</sup>, ศาสัน สุขประเสริฐ<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
aom\_ce\_sut@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

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

#### ABSTRACT

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

\* ชวลีพร อูยอินยองค์ (Corresponding author)

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

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

### 1. บทนำ

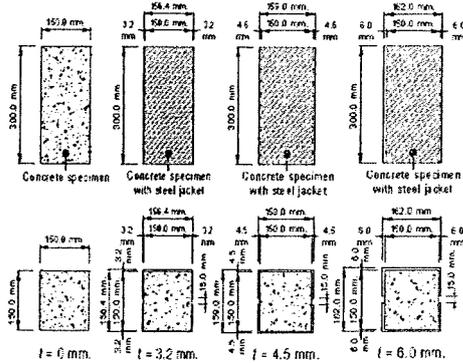
เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นเสา composite ที่ได้จากการใช้ท่อเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดทรงกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นแบบหล่อหุ้มแกนของเสาซึ่งอาจจะเป็นคอนกรีตล้วนหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง ทั้งในด้านกำลัง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

พฤติกรรมการรับแรงสูงสุดและความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองของ ACI ยังสามารถทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างได้ถูกต้องพอเพียง และเพื่อประสิทธิภาพของ Tubed column ที่สูงขึ้นควรเสริมท่อเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ

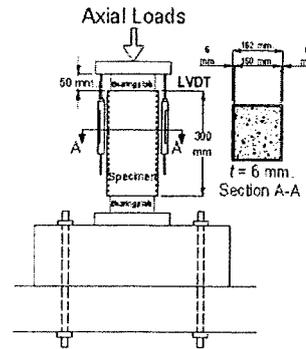
จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า รูปแบบการใช้ปลอกเหล็กในการโอบรัดเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่และปรับปรุงและ/หรือซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยพบว่ากำลังและความเหนียวของเสา CFT และ Tube concrete column จะเพิ่มขึ้นเมื่อสามารถโอบรัดทางด้านข้างที่พอเพียง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

## 2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

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



ภาพที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 2 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

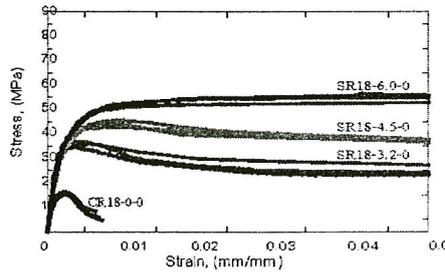
2.2 รายละเอียดการทดสอบ การทดสอบใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2000 kN โดยแรงอัดในแนวแกนกระทำลงสู่แกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบโดยตรงที่ปลายทั้งสองข้างผ่าน Steel bearing plate ขนาด 140x140 mm หนา 50 มม ดังแสดงในภาพที่ 2 การหัดตัวในแนวแกนถูกวัดโดยใช้ Linear Variable Differential Transducers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

### 3. ผลการทดสอบ

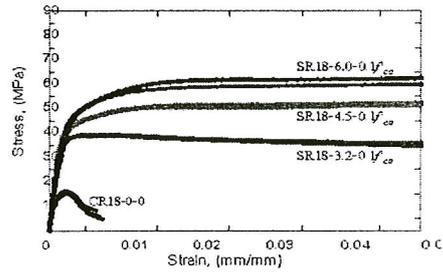
3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด ในการศึกษาได้จำกัดการแสดงผลที่ค่าการหัดตัว 15 mm หรือเทียบเท่าค่าความเครียด (strain) ในคอนกรีตที่ 0.050 mm/mm ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่สูงกว่า ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 18.75 เท่า ภาพที่ 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain)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

มากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่  $0.1 f_{\infty}$  ซึ่งจะก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแรงแเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 3 และ 4 เมื่อพิจารณา  $f_{\infty}$  และความหนาเปลือกเหล็กที่เท่ากัน พบว่าค่าความแรงแมีแนวโน้มสูงขึ้นตามหน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน ค่าความแรงแมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาเปลือกเหล็กมากขึ้น โดยที่ความแรงแของตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่สอง ค่าความชันของกราฟจะเริ่มลดลงเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect เป็นผลทำให้ความชันของกราฟเริ่มมีค่าลดลง ในขณะที่เดียวกัน แกนคอนกรีตจะมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นและจะทำให้ความดันรัวรอบ (confining pressure) ระหว่างคอนกรีตและเปลือกเหล็กเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลทำให้คอนกรีตมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุเหนียว(ductile)

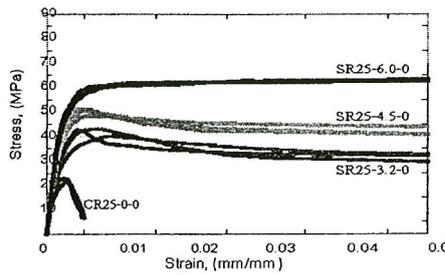
นอกจากนี้ พฤติกรรมในช่วงที่สองของตัวอย่างทดสอบจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ( $f_{\infty}$ ) ความหนาของเปลือกเหล็ก ( $r$ ) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1.) ตัวอย่างทดสอบรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแรงแประมาณศูนย์หรือ elastic-perfectly plastic ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอผนังของเปลือกเหล็กที่ห่อหุ้มมีความแรงแต่อการตัดในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของเปลือกเหล็กจะเกิดการโก่งเตาะเฉพาะที่และทำหน้าที่รัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและเปลือกเหล็กที่ความหนา 6.0 mm ทั้งหมด อีกทั้งพฤติกรรมดังกล่าวยังพบในการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่  $0.1 f_{\infty}$  ซึ่งเกิดขึ้นในเปลือกเหล็กที่หนาปานกลาง (4.5 mm) และทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 2.) ตัวอย่างทดสอบเมื่อรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแรงแลดลงหรือ strain-softening ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของเปลือกเหล็กไม่มีความแรงแต่อการตัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของเปลือกเหล็กจะเกิดการโก่งเตาะเฉพาะที่และเปลือกเหล็กจะไม่สามารถรัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและเปลือกเหล็กที่ความหนา 3.2 และ 4.5 mm ทั้งหมด



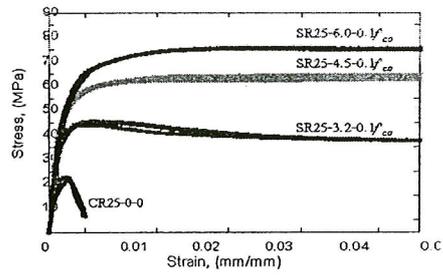
(ก) Concrete specimens with steel jacket at  $f'_{co} = 18$  MPa



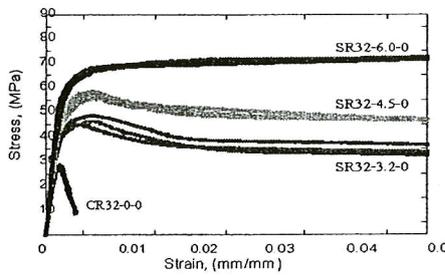
(ข) Concrete specimens with steel jacket at  $f'_{co} = 18$  MPa



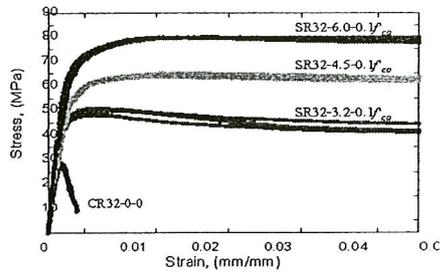
(ค) Concrete specimens with steel jacket at  $f'_{co} = 25$  MPa



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



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



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

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่มีหน่วยแรงโอบรัด  $0.1 f'_{co}$

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

แบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) เริ่มต้นจากการร้าวแตกของคอนกรีตในบริเวณที่แรงอัดกระทำ ซึ่งทำให้แกนคอนกรีตเกิดการหดตัวในแนวแกนและการขยายตัวออกทางด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันออกกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กทางด้านข้างทำให้ปลอกเหล็กเกิดการโก่งเคาะของผนังโดยการโป่งออกของปลอกเหล็กซึ่งเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วงความสูง 100-150 มม ของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5(ข)-(ค) เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นและปลอกเหล็กเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างมากจนไม่สามารถโอบรัดคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ ปลอกเหล็กจะช่วยรัดแกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าหากันและทำให้การ crushing ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่อง และทำให้แรงอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็ก เป็นผลทำให้มีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมากก่อนที่จะเกิดการวิบัติโดยรวม ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและประหยัด ตัวอย่างทดสอบควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอในบริเวณที่ผนังท่อเกิดการโป่งออก



(ก) คอนกรีตร้าว



(ข) ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต



(ค) หน้าตัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

ภาพที่ 5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

#### 4. วิจัยารณ์ผล

##### หน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบและค่าความเครียดสูงสุด

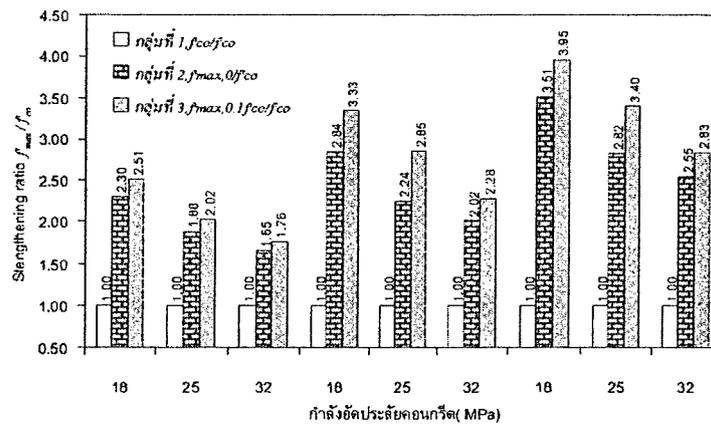
ในการศึกษานี้ได้นิยามให้  $f_{max}$  เป็นค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ จาก column ที่ 4 ของตารางที่ 1 พบว่า เมื่อคอนกรีตมี  $f_{co}$  ที่เท่ากัน ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่หนา 3.2 มม มีค่าอัตราส่วน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

ตารางที่ 1 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

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

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

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



ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน Strengthening ratio  $f_{max}/f_{c0}$  ของตัวอย่างทดสอบ

โดยสรุปพบว่า ป्लอกเหล็กที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มี  $f_{c0}$  ที่สูงขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะช่วยให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้น ยังช่วยให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

##### 5. สรุปผลการทดสอบ

จากการคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมในการรับแรงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไร้เชิงเส้น ตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าที่มีกำลังอัด 60-80% ของกำลังอัดประลัยสูงสุด จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น พฤติกรรมดังกล่าวพบอยู่ 2 ลักษณะคือ Strain-softening และ Elastic-perfectly plastic พฤติกรรมในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ( $f_{c0}$ ) ความหนาของปลอกเหล็ก ( $t$ ) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

2. การวิบัติเกิดที่ค่าการหดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป แสดงว่าตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นโดยการขยายตัวออกทางด้านข้างและเกิดมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วง 100-150 mm ของ



ตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติ ทำให้แกนคอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของตัวอย่างทดสอบบริเวณดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ

3. ผลของการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างในเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้หน่วยแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิด confining pressure ของเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง อย่างไรก็ตามความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดและความเหนียวมีค่าสูงขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สถานที่ดำเนินการศึกษา และเครื่องมือในการทดสอบ ในโครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน"

#### เอกสารอ้างอิง

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